

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea

# L'aerodinamica del ciclista nell'interazione con altri veicoli



**Politecnico  
di Torino**

**Relatori**

Professoressa Stefania SCARSOGLIO

Ing. Davide PERRONE

**Candidato**

Mattia MONDIN

matricola: 257179

ANNO ACCADEMICO 2021-2022



A *Clemente e Fernando*,  
che guardano da lassù

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Studio dei flussi aerodinamici</b>	<b>4</b>
2.1	Cenni di storia . . . . .	5
2.2	Differenti equazioni implementate . . . . .	6
2.3	Confronto fra simulazione computazionale e approccio sperimentale . . . . .	8
2.4	L'approccio ibrido di Meroney . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Aerodinamica dei corpi tozzi</b>	<b>13</b>
3.1	Cilindro isolato . . . . .	14
3.2	Due cilindri allineati . . . . .	16
3.3	Effetto della rugosità superficiale . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Effetti sulla resistenza aerodinamica del ciclista</b>	<b>20</b>
4.1	Ciclisti allineati: benefici aerodinamici . . . . .	21
4.2	Ciclista di interesse nella scia di un veicolo motorizzato . . . . .	29
4.3	Veicolo motorizzato nella scia del ciclista di interesse . . . . .	33
4.4	Cycling pelotons . . . . .	37
<b>5</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>42</b>
<b>6</b>	<b>Bibliografia</b>	<b>44</b>
<b>7</b>	<b>Ringraziamenti</b>	<b>48</b>

# 1 Introduzione

Il presente elaborato si pone come scopo l'analisi della resistenza aerodinamica di un ciclista, il quale interagisce con altri veicoli in prossimità, siano essi motorizzati oppure a propulsione umana. In particolar modo viene analizzata l'interazione con altri atleti in configurazione di allineamento con il ciclista di interesse, sia esso posizionato posteriormente nella fila, sia esso in posizione iniziale, e con i veicoli, quali automobili o motociclette, generalmente presenti, per vari scopi, durante le competizioni ciclistiche.

Il primo capitolo è dedicato ad una breve trattazione delle simulazioni numeriche e degli esperimenti in galleria del vento, che vengono eseguiti per studiare le forze che agiscono sul ciclista a seguito dell'interazione con il flusso d'aria. Segue il secondo capitolo, che riassume quanto noto e studiato in merito all'interazione fra un cilindro, simulante un generico corpo tozzo, e la corrente aerodinamica. Viene inizialmente analizzato il caso di cilindro isolato e quindi la configurazione di due cilindri, uno di seguito all'altro. Il capitolo terzo analizza specificatamente quanto oggetto di interesse, ovvero l'interazione fra il ciclista studiato e altri corpi. Seguono, infine, le conclusioni.

## 2 Studio dei flussi aerodinamici

Il presente capitolo si pone come scopo di investigare quali siano le metodologie, sia sperimentali sia computazionali, per lo studio delle strutture del flusso e dei coefficienti aerodinamici, attorno ad un corpo in esame. A tal proposito è stato fatto riferimento ad una serie di articoli, pubblicati su rilevanti riviste dedicate all'ingegneria del vento, i cui autori si sono occupati di analizzare nel dettaglio i vantaggi e gli svantaggi dei diversi approcci, la qualità e l'affidabilità dei risultati ottenuti, la validazione di procedure semplificate. Non si è quindi attinto esclusivamente all'ambito ciclistico, il quale in ogni caso, essendo il cuore del presente articolo, ha trovato specifica attenzione, ma anche all'ambito della cosiddetta *urban physics*, definita da Blocken [12] la scienza e l'ingegneria che si occupano di processi fisici in ambito urbano; fondamentalmente di trasporto di massa e di calore.

Trattando di approccio computazionale si farà riferimento alla nota CWE - *Computational Wind Engineering* - branca della *Computational Fluid Dynamics* che si occupa della applicazione delle metodologie CFD all'ingegneria del vento, mentre approfondendo l'approccio sperimentale (EFD) - *Experimental Fluid Dynamics* - verranno affrontati aspetti relativi alla simulazione sul campo, all'analisi in scala 1:1 e agli esperimenti condotti su riproduzioni in dimensioni opportunamente ridotte.

## 2.1 Cenni di storia

Il primo approccio allo studio delle strutture fluidodinamiche che si originano dall'interazione fra una corrente fluida e uno o più corpi di interesse, come è palese immaginare, fu di tipo sperimentale. Meroney [13] riporta che già nel 1759 John Smeaton investigò sperimentalmente gli effetti causati dal vento quando esso lambisce degli oggetti solidi. La prima applicazione della EFD alla ingegneria del vento, con l'ausilio di apposite strutture, quali gallerie del vento o canali d'acqua, invece, viene fatta risalire a poco più di un secolo più tardi quando, nel 1891, il professor la Cour stabilì una stazione sperimentale di un mulino a vento ad Askov, in Danimarca. Soltanto verso il secondo dopoguerra (1940-1960), tuttavia, vennero condotte serie sperimentazioni, le quali consideravano gli aspetti di similarità e modellazione fisica, al fine, a titolo esemplificativo, di stimare i carichi aerodinamici gravanti sul World Trade Center di New York, oppure gli effetti del vento sul comfort dei cittadini posti in prossimità degli edifici. Risulta importante notare come furono necessarie diverse decine d'anni per assestare la preparazione delle indagini sperimentali e garantirne l'affidabilità e riproducibilità [13].

La storia della fluidodinamica computazionale ha inizio più tardi. Importanti studi e traguardi in aerodinamica vennero raggiunti all'inizio del novecento, quando già si conoscevano le equazioni da implementare per la soluzione di complessi problemi inerenti l'ingegneria del vento [14]. Tuttavia, mancavano allora le tecnologie e le capacità computazionali per risolvere situazioni caratterizzate da geometrie non banali e condizioni al contorno da soddisfarsi. Solamente negli anni sessanta, riportano Blocken e Gualtieri [14], cominciarono ad esserci le risorse tecnologiche per superare questi ostacoli, unitamente all'impegno di ingegneri e matematici, che svilupparono metodi numerici per la soluzione dei problemi aerodinamici di interesse. Da allora, sia l'avanzamento delle conoscenze nel campo del calcolo numerico, sia la sempre più crescente potenza computazionale a disposizione degli scienziati, ha permesso la vastissima applicazione delle metodologie CFD a numerosissime branche della fluidodinamica. Infatti, sono a disposizione degli ingegneri molti programmi commerciali adatti a numerosi casi di utilizzo pratico, come già scriveva Stathopoulos nel 1997 [15].

Durante la sesta *European and African Conference on Wind Engineering*, svoltasi a Cambridge nel luglio 2013, l'Iawe - *International Association of Wind Engineering* - celebrò il cinquantesimo anniversario dello storico evento di Teddington (1963), Blocken [16]. Nello stesso anno Smagorinsky sviluppava un celebre metodo, e di successo, per la risoluzione delle LES - *Large Eddy Simulation* - noto come *Smagorinsky-Lilly model*, utilizzato ancor'oggi in diverse aree della meccanica dei fluidi e sviluppato allora per le previsioni

meteorologiche - *Numerical Weather Prediction (NWP)* - che avevano cominciato a svilupparsi negli anni '50 del secolo scorso [16]. In questi anni può essere quindi posizionata la nascita della CWE e da allora non ha smesso di accrescere le proprie potenzialità.

## 2.2 Differenti equazioni implementate

Blocken e Gualtieri [14] realizzano un'ottima panoramica su quelle che sono le quattro principali classi di equazioni implementate nello studio dei flussi turbolenti, riferendosi prevalentemente all'ambito della EFM - *Environmental Fluid Mechanics* -.

Il primo di questi metodi è noto con l'acronimo DNS - *Direct Numerical Simulation* - il quale consiste nella risoluzione esatta delle equazioni di Navier-Stockes (NS). Queste equazioni, tuttavia, tralasciando il caso di geometrie particolarmente semplici, risultano essere, da un punto di vista computazionale, eccessivamente dispendiose. Ne consegue la necessità di introdurre delle approssimazioni e/o delle ipotesi semplificative, al fine di ottenere soluzione al problema in esame, in tempi utili. La medesima conclusione viene riportata anche da Blocken [12], sottolineando la difficoltà della soluzione esatta particolarmente nel caso di flussi caratterizzati da elevati numeri di Reynolds, come si riscontra in molte applicazioni di WE. In Blocken [12] vengono riportati i modelli approssimati di più frequente utilizzo.

L'acronimo RANS - *Reynolds Averaged Navier-Stockes equations* - viene utilizzato per indicare le equazioni di NS mediate nel tempo. Esse vengono utilizzate per rappresentare un flusso principale, che viene esattamente risolto, al quale viene sommata una piccola perturbazione, che permette di modellare ed approssimare la turbolenza del flusso. Ogni variabile che appare nelle equazioni di NS, viene quindi scomposta in una componente media ed una componente di piccola perturbazione, sia per le grandezze di natura vettoriale, sia per le grandezze di natura scalare. Questo approccio introduce quindi un'approssimazione sulla scala temporale, in quanto appare evidente che il flusso medio sia invariante rispetto al tempo. Vi è, tuttavia, una complicazione che sorge in seguito all'utilizzo delle RANS, cioè il fatto che la procedura succitata introduca delle ulteriori incognite, quali i sei termini linearmente indipendenti del tensore degli sforzi di Reynolds, rendendo impossibile, senza ulteriori approssimazioni, denotate come *modelli turbolenti*, la formulazione di un problema chiuso.

I modelli turbolenti maggiormente utilizzati sono di due tipi: di primo ordine e di secondo ordine [12][14]. I modelli di primo ordine sono i più semplici ed utilizzano l'ipotesi di Boussinesq. Esempi a tal proposito sono il modello a singola equazione di Spalart-Allmaras, lo standard  $k - \epsilon$  model, lo standard



$k - \omega$  model e il  $k - \omega$  shear stress transport (SST) model [12]. I modelli del secondo ordine comportano l'introduzione e la risoluzione di ulteriori equazioni di trasporto e di dissipazione della turbolenza, pur seguendo anch'essi l'ipotesi di Boussinesq.

*Blocken* [12] sottolinea la necessità di un distinguo fra RANS, stazionarie, e URANS, tempo-dipendenti (*unsteady*). Infatti i flussi che si riscontrano nell'*Atmospheric boundary-layer* (ABS), definito come quella porzione di bassa troposfera, in realtà molto variabile sia nel tempo sia nello spazio, caratterizzata da una forte interazione fra attività umane e correnti aerodinamiche [12], sono prevalentemente instazionari; ne consegue la necessità di un approccio coerente. Anche Defraeye *et al.* [20] evidenziano la perdita di tutte le strutture instazionarie presenti nella scia a valle di un corpo tozzo, conseguente all'utilizzo delle RANS stazionarie.

Un differente approccio alla risoluzione approssimata delle equazioni di NS è noto con l'acronimo di LES, e consiste nell'introdurre un filtro che, anzichè agire sulla scala temporale, agisce su quella spaziale. Infatti vengono risolte in maniera esatta solamente le strutture vorticosose che superano una certa dimensione, mentre vengono applicati dei modelli approssimati a quelle di ridotte intensità. Anche questa procedura conduce all'introduzione di ulteriori incognite, il cui numero eccede quello delle equazioni a disposizione. Analogamente a quanto descritto in precedenza, è d'obbligo l'introduzione di ulteriori modelli/equazioni al fine di ottenere un problema chiuso.

Le URANS permettono di risolvere le strutture instazionarie del flusso principale, ma utilizzando un approccio statistico, mentre il metodo LES trova soluzione effettiva alla turbolenza di larga scala e permette di tenere in considerazione il tempo. In letteratura esiste, a tal proposito, un approccio ibrido URANS/LES. Questo permette di sfruttare le potenzialità di entrambe le metodologie, con alcune accortezze. Le URANS vengono utilizzate nella regione di dominio computazionale prossima alle pareti, in quanto le strutture turbolente sono qui molto piccole e l'utilizzo del metodo LES diverrebbe proibitivamente dispendioso, mentre il restante volume viene risolto con LES, in quanto, poichè permette di risolvere gran parte del flusso turbolento instazionario, generalmente garantisce migliori prestazioni se paragonato ad un approccio RANS o URANS. La maggior difficoltà risiede nella zona di transizione fra URANS e LES, in quanto questi due approcci, fundamentalmente differenti, devono essere fatti "dialogare" fra loro.

Nell'ambito dell'aerodinamica del ciclismo le equazioni maggiormente utilizzate risultano essere le RANS, a titolo esemplificativo in Fintelman *et al.* [18] sia con il modello standard  $k - \varepsilon$  sia con il modello SST  $k - \omega$ , in Blocken *et al.* [17] con lo standard  $k - \varepsilon$  e in Mannion *et al.* [19] con l'utilizzo di quattro diversi modelli turbolenti. In generale, come riportato da Defraeye

*et al.* [20] le RANS, unitamente al modello turbolento SST  $k - \omega$  model, risultano preferite nelle applicazioni pratiche per il loro ottimo rapporto costi benefici. Infatti, nonostante l'approccio LES permetta non solo di sovraperformare i risultati degli altri modelli computazionali, ma anche di ottenere informazioni aggiuntive circa la tempo-dipendenza del flusso, esso risulta essere assai più dispendioso per l'elaboratore (da 5 a 15 volte a seconda del modello turbolento implementato con le RANS). Considerazioni simili sono riportate anche da Blocken [12] il quale afferma che, nonostante le mancanze, le RANS stazionarie sono molto ancor'oggi (2015) molto utilizzate, come riportato in letteratura specifica di fisica urbana e ingegneria del vento, nonostante l'applicazione dell'approccio LES stia subendo un incremento e risulti essere intrinsecamente superiore sia alle RANS sia alle URANS, permettendo invero di tenere in considerazione sia l'instazionarietà sia l'anisotropia della turbolenza. Questo è dovuto, secondo Blocken, sia al maggior costo computazionale di LES, che può variare da un minimo di un ordine di grandezza fino a due ordini se si considerano le azioni necessarie per la verifica e la validazione, sia alla mancanza di confidenza del mondo industriale, la quale consegue alla scarsità di applicazioni pratiche e linee guida, invece assai presenti per le RANS. A tal proposito, Blocken [12] citando Bechmann *et al.* [21], scrive:

”...the wind industry will in any case be reluctant to switch to more sophisticated methods if they have not verified and validated. Until then, the use of LES for terrain flows will mostly be limited to single-case studies and not used as a standard tool.”

### 2.3 Confronto fra simulazione computazionale e approccio sperimentale

L'approccio sperimentale all'ingegneria del vento risulta essere, in termini economici, particolarmente dispendioso, prevalentemente in virtù del fatto che esso richiede delle strutture, quali gallerie del vento (WT) o canali d'acqua, nei quali condurre fisicamente le esperienze di interesse, che possono assorbire una assai notevole quantità di risorse. In Meroney [13] viene riportato come i più grandi dispositivi di questa tipologia possano avere un costo dell'ordine di milioni di dollari e, a differenza della metodologia computazionale, si riscontri una costanza o, addirittura una crescita dei prezzi, con l'avanzamento degli anni. Per contro l'approccio CFD si rivela essere molto più economico, sebbene non sia da trascurare la spesa per gli elaboratori, il cui costo per unità si è tuttavia ridotto negli anni, l'enorme potenza energetica necessaria per il funzionamento degli stessi e soprattutto per il

raffreddamento dei locali che li ospitano, le risorse necessarie allo sviluppo dei software.

Le strutture utilizzate dalla EFD si comportano come *elaboratori analogici* [13], dotati di una sensibilità infinitesima e di una memoria prossima all'infinito. L'utilizzo di fluidi reali assicura la separazione e la formazione delle strutture di flusso, le equazioni di conservazione sono automaticamente implementate, prive di qualsivoglia forma di approssimazione od errore. Vi sono tuttavia delle limitazioni insite in questo approccio. I fenomeni che coinvolgono scale spaziali maggiori di quelle delle WT a disposizione non possono essere testati in laboratorio, così come tutte quelle situazioni per le quali non è possibile riprodurre similarità. Queste problematiche potrebbero essere superate con la sperimentazione in ambiente, priva di riduzioni in scala e lontana dall'ambiente comunque artificiale della galleria del vento. In questo modo, tuttavia, utilizzato ad esempio nell'esperienza al Manchester Velodrome [23], vengono introdotte delle nuove fonti di incertezza, quali la mancanza di completo controllo sulle condizioni aerodinamiche della corrente, la stretta dipendenza dalle condizioni meteorologiche e la scarsa ripetibilità dell'esperienza. Inoltre questa metodologia, talvolta denominata *in situ*, è raramente utilizzabile in fase di progettazione.

La CFD permette di risolvere molte delle criticità che caratterizzano l'approccio EFD. Infatti il metodo computazionale, applicato all'ingegneria del vento, possiede l'immenso vantaggio di non essere limitato dalla necessità di soddisfare le condizioni di similarità dei parametri adimensionali, permettendo dunque di simulare molte più situazioni rispetto a quelle che sono disponibili ad essere studiate con la EFD. In aggiunta, tramite la simulazione computazionale, è possibile sia studiare modelli in dimensione reale, sia in dimensione scalata. A tal proposito, tuttavia, Blocken e Toparlar [29] e Blocken *et al.* [31], asseriscono di aver rilevato, nelle proprie esperienze, i medesimi risultati. Inoltre, i dati ottenuti sono del tipo *whole-flow field data* [14], ovvero l'approccio computazionale permette di ottenere informazioni contemporaneamente in ogni punto del dominio, assai differente dalla rilevazione con sensori tipica dell'EFD, la quale obbliga a rilevare dati soggetti sia ad una discretizzazione nella scala temporale, sia nella scala spaziale. Infine, è garantito il completo controllo sulle condizioni della corrente aerodinamica. Tutti questi vantaggi, inizialmente, hanno indotto alcuni ricercatori all'illusione che la simulazione computazionale rappresentasse la soluzione che avrebbe soppiantato in maniera totale la metodologia sperimentale, salvo poi accorgersi dell'inesattezza di questa affermazione [13]. Per questo motivo Stathopoulos [15] evidenzia la necessità di un'analisi critica dei risultati ottenuti con l'approccio computazionale, studio che deve essere condotto con riferimento ad apposite ed appropriate esperienze in galleria del vento. Egli,

inoltre, mette in guardia gli utilizzatori della metodologia CFD dal possedere nulle o scarse conoscenze di fluidodinamica e calcolo numerico, in quanto senza queste basi sussiste un elevato rischio di accettare passivamente le informazioni estratte dall'elaboratore.

La maggior difficoltà dell'approccio computazionale risiede nella moltitudine di scelte che devono essere compiute dall'utilizzatore e che impattano significativamente sui risultati [12]. La griglia computazionale è uno di questi parametri, considerato il tallone d'Achille di molte simulazioni; prestare superficiale attenzione ad essa può portare a risultati meno precisi e/o a problemi di convergenza. Un altro fattore da scegliersi è la forma approssimata delle equazioni da implementare ed il modello turbolento da associare ad esse. Infatti, come riportano Defraeye *et al.* [20], non esiste alcun modello turbolento che sia accurato per tutte le tipologie di flussi. Ulteriori variabili sono il dominio computazionale, le condizioni al contorno, i criteri di convergenza...[16]. Inoltre, come affermato da Hanna [12], più la formulazione del modello matematico cresce in complessità, più le incertezze dei dati in ingresso e del modello possono degradare la performance del codice. Questa consapevolezza si è tradotta negli anni in numerosissimi tentativi di validazione degli algoritmi, sia tramite esperienze di laboratorio sia tramite prove sul campo. Ne sono risultate una serie di linee guida di interesse internazionale. A mero titolo esemplificativo e non esaustivo, nel 2000 uno speciale gruppo di lavoro della ERCOFTAC (European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion) ha pubblicato una serie di linee guida utili per gli utilizzi industriali della CFD; successivamente Menter *et al.* [12] hanno pubblicato altre istruzioni, basate su quelle della ERCOFTAC, modificate appositamente per la validazione dei codici CFD. Di particolare interesse anche il lavoro svolto da Tamura *et al.* [12] poichè contenente linee guida anche per le equazioni LES, differentemente dalla maggior parte del materiale disponibile in letteratura.

## 2.4 L'approccio ibrido di Meroney

L'importanza dell'approccio ibrido di Meroney, i cui vantaggi egli stesso sottolinea, ad esempio, in Meroney [13], sono riconosciuti anche da Blocken [16] e Blocken *et al* [31]. Agli albori della CFD, coloro che proponevano l'approccio computazionale erano in forte contrasto con i sostenitori della fluidodinamica sperimentale. Secondo i primi, infatti, la strada era ormai segnata e il tempo avrebbe portato al completo superamento del metodo maggiormente datato. A distanza di diversi decenni, tuttavia, nonostante il miglioramento delle tecniche numeriche e la verifica anno per anno della *Legge di Moore*, questa situazione non si è ancora verificata. Questo è legato al

fatto, prevalentemente, che la conoscenza teorica dei fenomeni aerodinamici, in particolar modo del problema della turbolenza, non si è sviluppata di pari passo con gli elaboratori [22], richiedendo dunque la valutazione sperimentale dell'affidabilità dei risultati numerici ottenuti. Le medesime considerazioni possono essere trovate in Stathopoulos (1997) [15], il quale collega il persistere di costosi esperimenti ad una serie di motivazioni, tra le quali l'incapacità di modellare fenomeni complessi che coinvolgano la turbolenza, la sfida aperta della coesistenza di diverse scale spaziali e temporali in un singolo problema di carattere aerodinamico, il fatto che gli immensi passi in avanti della potenza degli elaboratori non siano accompagnati da altrettanto importanti sviluppi del calcolo numerico. Egli afferma che:

It appears that although CFD is definitely a good friend of wind engineering, it has not yet become a true ally.

L'approccio ibrido descritto da Meroney supera l'antica divergenza fra CFD e EFD ed abbraccia l'idea che la combinazione dei due approcci permetta di sfruttare al massimo le loro potenzialità, limitando tempi e costi e permettendo di sopperire agli svantaggi ora dell'uno, ora dell'altro. In particolare egli afferma che questa nuova procedura permette di utilizzare i vantaggi di un antico strumento, ormai ottimamente noto e validato, e, al contempo, la velocità e la convenienza economica delle nuove tecnologie. Ad esempio, nello studio di un problema di WE, la modellazione sperimentale può raccogliere dati che vengono successivamente implementati per realizzare un modello CFD, permettendo di risparmiare tempo e denaro, dal momento che la costruzione del modello non ha inizio da zero, ma coloro che se ne occupano posseggono già delle indicazioni di massima provenienti dalla prima fase sperimentale. A questo punto è possibile sondare, sfruttando la plasticità dell'approccio tecnologico, le soluzioni alternative, per successivamente perfezionare la procedura sperimentale. Si ottiene dunque un modello fisico dal quale ottenere dati assai approfonditi e un modello CFD, ora ben validato, per estendere le conclusioni ottenute ad una serie di casi simili. Meroney sottolinea come sia profondamente errato immaginare di sbarazzarsi e abbandonare completamente la metodologia EFD, in quanto l'unione sinergica dei due approcci è caratterizzata da un potenziale di notevolissimo livello. Questo, ovviamente, richiede una maggior competenza e interdisciplinarietà da parte dell'utilizzatore, il quale dovrà possedere conoscenze tali da saper analizzare in maniera critica sia i risultati provenienti dalla simulazione CFD, sia dall'approccio EFD, nonostante le competenze specifiche possano poi essere ripartite fra i diversi membri del gruppo di lavoro. A tal proposito *Meroney* [13] afferma:

Good mental health in a fluid or numerical modeler is always indicated by the presence of a suspicious nature, cynicism and a “show me” attitude.

Queste idee dovrebbero essere tenute in altissima considerazione negli ambienti accademici, trasmesse alle generazioni di studenti ed ingegneri, nonché diffuse in tutte le discipline scientifiche; il progresso inteso come processo di miglioramento di quanto esistente, portando in eredità ogni beneficio quest’ultimo ancora possega, e non come oblio e cancellazione di quanto è già stato, mossi dall’arroganza e dalla presunzione di essere certamente migliori di chi ci ha preceduto.

### 3 Aerodinamica dei corpi tozzi

In questo capitolo viene analizzato il flusso attorno ad un cilindro e a due cilindri allineati, valutando soprattutto gli effetti sul coefficiente di resistenza aerodinamica  $C_D$ , effettuando infine una breve digressione sul legame che essa presenta con la rugosità superficiale, al variare del numero di Reynolds ( $Re$ ).

Osborne Reynolds fu il primo esperto di fluidodinamica a riscontrare che le forze aerodinamiche che agiscono su di una struttura sono funzione della geometria della stessa e di alcune caratteristiche del fluido, quali la sua velocità asintotica e la viscosità, e definì a tal proposito un parametro adimensionale che porta il suo nome [1]. Il numero di Reynolds,

$$Re = Ud/\nu$$

che sarà più volte citato, è calcolato, allo scopo di questo capitolo, utilizzando come grandezze di riferimento il diametro del cilindro  $d$  e la velocità della corrente uniforme  $U$ . L'interazione fra flusso e cilindro per bassi valori di  $Re$  viene trattata brevemente, poichè di scarso interesse nell'ambito ciclistico, essendo  $\nu$ , il coefficiente di viscosità cinematica dell'aria, dell'ordine di  $10^{-5}$ , le velocità caratteristiche di una gara ciclistica a cronometro (*time trial*) di circa 50 km/h e le dimensioni del corpo e degli arti inferiori di un essere umano dell'ordine di  $10^{-1}$  metri.

Il cilindro rappresenta ottimamente il caso di un corpo tozzo, come viene generalmente modellato il corpo di un ciclista [26], prestandosi dunque a fungere da base teorica per l'oggetto del presente articolo.

### 3.1 Cilindro isolato

L'interazione aerodinamica fra la corrente ed il cilindro, come precedentemente annunciato, è fortemente influenzata dal numero di Reynolds.

Il flusso che si viene a formare quando una corrente aerodinamica di velocità indisturbata  $U$  investe un cilindro circolare, presenta simmetria fra monte e valle del corpo solamente per valori di  $Re$  prossimi all'unità. Infatti, già per numeri di Reynolds molto ridotti, dell'ordine di qualche decina, a valle del corpo il flusso presenta due vortici simmetrici controrotanti, la cui estensione è proporzionale a  $Re$ , fin tanto che il campo rimane stazionario. Secondo quanto riportato da Buresti [9], per  $Re$  maggiore di un determinato valore critico, che nel caso di cilindro a sezione circolare vale 47, il flusso evolve verso una condizione instazionaria e viene quindi a mancare la simmetria dei vortici, che separano dal cilindro in maniera alternata (*Scia di Von Karman*), secondo una ben fissata frequenza, non oggetto di questa trattazione.

Ad un ulteriore aumento del numero di Reynolds, in prossimità della parete del cilindro, si forma un sottile strato di flusso in cui elevati gradienti di velocità determinano una significativa resistenza d'attrito. La velocità, infatti, passa molto rapidamente da un valore nullo a parete (condizione di aderenza), a quello prossimo alla velocità della corrente indisturbata. In funzione di  $Re$ , lungo la parete del cilindro, avviene la separazione del flusso, il quale si stacca dalla superficie e concorre alla formazione di una scia turbolenta a valle del corpo. A tal proposito vengono identificati tre differenti regimi di flusso: il regime subcritico, caratterizzato da separazione laminare, il regime di transizione, con separazione laminare e possibilità di ri-attaccamento del flusso, con successiva separazione turbolenta, ed infine il regime postcritico, caratterizzato da separazione turbolenta, in quanto la transizione precede, in termini spaziali, la separazione, come riportato da Basu [2].

In regime di flusso subcritico,  $1500 < Re < 2 \times 10^5$ , le analisi sperimentali permettono di riscontrare l'avanzamento, dal bordo di fuga verso il bordo d'attacco, del punto di separazione, al crescere del numero di Reynolds. La separazione laminare del flusso avviene all'incirca per un angolo di  $80^\circ$  rispetto al punto di arresto frontale che, per cilindro non rotante, è individuato dall'intersezione fra la superficie del corpo e il vettore velocità  $V_\infty$ .

Per valori di  $Re$  maggiori di  $2 \times 10^5$ , il flusso attorno al cilindro subisce progressivamente notevoli variazioni. In regime di transizione ( $3 \times 10^5 < Re < 3 \times 10^6$  [3]), si riscontrano generalmente due compresenti tipologie di separazione: più in prossimità del bordo d'attacco quella di tipo laminare, più in prossimità del bordo di fuga quella turbolenta. Infatti, stanti opportune condizioni del campo di pressione, cioè se subito a valle della separazione il gradiente barometrico si riduce rapidamente, e dunque l'intensità dei vortici



controrotanti è debole, il flusso, ora turbolento, può ri-attaccarsi alla superficie del cilindro per successivamente separare. Si viene così a formare una regione compresa fra la separazione laminare e il riattacco turbolento, denominata *separation-reattachment bubble*. Da un punto di vista quantitativo i dati riportati da Tani [4] parlano di un angolo di separazione laminare di  $80-100^\circ$ , mentre di  $120-140^\circ$  per quella turbolenta, causa della maggior larghezza della scia conseguente a separazione laminare, rispetto a quella conseguente a separazione in regime di transizione o postcritico. Inoltre, è possibile che la bolla si venga a formare solo da un lato del cilindro, determinando asimmetria nel campo di pressione e la generazione di portanza anche per cilindri non rotanti [2]. Infine, quando la transizione precede la separazione, il flusso entra in regime postcritico.

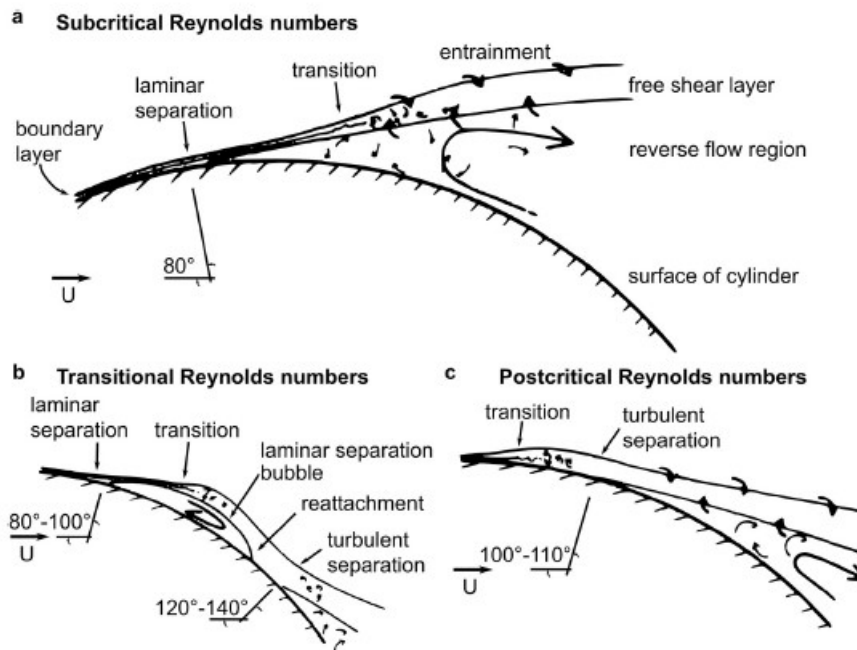


Figura 1: La struttura del flusso in prossimità del punto di separazione.

La sussistenza di differenti regimi per il flusso è correlata ad un differente comportamento del coefficiente di resistenza, tale per cui la resistenza aerodinamica

$$D = 1/2\rho U^2 C_D S$$

dove  $\rho$  è la densità del fluido,  $S$  la superficie di riferimento, da definirsi in relazione al caso in esame, e  $C_D$  il coefficiente di interesse. In regime subcritico, per valori di  $Re$  fino a  $10^4$ , il valore di  $C_D$  risulta essere pressochè invariante con il numero di Reynolds, ed un comportamento simile si può assumere in regime postcritico, anche se, in questo secondo caso, viene riscontrato un valore di  $C_D$  notevolmente inferiore. L'evidenza più interessante è il comportamento in regime supercritico. Nella maggior parte degli esperimenti condotti, infatti, è con queste caratteristiche del flusso che si rileva il minor valore del coefficiente di resistenza, passando rapidamente, con ridotti incrementi del numero di Reynolds, da un valore di 1,1 ad un valore di 0,3 [3]. Questo risultato è valido solamente per cilindri la cui rugosità superficiale risulti trascurabile, secondo le ipotesi di Prandtl e Von Karman [5].

### 3.2 Due cilindri allineati

La scia che si forma a valle di un cilindro isolato, in seguito all'interazione con la corrente aerodinamica, è profondamente differente da quella che si riscontra in presenza di un numero di corpi maggiore di uno [7], dal momento che si verificano dei fenomeni di interferenza fra i corpi ed il flusso; non solo le strutture del flusso vengono modificate rispetto al caso di cilindro isolato, ma possono formarsene di completamente nuove [10]. Due cilindri, di egual dimensioni, possono essere posizionati in svariati arrangiamenti, tuttavia è di notevole interesse in ambito ciclistico la disposizione allineata di un cilindro di seguito all'altro, sovente nota come "in tandem" - *When two cylinders face the flow one behind the other then they are in tandem arrangement* [10]. In queste condizioni i coefficienti aerodinamici, ed in particolare il coefficiente di resistenza, risultano essere proporzionali al rapporto  $L/d$ , dove  $L$  rappresenta la lunghezza del segmento congiungente i centri dei cilindri, mentre  $d$  il loro diametro.

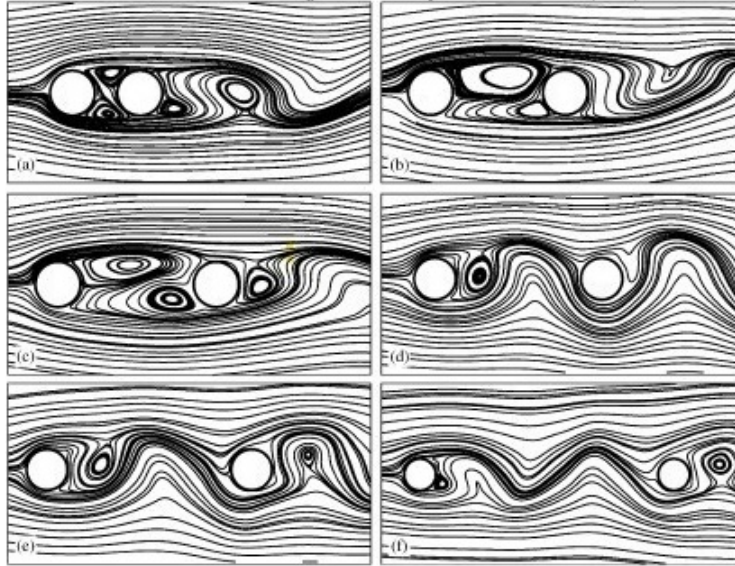


Figura 2: Linee di flusso per due cilindri allineati in una simulazione bidimensionale.  $L/D =$  (a) 1.5; (b) 3; (c) 3.5; (d) 4; (e) 5; (f) 8.

Biermann and Herrnstein [11] introdussero un coefficiente  $C_{D_i}$ , noto come *interference drag coefficient*, per valutare l'effetto della disposizione in tandem di due cilindri, limitatamente alla resistenza aerodinamica. Esso è definito come la differenza fra il coefficiente di resistenza misurato su uno dei due cilindri nel caso di disposizione in tandem e quello nel caso di cilindro isolato. Essi sperimentarono che per il cilindro di monte esso è nullo quando i due corpi sono a contatto, oppure a distanze maggiori di cinque volte  $d$ , e raggiunge un minimo per il valore di 3,5 volte il diametro. Un andamento differente venne riscontrato per il corpo di valle. Infatti, a contatto, il coefficiente di resistenza valutato sul secondo cilindro è negativo, e cresce rapidamente all'aumentare della spaziatura fra i corpi, fin tanto che non compare, all'incirca in corrispondenza della distanza di minima resistenza per il primo cilindro, un'improvvisa interruzione di tale crescita. Zdravkovich *et al.* [10] ipotizzarono che questo comportamento possa essere legato ad una qualche variazione nella struttura del flusso che avviene nella zona separante i due cilindri. Venne quindi analizzato il comportamento dei coefficienti di pressione nella zona compresa fra i due corpi,  $C_{pg}$  - *gap pressure coefficient* - e nella zona denominata afterbody or base region [9],  $C_{pb}$  - *base pressure coefficient*.  $C_{pg}$  assume il minimo valore quando i cilindri sono a contatto, cresce pressochè linearmente con la spaziatura dei corpi e subisce una brusca crescita, quasi di salto, in corrispondenza della spaziatura critica ( $3,5d$ ), superando per la prima volta  $C_{pb}$ . Questa seconda quantità, inizialmente, fino

ad una distanza di  $2d$  diminuisce, per poi crescere ad un tasso molto simile a quello del gap pressure coefficient. In corrispondenza della spaziatura critica subisce un salto verso valori di  $C_{pg}$  precedenti al salto di questo, per poi riprendere ad aumentare con la distanza fra i cilindri. La differenza  $C_{pg} - C_{pb}$  è proporzionale alla resistenza. L'andamento delle pressioni, dunque, determina quello della resistenza.

Inoltre, il coefficiente di resistenza sul cilindro di valle è fortemente influenzato dal numero di Reynolds [10]. Infatti, per ridotti valori di  $Re$ , non si riscontrano significative differenze fra i due cilindri, mentre il secondo riceve un notevole vantaggio, in termini aerodinamici, per alti valori di  $Re$ . In questa condizione la scia turbolenta generata dal cilindro di monte, investendo il corpo di valle, induce un regime supercritico attorno ad esso, permettendo alla resistenza di rimanere contenuta anche per notevoli spaziature.

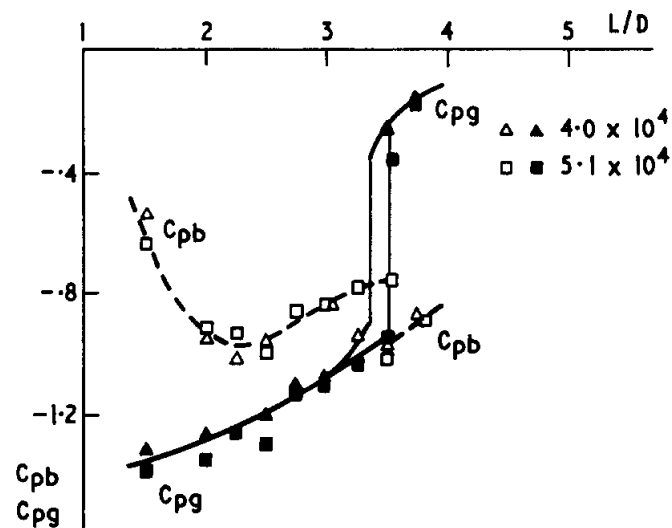


Figura 3: Base e gap pressure coefficient per il cilindro di valle.

### 3.3 Effetto della rugosità superficiale

La rugosità superficiale di un cilindro è considerata uno degli elementi di maggior disturbo che si possono riscontrare nelle applicazioni pratiche e che può notevolmente influenzare i principali regimi del flusso, divenendo causa dello spostamento della transizione verso differenti valori di  $Re$  e alla modifica, o scomparsa, di determinate strutture del flusso. Essa, a sua volta, è composta di due aspetti fondamentali, ovvero la forma delle scabrosità e la loro elevazione. Per quanto concerne il primo aspetto, Nikuradse compì degli

esperimenti sulla rugosità incollando delle particelle di sabbia, di dimensioni differenti, alle pareti di alcune tubazioni [2]. Successivamente, a partire dalle sue esperienze, venne definito il concetto di rugosità equivalente alla sabbia. Scabrosità di tipo piramidale vennero utilizzate da altri scienziati, quali ad esempio Achenbach e Heinecke [6]. La texture delle irregolarità è particolarmente influente ad elevati valori di  $Re$ . Vi sono applicazioni pratiche nelle quali è possibile modellare un corpo come liscio, mentre altre in cui è necessario considerare, ai fini del calcolo, la rugosità superficiale, che, nella realtà, è sempre presente su scala microscopica. Prandtl [5] scrisse che è possibile trascurare questo elemento quando le irregolarità della superficie sono confinate all'interno della regione in cui il flusso si presenta come laminare. Questo avviene certamente per ridotti valori di  $Re$ , mentre al crescere di questo parametro il flusso tende alla turbolenza e la scabrosità del corpo in esame non è più trascurabile. Ai fini dello studio dell'influenza della rugosità superficiale sulla resistenza che un cilindro sviluppa nell'interazione con la corrente indisturbata, è possibile individuare nelle irregolarità delle sorgenti di vorticità locale. A tal proposito Von Karman [5] scrisse che la scabrosità di una superficie diventa significativa quando le strutture vorticosi da essa generate raggiungono dimensioni confrontabili con quelle delle escrescenze.

Gli esperimenti condotti da Fage e Warsap (1929) [5] ottennero come risultato l'anticipazione della caduta di  $C_D$  a minori valori di  $Re$ , il ritardo nella generazione dello strato limite, con il conseguente spostamento in avanti della zona di separazione e l'aumento della resistenza del cilindro. Inoltre, per valori molto elevati di rugosità, riscontrarono l'invarianza della resistenza, una volta fissata la rugosità, con il numero di Reynolds. È importante notare che, a differenza di altri fattori, come la turbolenza della corrente indisturbata, la rugosità superficiale influenza direttamente solamente lo strato limite, mentre in maniera indiretta la restante porzione di fluido. Gli esperimenti condotti, successivamente, da Achenbach e Heinecke (1981) [6] permisero di osservare l'inibizione della formazione delle *separation-reattachment bubbles*, sia nella configurazione asimmetrica (solo una struttura), sia nella configurazione simmetrica, causando dunque la scomparsa dei regimi di flusso da esse caratterizzati, per valori di rugosità relativa superiore a  $r/D$  0.003 .

## 4 Effetti sulla resistenza aerodinamica del ciclista

Gli effetti di resistenza aerodinamica rappresentano la forza di maggiore intensità contro la quale ogni ciclista deve lottare e sviluppare potenza propulsiva. Essa infatti può costituire fino al 90% delle azioni dissipative durante una gara ciclistica che si svolge in piano ad una velocità di circa 54km/h [29]. Inoltre Wilson [27] afferma che il settore a maggior potenziale per il miglioramento della prestazione ciclistica è rappresentato dalla aerodinamica. Malizia *et al.* [26] riportano alcuni esempi di manifestazioni ciclistiche di interesse mondiale vinte per alcune frazioni di secondo, su scala temporale, o qualche centimetro, su scala spaziale. Questi eventi sono legati in buona parte, nel mondo professionistico, alle tecnologie utilizzate - dai vestiti, al manubrio, passando per il casco -, le quali garantiscono migliori prestazioni in termini di riduzione della resistenza aerodinamica avvertita dal ciclista. Numerose competizioni, tuttavia, sono organizzate in maniera tale per cui molti atleti gareggiano contemporaneamente e, mentre l'abbigliamento e la bicicletta vengono progettate per migliorare la prestazione del singolo ciclista, è necessario studiare l'interazione aerodinamica di più atleti per comprendere come minimizzare la resistenza aerodinamica durante gare ciclistiche di questa tipologia [38].

In questo capitolo verrà dunque trattata una delle innumerevoli sorgenti di riduzione del carico aerodinamico agente sul ciclista, ovvero la disposizione spaziale degli atleti in aria calma, durante una manifestazione sportiva. La riduzione di resistenza aerodinamica che ne consegue può essere determinante nella vittoria di una competizione e diversi articoli scientifici [26][29][30][31] sottolineano la mancanza di opportuna regolamentazione in questa direzione, in particolar modo per quanto concerne la presenza di veicoli (automobili e motociclette) durante le gare, le quali potrebbero favorire, con la propria disposizione spaziale, alcuni atleti e non garantire eguale vantaggio ad altri.

## 4.1 Ciclisti allineati: benefici aerodinamici

A cavallo fra la fine del diciannovesimo e l'inizio del ventesimo secolo già era conosciuto, sebbene in larga parte solamente grazie alla mera esperienza empirica, l'impatto della aerodinamica sulla performance ciclistica; ne è prova lo sviluppo in quegli anni di un'apposita aerodinamica progettazione delle biciclette e della loro componentistica, così come della posizione che l'atleta deve assumere in sella alla bicicletta [26]. In Malizia *et al.* [26] è anche riportata la definizione di una specifica disposizione spaziale che l'atleta può assumere rispetto agli altri concorrenti o veicoli presenti: "Si denota come *drafting cyclist* un ciclista che si trova nella scia di uno o più altri ciclisti, oppure nella scia di un veicolo, quale una motocicletta o una automobile." Invero, già oltre un secolo fa, era ben noto l'effetto di riduzione del carico aerodinamico avvertito dal ciclista, quando esso pedala in tale particolare disposizione. In Barry *et al.* [38] viene a tal proposito sottolineata l'estrema influenza della disposizione spaziale, di due ciclisti, sulla riduzione della resistenza aerodinamica avvertita dagli atleti coinvolti. Inoltre, in letteratura, è possibile reperire vari articoli scientifici i cui autori hanno indagato la medesima materia, differenziandosi per il numero di ciclisti considerato; a titolo esemplificativo Blocken *et al.* [32] hanno approfondito lo studio della disposizione in tandem di un numero di atleti variabile da 2 a 9; Blocken *et al.* [25] hanno analizzato la distribuzione del carico aerodinamico all'interno di un gruppo di 121 ciclisti, Shirasaki *et al.* [24] differenti distribuzioni spaziali di quattro atleti. I ciclisti, in posizione allineata uno dietro l'altro, configurazione sovente nota come *in tandem*, indipendentemente dal numero di atleti coinvolti, si differenziano sostanzialmente in un atleta in posizione avanzata, il quale avverte la maggior resistenza aerodinamica, nonostante sia leggermente inferiore rispetto a quella riscontrata da un ciclista isolato, e uno o più ciclisti *a ruota*, i quali, poichè disposti posteriormente al primo ciclista, beneficiano di una significativa riduzione della potenza propulsiva necessaria all'avanzamento della bicicletta. In questo paragrafo vengono dunque analizzate le due situazioni appena descritte seguendo la medesima storia delle scoperte scientifiche. Ne consegue che vengono inizialmente trattati i benefici degli atleti posti posteriormente e successivamente la situazione del primo atleta.

Gli studi concernenti i benefici aerodinamici conseguenti alla schermatura di buona parte del flusso d'aria, da parte di un elemento posto anteriormente, sia esso un ciclista o un generico corpo tozzo, pur riportando risultati numerici leggermente differenti fra loro, sono concordi nell'assicurare che all'aumentare della distanza longitudinale di separazione fra i due ciclisti, coerentemente con gli studi condotti sui corpi tozzi, contigui, diminuiscono i vantaggi in ter-

mini di resistenza aerodinamica. Il beneficio di riduzione del carico avvertito è dunque massimo quando i corpi sono fra loro a contatto, mentre tende a zero quando la distanza di separazione diventa significativa. Nello specifico, Fitton *et al.* [23], citando il lavoro di Olds, affermano che tale distanza, considerando la presenza di soli due ciclisti, è dell'ordine di tre metri. In ogni caso, in aria calma, questi vantaggi possono essere ancora intesi anche per spaziature di qualche decina di metri, in funzione della dimensione del corpo in prima posizione, come descritto da Blocken *et al.* [30]; al contrario, in condizioni di vento laterale (*crosswind*), la degradazione degli effetti benefici viene, in termini spaziali, assai anticipata, anche in presenza di deboli brezze [37]. Inoltre, sia in Barry *et al.* [38], sia in Shirasaki *et al.* [24], viene affermato che la separazione laterale sia ancor più determinante di quella longitudinale; l'allineamento con il ciclista davanti è quindi fondamentale per sfruttare al massimo i benefici di tale configurazione. Questi risultati sono in perfetto accordo con quanto studiato circa l'interferenza aerodinamica di due cilindri [36].

Barry *et al.* [38], l'importanza e valore del cui lavoro è sottolineata anche in Fitton *et al.* [23], hanno realizzato un'esperienza sperimentale in galleria del vento, utilizzando un ciclista reale ed un manichino, entrambi equipaggiati di apposito vestiario a manica lunga e di un casco aerodinamicamente progettato. Essi, inoltre, sono entrambi in posizione TT. La bicicletta, tipica da competizioni professionistiche a cronometro, monta entrambe le ruote aperte e fisse. La velocità simulata, di 65 km/h, è superiore a quella più spesso riscontrata in letteratura, che si aggira attorno ai 50 km/h, ed è tipica non di una competizione ciclistica in ambiente aperto, ma all'interno di un velodromo. Il massimo beneficio riscontrato è una riduzione del 49% della resistenza aerodinamica avvertita, rispetto al caso di ciclista isolato, quando la distanza è pressochè nulla, e di ancora oltre il 40% quando essa è di 700mm. A tal proposito la distanza tipica, per atleti professionisti, è compresa fra 100 e 200mm. In Belloni *et al.* [37] alla distanza di un metro è ancora del 38%.

Blocken *et al.* [17] riportano di un'altro fattore rilevante per la riduzione della resistenza aerodinamica avvertita dai ciclisti a ruota. Essi infatti hanno analizzato la configurazione di due ciclisti, in sella alla bicicletta in tre differenti configurazioni: posizione upright (UP), posizione dropped (DP) e posizione TT, visibili in Figura 4. La posizione che garantisce il maggior beneficio aerodinamico, a parità di separazione longitudinale, è la posizione upright, che risulta essere al contempo quella meno avviata aerodinamicamente. Essa garantisce un beneficio, in termini di riduzione della resistenza aerodinamica, ad una distanza praticamente nulla di 0,01m, del 27,1%; quattro punti percentuali maggiore rispetto alla DP (23,1%) e circa tredici rispetto alla TT (13,8%). Questo andamento è legato al fatto che la UP



si caratterizza per una maggior area frontale; nelle esperienze di Blocken *et al.* [17] le aree frontali sono rispettivamente 0.41, 0.37 e 0.34m<sup>2</sup>. A queste considerazioni consegue il fatto che la posizione upright offra, agli atleti che seguono, il miglior scudo contro la corrente aerodinamica. Risulta quindi fondamentale tenere in considerazione, durante le gare ciclistiche di squadra, che la posizione aerodinamicamente migliore per il singolo generalmente non corrisponde con quella che comporta il massimo beneficio per l'intero team [35]. Considerazioni analoghe si trovano anche in Defraeye *et al.* [35] e in Fitton *et al* [23].

In Belloni *et al.* [37] sono riportati i risultati di alcuni studi precedentemente compiuti, tra i quali anche quelli analizzati pocanzi. I risultati di Kyle (1979), di Edwards and Byrnes (2007), di Barry (2013) e dello stesso studio compiuto dal gruppo di ricerca di Belloni sono abbastanza concordi nell'affermare che il vantaggio aerodinamico del ciclista a ruota è compreso fra il 40 e il 50% di riduzione della resistenza, per distanze di separazione fino ad un metro. I risultati di Blocken, invece, risultano essere molto inferiori a quanto riscontrato dagli altri ricercatori, dovendo tuttavia considerare il fatto che essi si riferiscano al solo corpo del ciclista, avendo sottratto la componente relativa alla bicicletta. L'andamento decrescente con la distanza è presente in tutti gli studi e il tasso di decrescita anomalo, intendendo con questo termine la discordia con quanto ottenuto dalla maggior parte dei ricercatori, è ancora una volta quello di Blocken, che risulta leggermente inferiore. Circa la variabilità di questi risultati, Fitton *et al.* [34], fornendo una più che verosimile spiegazione a tale andamento, affermano:

The large variability of the results in the literature suggests that position, equipment, cyclist quality and location (inside, outside, velodrome, straight flat, etc.) may all significantly influence the actual aerodynamic drag savings experienced by the first trailing rider.

Nell'articolo di Fitton *et al.* [23] sono riportati i risultati che gli autori hanno ottenuto dallo studio di una squadra composta di sei cicliste di sesso femminile, di differente statura, pedalanti all'interno di un velodromo. Nello specifico il loro studio ha valutato che allorquando un'atleta più leggera e di statura minuta ne segue a ruota una di corporatura più massiccia, può avvertire una ulteriore diminuzione della resistenza aerodinamica del 6% rispetto alla opposta configurazione. Nelle competizioni ciclistiche a squadre è molto agevole controllare e scegliere la disposizione degli atleti nella configurazione in tandem. Infatti, mentre gli avversari cercheranno sempre di sfruttare la riduzione del carico aerodinamico avvertito pedalando nella scia

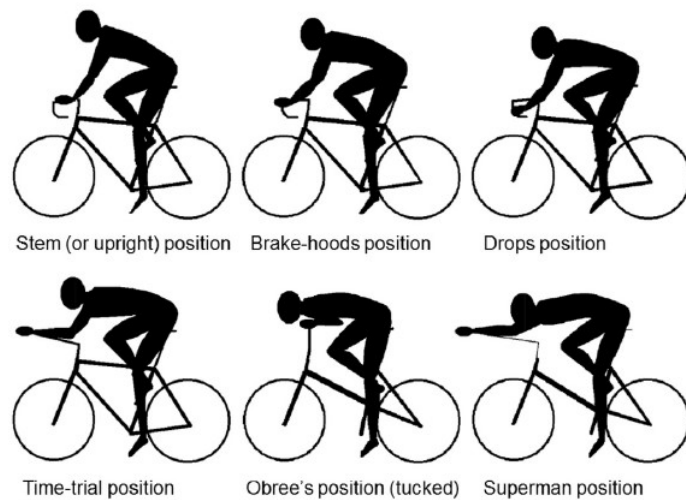


Figura 4: Posizioni ciclistiche utilizzate oggi nelle competizioni, insieme alla posizione di Obree e a quella detta di Superman. Queste ultime due furono utilizzate nelle competizioni a cronometro negli anni 90 e successivamente vietate.

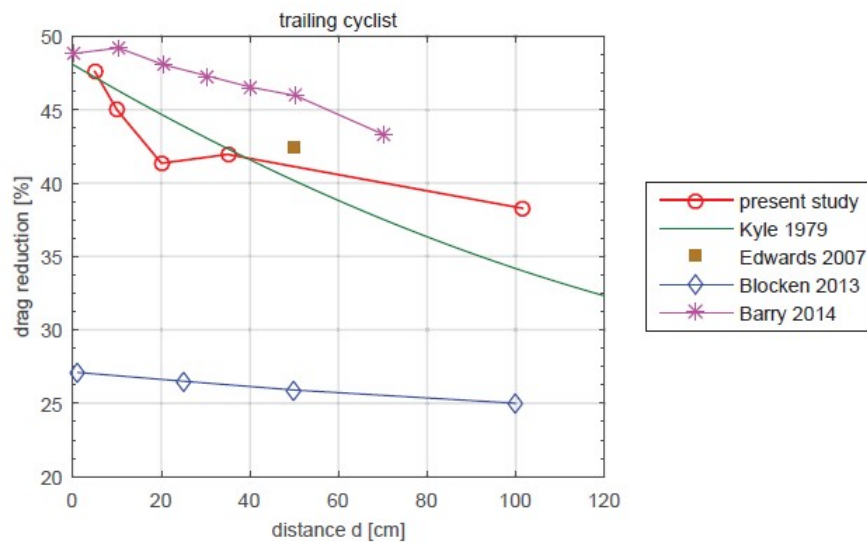


Figura 5: Riduzione della resistenza aerodinamica per il ciclista in seconda posizione, in funzione della distanza dal ciclista avanti.

di un concorrente loro rivale ed è logico aspettarsi che ogni atleta gareggi per se stesso, la forza della squadra è proprio quella di ottenere la miglior performance possibile per i propri atleti. In questo tipo di gare ciclistiche, dunque, risulta molto vantaggioso sfruttare gli studi compiuti [17] [23] [35] e disporre gli atleti in virtù della loro massa ed altezza, dal momento che è ora dimostrato che i benefici del pedalare allineati longitudinalmente sono funzione delle caratteristiche fisiche dell'atleta e dunque della loro sequenza [23]. Il gruppo di ricerca di Defraeye [35], invece, ha compiuto la propria esperienza avvalendosi della simulazione computazionale, con una configurazione di quattro ciclisti; tre di questi atleti hanno statura molto simili, il quarto maggiore di tutti. I risultati ottenuti sono in linea con quanto già riportato da Blocken e Fitton: il massimo vantaggio aerodinamico, per un drafting cyclist, si riscontra quando esso è di statura minore rispetto all'atleta che lo precede. Inoltre, nella configurazione di quattro ciclisti analizzata, l'intera squadra trae beneficio dal posizionamento dell'atleta di maggior statura in prima o seconda posizione, poichè la resistenza aerodinamica dell'intera squadra risulta essere minore rispetto alle configurazioni che vedrebbero il succitato ciclista in ultima o penultima posizione.

Infine, l'ultimo aspetto da considerare è la numerosità dei ciclisti allineati. Infatti, come la distanza di separazione e la corporatura dei ciclisti, anche quest'aspetto è significativo e gli studi compiuti hanno fornito dei risultati non scontati. Infatti, differentemente da quanto si potrebbe intuitivamente ipotizzare, non sempre il maggior beneficio aerodinamico è avvertito dall'ultimo ciclista. In aggiunta, è poco saggio un allineamento assai numeroso di atleti, dal momento che quando essi diventano più di una decina la configurazione che garantisce la miglior performance aerodinamica è quella del *cycling peloton*. In Íñiguez-de-la Torre and J Íñiguez [33] viene asserito che viaggiare nella scia di oltre cinque ciclisti in tandem non permette di ottenere ulteriori significativi decrementi di resistenza aerodinamica. Questo perchè, mentre inizialmente, per la seconda e terza posizione, la riduzione del carico aerodinamico avvertito è molto brusca in confronto a quanto percepito dal primo atleta, successivamente il beneficio aerodinamico tende ad assestarsi e a crescere con dei tassi pressochè nulli. Blocken *et al.* [32], i quali hanno studiato la disposizione in tandem di un numero variabile di atleti, da 2 a 9, essendo questa la numerosità tipica delle gare ciclistiche a cronometro, di squadra, forniscono una spiegazione a questa situazione. La scia generata dal primo ciclista cresce in larghezza ed altezza fino all'atleta numero 5 o 6, poi le dimensioni raggiunte rimangono all'incirca costanti, così come le alterazioni del campo di pressione. Ne consegue che per le posizioni ancora più al fondo, il vantaggio aerodinamico non aumenta. In aggiunta, a causa del *subsonic upstream disturbance* - che sarà descritto nella seconda parte del paragrafo

- , che si combina con l'andamento delle caratteristiche della scia appena descritte, fino a cinque ciclisti il massimo vantaggio è detenuto dall'ultimo atleta, mentre da sei a nove da un atleta in posizione più avanzata, traendo questi beneficio dalla presenza di uno o più altri atleti dietro di lui.

Ad una realistica distanza di 15cm fra i ciclisti allineati, per una configurazione di nove atleti, il massimo beneficio aerodinamico è detenuto dal 7° ciclista, che avverte una resistenza aerodinamica pari al 40,7% di quella del ciclista isolato; il gruppo avverte una resistenza media del 51,1%. Blocken *et al.* [32] hanno utilizzato questi dati per espandere la simulazione numerica ad un numero molto maggiore di ciclisti, e confrontarli con i dati raccolti da Blocken *et al.* [25] nel caso di un gruppo di 121 ciclisti, i cui atleti avvertono una resistenza media del 21,1% nella disposizione densa e del 21,9% in quella rarefatta, rispetto al caso di ciclista isolato. La conclusione è che la disposizione in un cycling peloton può garantire un beneficio anche doppio rispetto al caso di una lunga e numerosa fila di ciclisti, ed è quindi da preferirsi quando la numerosità degli atleti diventa importante.

Dal punto di vista fluidodinamico i vantaggi derivanti dal pedalare nella scia di un altro veicolo sono conseguenti alle modificazioni nel campo di moto e di pressione che si sviluppa attorno agli atleti. Nello specifico è quanto accade nella regione di spazio frontale ad essi ad essere rilevante, in quanto gli studi compiuti fin'ora suggeriscono che quanto accade nella scia a valle dell'atleta di interesse provochi, ai fini della riduzione del carico aerodinamico avvertito, degli effetti trascurabili. Il ciclista a ruota, trovando rifugio nella protezione offerta dall'atleta che lo precede, incontra davanti a sé un flusso aerodinamico caratterizzato da un minore livello energetico e da una diminuita pressione, rispetto a quella del caso di ciclista isolato. Questa considerazione è riportata da Barry *et al.* sia in [34], dove l'approccio utilizzato è di tipo computazionale, sia in [36], nel quale, invece, l'analisi è di tipo sperimentale e viene condotta su modelli in scala 1:7 avvalendosi di un apposito canale d'acqua. In Barry *et al.* [36] e in Blocken *et al.* [17], tuttavia, è riportato che la presenza di un atleta davanti non solamente diminuisce il valore della sovrappressione di fronte al drafting cyclist, ma anche il valore assoluto della depressione sulla schiena di quest'ultimo. Dunque, rispetto a quanto riportato in [34], viene evidenziata una discreta influenza, sulla riduzione del carico aerodinamico, di quanto accade a valle dei ciclisti.

La scia nella quale si trova immerso il ciclista presenta, forse sorprendentemente [34], delle strutture di flusso molto simili a quelle del ciclista isolato. La scia di quest'ultimo, infatti, è prevalentemente composta di due coppie di vortici controrotanti: la prima si separa dalle anche, la seconda dalla parte interna della coscia [26]. Non è quindi logico pensare che siano le modificazioni delle strutture di flusso a valle dell'atleta ad essere la sorgente di










<b>d = 0.15 m</b>										
100%										AVG: 100%
98.0%	64.4%									AVG: 81.2%
97.7%	62.2%	52.2%								AVG: 70.7%
97.6%	61.8%	50.2%	46.6%							AVG: 64.1%
97.5%	61.7%	49.8%	44.7%	44.3%						AVG: 59.6%
97.5%	61.6%	49.7%	44.3%	42.6%	43.3%					AVG: 56.5%
97.5%	61.6%	49.6%	44.2%	42.2%	41.7%	42.7%				AVG: 54.2%
97.5%	61.6%	49.6%	44.1%	42.0%	41.3%	41.1%	42.3%			AVG: 52.4%
97.5%	61.6%	49.6%	44.1%	42.0%	41.1%	40.7%	40.8%	42.0%		AVG: 51.1%

Figura 6: Resistenza di ogni ciclista, espressa percentualmente in funzione di quella del caso isolato. Distanza longitudinale di separazione 15cm. Nella colonna di destra la resistenza media dell'intero alleamento.

riduzione della resistenza. Una ulteriore conseguenza della operazione di *drafting* è che la scia del ciclista presenta una minor intensità della vorticità, il cui picco risulta diminuito, in funzione della posizione dei pedali e della distanza di separazione dal ciclista che precede, fino al 52%. Essa è inoltre caratterizzata da una riduzione nel valore della velocità media nella direzione del moto. Barry *et al.* [34], tuttavia, escludono che l'intensità di queste variazioni sia tale da poter essere alla base della significativa minor resistenza aerodinamica avvertita dall'atleta di interesse, essendo questi parametri considerati sufficientemente trascurabili. Infine, la dipendenza dalla distanza di separazione è invece spiegata dalla possibilità del flusso di mescolarsi con la corrente indisturbata e recuperare progressivamente energia all'aumentare della spaziatura [36]. Infatti, avendo asserito che gli effetti di riduzione della resistenza aerodinamica sono legati al livello energetico della corrente che investe il ciclista, aumentando l'energia ad essa associata, viene ridotto di conseguenza il beneficio aerodinamico da esso derivante.

La trattazione sposta ora la propria attenzione nei confronti del ciclista in prima posizione, al quale gli articoli scientifici, quasi esclusivamente redatti in lingua inglese, si riferiscono con il termine di *leading cyclist*. Più volte presente, in letteratura, è la seguente citazione di Olds (1998) [17] :

“It has been suggested that riding close behind a leading cyclist will also assist the leading rider in that the low pressure area behind the cyclist will be “filled up” by the trailing rider.

Le successive ricerche, ad oggi molteplici in letteratura, hanno confermato questa ipotesi. Barry *et al.* [38] affermano che, sebbene questi effetti fossero noti, o quanto meno ipotizzati, da tempo, essi sono stati calcolati per la prima volta, tramite simulazione computazionale, da Blocken *et al.* (2011), e sperimentalmente nel 2014 dal suo proprio gruppo di ricerca. Inoltre, gli elementi che influenzano questo beneficio aerodinamico per il ciclista in prima posizione sono gli stessi trattati pocanzi in merito ai *drafting cyclist*, cioè la distanza di separazione, la posizione che gli atleti assumono in sella alla bicicletta e le loro caratteristiche corporee, la quantità di atleti in scia al primo. Come affermato da Olds, il beneficio aerodinamico in oggetto dipende dalla presenza di un ciclista nella propria scia, il quale, modificando il campo di moto e di pressione, determina gli effetti di interesse. Questo fenomeno è noto come *subsonic upstream disturbance*, in accordo con il fatto che, in regime subsonico, la generica perturbazione non propaga solamente a valle dell'oggetto fonte di disturbo, ma anche a monte dello stesso, in conseguenza del fatto che la velocità di propagazione (in condizioni standard il suono viaggia a circa 343 m/s) è maggiore di quella caratteristica del fenomeno in esame

(dell'ordine di 10-20 m/s). Certamente, in termini pragmatici, l'intensità di questi effetti è rilevante se la distanza di separazione è ridotta, oppure anche dell'ordine di qualche decina di metri, ma avendo in scia non un ciclista, quanto un veicolo, ad esempio una automobile, di dimensioni significativamente maggiori. La spiegazione fluidodinamica del beneficio avvertito dal leading cyclist è che la presenza di un corpo, che viaggia nella sua scia e ad egli prossimo, comporta l'interazione fra la regione di depressione dietro il leading cyclist e quella di sovrappressione davanti al drafting cyclist. A questa situazione, a sua volta, consegue la diminuzione, in valore assoluto, della depressione e quindi l'aumento della pressione dietro il primo atleta. Infine, essendo diminuita la differenza di pressione fra monte e valle del primo atleta, da definizione, diminuisce la resistenza aerodinamica che egli avverte [36].

In opposizione a quanto accade con i ciclisti a ruota, per il primo atleta la posizione che garantisce il maggior vantaggio in termini di riduzione della resistenza, è anche quella meglio avviata aerodinamicamente, la quale risulta essere, al contempo, caratterizzata dalla minor area frontale. Infatti, i risultati del già citato studio di Blocken [17], hanno rilevato, a distanza di separazione presocchè nulla, un vantaggio rispetto al caso di ciclista isolato del 2.6%, 1.7% e 0,8% per le posizioni TT, DP e UP rispettivamente. La spiegazione fornita è che, considerando un atleta isolato, la regione di sovrappressione diminuisce in altezza, ma aumenta in lunghezza, al crescere della aerodinamicità della posizione in sella alla bicicletta, avvicinandosi quindi al ciclista davanti e incrementando l'intensità dell'interazione. Altri studi, ad esempio quelli di Barry *et al.* [38] e di Íñiguez-de-la Torre and J Íñiguez [33], riportando di un beneficio aerodinamico fino al 5%, ma è da considerarsi, come succitato, l'estrema variabilità delle condizioni e il fatto che la ricerca di Blocken prende in considerazione i soli effetti del corpo del ciclista. L'andamento è descrescente con la distanza e diventa pressocchè trascurabile per valori della spaziatura dell'ordine di qualche metro. Infine, altra variabile che influenza il beneficio aerodinamico è il numero di ciclisti presenti nella scia, come descritto da Blocken *et al.* [32]. Infatti l'estensione e l'intensità della regione di depressione dietro il leading cyclist è decrementata man mano che vengono aggiunti atleti in scia, come mostrato in Figura 6.

## 4.2 Ciclista di interesse nella scia di un veicolo motorizzato

Secondo quanto riportato da Malizia e Blocken [26] i primi ad indagare sistematicamente i benefici aerodinamici del pedalare nella scia di un veicolo motorizzato furono Kyle e Burke (1984) e Kyle (1986), nonostante questi



Figura 7: Team Time Trial - Gara ciclistica a cronometro a squadre; si noti la presenza di altri veicoli

effetti fossero noti, all'atto pratico, nell'ambiente ciclistico. Infatti gli stessi autori citano le due emblematiche esperienze di Charles M. Murphy, il quale nel 1899 pedalò per un miglio in meno di un minuto sfruttando lo scudo dall'aria offertogli da un treno e di Paol Guignard, che nel 1909, pedalando dietro una matocicletta, riuscì a percorrere in un'ora una distanza pari a 101.623 km. Successivamente a Kyle, nel 1990, Hagberg e McCole pubblicarono degli articoli scientifici nei quali evidenziavano le proprie scoperte nell'ambito della medicina dello sport, applicata, nello specifico, al ciclismo. Essi infatti rilevarono che un ciclista isolato, pedalando a circa 40 km/h e posizionato a mezzo metro dietro un pick-up, consumava la stessa quantità di ossigeno tipica di un atleta che, nelle medesime condizioni, viaggia alla velocità di 27 km/h. Gli effetti di riduzione della resistenza aerodinamica, e conseguentemente di potenza propulsiva richiesta, quando un ciclista pedala nella scia di un veicolo, sono quindi ben noti.

In questo paragrafo viene specificatamente trattato il caso di ciclista che pedala allineato dietro una motocicletta. Si tratta di una situazione di particolare interesse. Una moltitudine di questi veicoli è infatti presente durante le competizioni ciclistiche, per le più disparate motivazioni: ospitare a bordo commissari di gara o giornalisti o personale medico, gestire il traffico, effet-



tuare fotografie e riprese video [31]. Inoltre solitamente accade, durante la competizione, che vi siano uno o più ciclisti dietro una motocicletta. Questa condizione si verifica talvolta perchè la ridotta dimensione della carreggiata non permette di disporsi altrimenti, talvolta perchè sono gli stessi atleti, ben consci dei benefici che ne derivano, a posizionarsi in scia alle motociclette. Infine, mentre le automobili sono solitamente posizionate posteriormente agli atleti [30], ed il cui caso viene infatti trattato nel prossimo paragrafo, le motociclette hanno maggiore libertà di movimento e sono autorizzate ad avvicinarsi agli atleti, sia anteriormente sia posteriormente, per effettuare riprese, salvo negli ultimi 500 m che precedono il traguardo. A tal proposito la normativa internazionale di riferimento (UCI) prevede, in base alla distanza, su scala temporale, fra un ciclista ed il successivo, quali e quante motociclette possono inserirsi nello spazio vuoto che intercorre fra i due atleti, ma non fa alcun riferimento alla distanza che questi veicoli devono mantenere dai ciclisti. A causa di queste lacune normative, il posizionamento reciproco fra ciclisti e veicoli può alterare significativamente il risultato della competizione [30]. Nonostante i benefici aerodinamici del pedalare dietro un veicolo siano maggiormente noti e più intuitivi rispetto alla riduzione di resistenza aerodinamica che consegue alla presenza di uno o più veicoli nella scia di un ciclista, è dunque di interesse pratico, per le precedentemente addotte motivazioni, anche lo studio di questa configurazione.

La ricerca condotta da Blocken *et al.* [30], relativamente ad un ciclista nella scia di una motocicletta, è stata svolta sia con l'ausilio della esperienza in galleria del vento, sia con l'approccio computazionale. Il ciclista è ipotizzato nella posizione TT, classica per le competizioni ciclistiche a cronometro. Egli veste un casco aerodinamicamente progettato e apposito vestiario a manica lunga. La bicicletta utilizzata è di tipo standard, per gare professionistiche a cronometro, con la ruota anteriore aperta e quella posteriore a disco, entrambe ferme; essa è inoltre equipaggiata con il manubrio utilizzato solitamente per questo tipo di manifestazioni ciclistiche. Essa è inoltre stata semplificata, rimuovendo alcuni dettagli quali, a titolo esemplificativo, la catena, gli ingranaggi del cambio, il cablaggio dei freni. La velocità reale ipotizzata è di 15 m/s, la temperatura dell'aria di 15 °C e la pressione pari ad una atmosfera. Viene assunta l'assenza di vento. Le geometrie dei modelli utilizzati in galleria del vento sono identiche a quelle utilizzate nella simulazione CFD, la quale è stata condotta in scala reale. Precedenti ricerche, in ambito molto simile [29] [31], hanno ottenuto identici risultati, tramite l'approccio computazionale, con modelli in scala ridotta e modelli in scala reale.

I risultati ottenuti in galleria del vento e con le RANS equations sono molto simili fino ad una distanza di circa 10 metri. Per distanze superiori la simulazione computazionale presenta un errore non trascurabile, a causa della

problematicità, nota in ambito ingegneristico [30], di predirre per eccesso la lunghezza della scia e sottostimarne l'intensità della velocità. Per distanze superiori ai 10 metri è quindi necessario, limitatamente all'approccio computazionale, ricorrere alle equazioni SAS. Per distanze molto ridotte, ad esempio 24 centimetri, che si verificano raramente durante le competizioni, il ciclista risulta essere totalmente avvolto dalla regione di depressione che si viene a creare a valle della motocicletta. Questa condizione garantisce all'atleta una riduzione del carico aerodinamico avvertito pari al 75%. All'aumentare della separazione longitudinale fra i due veicoli il beneficio diminuisce, ma tende a rimanere significativo anche per distanze importanti, dell'ordine di qualche decina di metri. Ad una distanza di 10 m si avverte un beneficio del 23%, ad una di 50 m del 7%, corrispondenti ad una riduzione, su scala temporale, rispettivamente di 5,4 e 1,6 secondi ogni chilometro pedalato. Dal momento che le competizioni ciclistiche a cronometro possono essere vinte anche per qualche secondo o frazione di secondo [31], i valori riportati nelle righe precedenti sono tutt'altro che trascurabili, nonostante la presenza di vento laterale possa pressochè annullare, per distanze oltre i trenta metri, i benefici aerodinamici. Secondo il parere di Blocken *et al.* [30], è dunque necessario migliorare la normativa esistente, cercando di limitare le situazioni in cui i ciclisti pedalano nella scia generata da un veicolo posto, a breve distanza, davanti ad essi.

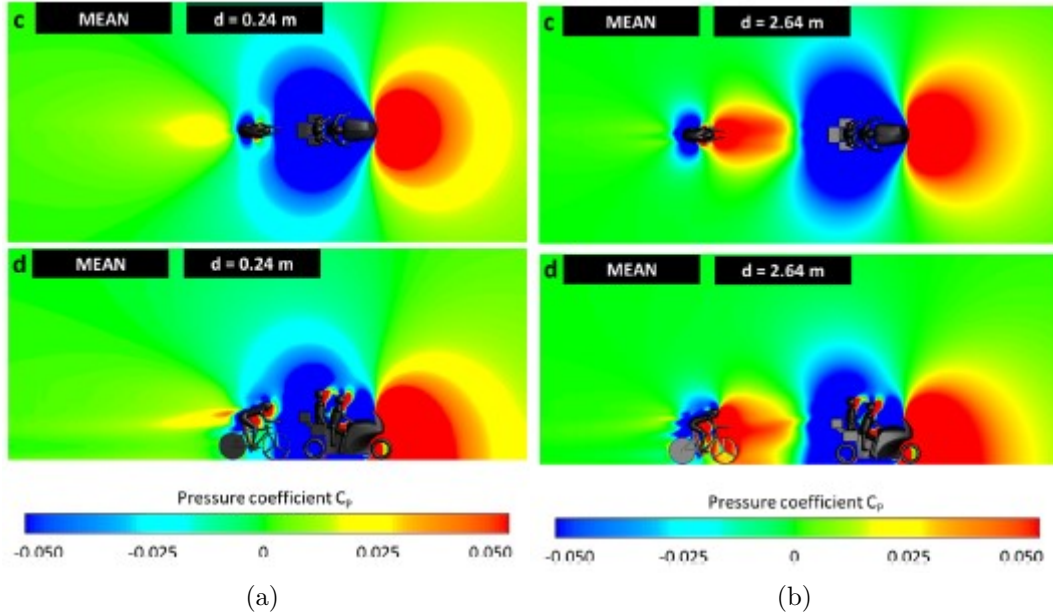


Figura 8: Rappresentazione grafica del coefficiente di pressione nel piano orizzontale ad una altezza dal suolo di 1 m e nel piano verticale ad una distaza di separazione (a) di 0.24m e (b) di 2.64m.

### 4.3 Veicolo motorizzato nella scia del ciclista di interesse

Come già riportato nel paragrafo precedente, la presenza di uno o più ciclisti che pedalano nella scia di un altro atleta comporta un beneficio, in termini di riduzione della resistenza aerodinamica avvertita, anche per l'atleta in posizione più avanzata. Blocken e Toparlar [29] e Blocken *et al.* [31] hanno approfondito lo studio di questo effetto nelle situazioni in cui, rispettivamente, un'automobile e da una a tre motociclette affiancate fra loro, si trovino nella scia generata da un ciclista. Risulta logico attendersi come risultato un ancor maggiore beneficio aerodinamico, data la maggior dimensione, rispetto ad una biciletta, sia della motocicletta, sia dell'automobile, grandezza che garantisce una zona di più alta pressione alle spalle del ciclista. Il verificarsi di queste situazioni non è per nulla raro, in quanto nelle gare a cronometro è quasi sempre presente almeno un'automobile dietro l'atleta (tipicamente una station vagon [29]), ad eccezione delle ultime centinaia di metri che precedono il traguardo. Inoltre numerose motociclette possono essere presenti, per fini sanitari, giornalistici e mediatici, di direzione della competizione, di gestione del traffico, di supporto al ciclista. Inoltre, per quanto riguarda le motociclet-

te è evenienza comune che più d'una si trovi nella scia del ciclista; Blocken *et al.* [31] citano casi in cui erano presenti quattro e sei di questi veicoli. L'Unione Ciclistica Internazionale (UCI) non ha adottato alcuna apposita norma al fine di prevenire questi benefici aerodinamici, disomogeneamente distribuiti fra gli atleti in gara, ma solamente una distanza di sicurezza di 10 m fra il ciclista ed il veicolo motorizzato alle spalle di esso [26], per altro sovente non rispettata e ritenuta un'insufficiente spazio di frenata [29].

Nell'esperienza di Blocken e Toparlar [29] il ciclista è ipotizzato nella posizione TT, classica per le gare a cronometro. Egli veste un casco aerodinamico, occhiali, guanti e un vestiario apposito a manica lunga. La bicicletta è del tipo standard, da gara professionistica, e monta un manubrio specifico per competizioni a cronometro, una ruota aperta anteriormente e una ruota a disco posteriormente, entrambe fisse. La velocità reale ipotizzata varia dai 5 ai 15 m/s e l'aria viene supposta in quiete; la velocità del flusso in galleria del vento è opportunamente scalata, per soddisfare le condizioni di similarità. Le medesime condizioni vengono utilizzate da Blocken *et al.* [31]. Entrambe le esperienze succitate utilizzano l'approccio computazionale avvalendosi delle RANS equations e del modello turbolento denominato standard  $k - \epsilon$ , sia in scala ridotta sia in scala reale, ottenendo i medesimi risultati; inoltre vengono messe a punto, ai fini della validazione, delle esperienze in galleria del vento, con modelli riprodotti in scala 1:4.

I ricercatori, sia in [29] sia in [31] hanno ottenuto dei risultati numerici leggermente inferiori con l'approccio CFD rispetto a quanto ricavato con la metodologia EFD, molto probabilmente come conseguenza delle leggere differenze geometriche nelle due diverse modellazioni. In ogni caso la coerenza dei risultati in entrambe le esperienze dimostra l'accuratezza sia del modello in galleria del vento, sia delle equazioni e delle condizioni al contorno implementate nella simulazione computazionale. Come è logico aspettarsi, per conoscenze pregresse, il caso di ciclista isolato presenta un valore di resistenza aerodinamica maggiore del caso di ciclista seguito da una, due o tre motociclette, oppure seguito da un'automobile. Questo vantaggio decresce con la distanza fra ciclista e veicolo ed è intrinsecamente legato al campo di pressione. Inoltre, risultato anch'esso atteso, la maggior dimensione dell'automobile, rispetto alle motociclette, garantisce all'atleta il beneficio di intensità più rilevante, a parità di distanza da esso. A tal proposito, tuttavia, è da notare che mentre una separazione longitudinale di 0,50 metri non è rara fra la bicicletta e la motocicletta che lo segue, al contrario, una tipica distanza da un'automobile è dell'ordine di almeno 5 metri [31]. In Figura 9, tratta da Blocken *et al.* [31], è evidente come, stante la considerazione della frase precedente, il vantaggio dell'essere seguiti da una motocicletta, nelle situazioni reali, è maggiore di quello dell'essere seguiti da una automobile, con

una riduzione del carico aerodinamico del 6,4% contro una dell'1,4%. Quindi, non solo le motociclette, causando un maggior numero di incidenti nelle competizioni ciclistiche [31], sono maggiormente pericolose per l'incolumità degli atleti, ma determinano anche un maggior beneficio aerodinamico, non desiderato ai fini della equità della gara [30].

	<b>d (m)</b>									
	<b>0.25</b>	<b>0.5</b>	<b>1</b>	<b>1.5</b>	<b>2</b>	<b>2.5</b>	<b>3.5</b>	<b>5</b>	<b>7.5</b>	<b>10</b>
<b>One motorcycle</b>	8.7	6.4	3.8	2.5	1.7	1.2	0.6	0.3	0.1	0.1
<b>Two motorcycles</b>	11.4	9.5	6.5	4.5	3.2	2.3	1.2	0.7	0.3	0.2
<b>Three motorcycles</b>	13.9	11.8	8.4	6.5	5.3	4.2	2.8	1.5	0.8	0.5
<b>Car</b>			13.7		7.0			1.4		0.2

Figura 9: Riduzione della resistenza aerodinamica, in termini percentuali, rispetto al caso di ciclista isolato.

Il campo di pressione, come già accennato precedentemente, modificato dalla presenza del ciclista e dei veicoli di interesse, è il responsabile dei benefici aerodinamici che l'atleta avverte. Infatti sia il ciclista, sia la motocicletta, sia l'automobile, quando considerati isolati, sono caratterizzati dalla presenza di una regione dello spazio, posta anteriormente ad essi, di sovrappressione, rispetto alla pressione della corrente indisturbata, e di una zona di depressione posteriore. Questa differenza longitudinale nelle pressioni è responsabile della generazione di resistenza aerodinamica. Quanto più la distanza, fra il ciclista (davanti) e il veicolo (dietro), diminuisce, tanto più la zona di depressione del ciclista viene riempita da quella, maggiormente estesa in termini spaziali, di sovrappressione del veicolo. Questa zona, com'è logico ipotizzare, e come è dimostrato dalle ricerche effettuate, è di minor estensione per la motocicletta singola, cresce aumentando il numero di motociclette a due e tre, ed è massima per il modello di automobile utilizzato nelle simulazioni compiute. In Blocken *et al.* [31] viene asserito che al diminuire della distanza fra veicolo e ciclista, la regione di depressione alle spalle di quest'ultimo non solo può essere ridotta in estensione, ma può anche essere completamente eliminata. La conseguenza di tale fatto è diminuzione della resistenza aerodinamica avvertita, dal momento che si riduce il gradiente di pressione fra dorso e ventre del ciclista.

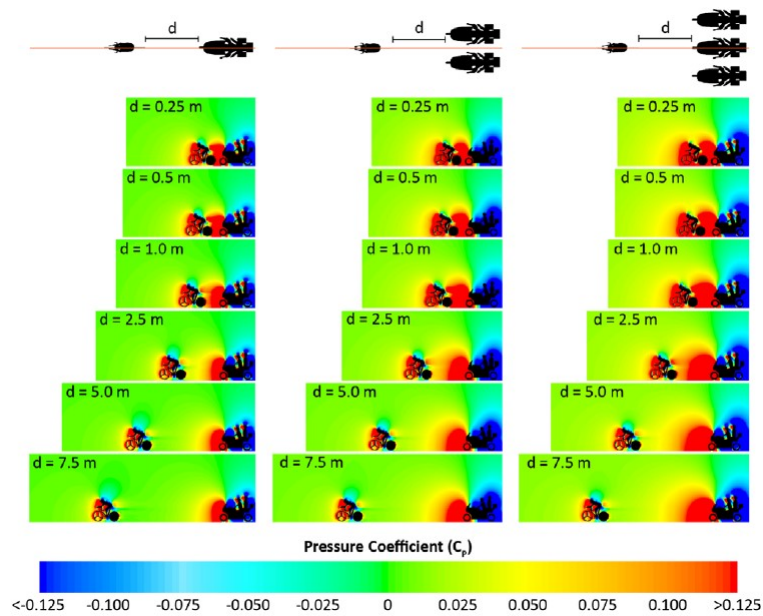


Figura 10: Rappresentazione grafica del coefficiente di pressione in un piano verticale per un ciclista alla velocità di 15 m/s, seguito da una, due o tre motociclette e con una distanza di separazione variabile fra 0.25m e 7.5m.

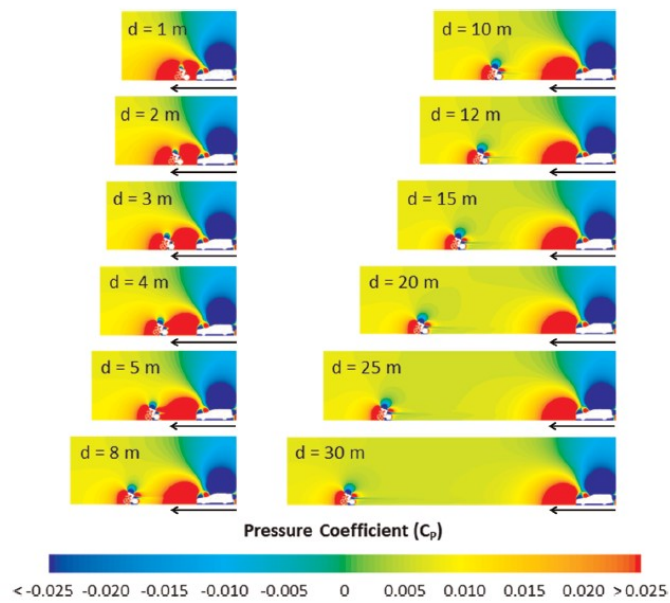


Figura 11: Rappresentazione grafica del coefficiente di pressione in un piano verticale per un ciclista alla velocità di 15 m/s, seguito da un'automobile con una distanza di separazione variabile fra 1m e 30m.

La diminuzione di resistenza aerodinamica si traduce in una diminuzione del tempo necessario, a parità di potenza propulsiva, per concludere la gara. In una competizione di 50 km l'effetto di una singola motocicletta a distanza di 2,5 m è il risparmio di 20,1s, di una automobile a 5 m di 24,1s. Nonostante sia poco logico ipotizzare che i veicoli, salvo la sussistenza di intenzionali comportamenti scorretti [31], segua il ciclista a distanza ravvicinata per tutta la durata della gara, tuttavia anche solo un tratto di 1 km permette di risparmiare, con una singola motocicletta a distanza di 2,5 m, un tempo di 0,40s. Quest'ultimo valore, numericamente piccolo, non è tuttavia da sottovalutare, dal momento che le competizioni ciclistiche a cronometro, di carattere professionistico, vengono solitamente vinte con distacchi dell'ordine di qualche secondo o frazioni di esso. A tal proposito Blocken e Toparlar [29] e Blocken *et al.* [31], contrariamente alla normativa internazionale di riferimento, suggeriscono un incremento della distanza obbligatoria fra ciclista e veicolo che segue da 10 ad almeno 20 o 30 metri.

#### 4.4 Cycling pelotons

Un *cycling peloton* viene definito da Blocken *et al.* [25] come il gruppo principale di ciclisti che pedalano insieme, in prossimità fra loro, riducendo in tal modo la resistenza aerodinamica avvertita e la potenza energetica generata per la propulsione della bicicletta. I ciclisti sono quindi fra loro separati, in termini spaziali, sia longitudinalmente (davanti e dietro) sia lateralmente (destra e sinistra). Come già riportato nei precedenti paragrafi, la separazione laterale influisce in maniera molto più rilevante agli effetti di resistenza aerodinamica, rispetto alla distanza longitudinale [24]. Assai noto, sia formalmente in aerodinamica, sia agli effetti pratici negli ambienti ciclistici amatoriali e professionistici, è anche il fatto che gli atleti posti nelle posizioni maggiormente avanzate del gruppo avvertano la maggior resistenza aerodinamica, mentre è atteso come risultato una maggiore riduzione del carico aerodinamico per i ciclisti nel mezzo e al fondo del gruppo, sia rispetto, per le già addotte motivazioni, al caso di ciclista isolato, sia anche al caso di disposizione allineata di un piccolo gruppo di atleti, in quanto vi sono, nel gruppo, molte file di concorrenti che forniscono riparo dall'aria agli atleti nelle posizioni più arretrate [25].

Il lavoro di Blocken *et al.* [25] rappresenta un contributo molto importante per lo studio e la comprensione dell'andamento della resistenza aerodinamica all'interno di un numeroso gruppo di ciclisti. Infatti, mentre vi sono numerosi articoli scientifici inerenti l'analisi della disposizione in tandem [32][34][36], altrettanto non si può affermare a riguardo dei cycling pelotons, come riportato da Ratamero [28]. Inoltre, precedentemente agli studi di Blocken *et al.*

[25] veniva ipotizzata, agli scopi pratici, una riduzione a valori dal 50 al 70% della resistenza aerodinamica avvertita dal ciclista isolato, per gli atleti nelle posizioni interne del gruppo. Questi dati, tuttavia, erano stati ricavati per la disposizione in tandem e cozzavano con le affermazioni dei ciclisti professionisti, i quali affermavano l'esperienza di una molto più significativa riduzione del carico aerodinamico avvertito, quanto pedalavano all'interno del gruppo [25].

Blocken *et al.* [25] studiarono approfonditamente due gruppi di 121 ciclisti ciascuno, denominati *Peloton A* e *Peloton B*, differenti fra loro per quanto concerne la densità degli atleti, la quale, nella realtà di una gara ciclistica, varia significativamente e più volte durante il corso della competizione [26]. I ciclisti del gruppo A, nella vista laterale, presentano le ruote leggermente sovrapposte; gli atleti del gruppo B, nella vista laterale, non mostrano sovrapposizioni. I ciclisti sono stati ipotizzati in posizione *dropped*, con le gambe in posizione statica; la geometria della bicicletta semplificata e priva di alcuni dettagli, a titolo esemplificativo la catena e il cablaggio dell'impianto frenante, ritenuti scarsamente significativi agli effetti aerodinamici; le ruote fisse. I ricercatori hanno ipotizzato una velocità di 54 km/h, equivalente a 15m/s e la sola presenza di aria in quiete, con temperatura di 15°C e pressione pari ad una atmosfera. La fase di studio è stata svolta con simulazioni computazionali di alta risoluzione, utilizzando le RANS equations e il modello turbolento SST  $k - \omega$ . Inoltre, per fini di validazione, sono state svolte quattro esperienze in galleria del vento, di cui una su un gruppo di 121 modelli di ciclisti, in scala 1:4.

I risultati di Blocken *et al.* [25], al pari di quanto già addotto nel caso di disposizione allineata di ciclisti, riportano di una riduzione della resistenza aerodinamica avvertita rispetto al caso di ciclista isolato, anche per l'atleta in prima fila. L'esperienza in galleria del vento con tutti i 121 ciclisti, posizionati secondo lo schema del Peloton A, mostra come il primo atleta avverta l'84% del carico aerodinamico che grava sul ciclista isolato, come conseguenza del fatto di avere, nella scia formatasi dietro di sé, centoventi atleti che causano il cosiddetto *subsonic upstream disturbance*. Arretrando, in termini spaziali, nel gruppo, la resistenza aerodinamica avvertita diminuisce rapidamente: già gli atleti in terza fila risentono di una riduzione del 65% e quelli posizionati fra l'undicesima e la diciassettesima, di circa il 90%. Questi valori sono molto più coerenti con le dichiarazioni degli esperti di ciclismo, rispetto ai dati erroneamente ipotizzati per i cycling pelotons e provenienti da studi effettuati su ciclisti in disposizione a tandem. Da notare che la minima resistenza aerodinamica non è avvertita in ultima fila, ma in quelle leggermente anteriori, come la quindicesima, e internamente al gruppo. Questo risultato è legato al fatto che gli atleti dell'ultima fila beneficiano del riparo dall'aria,



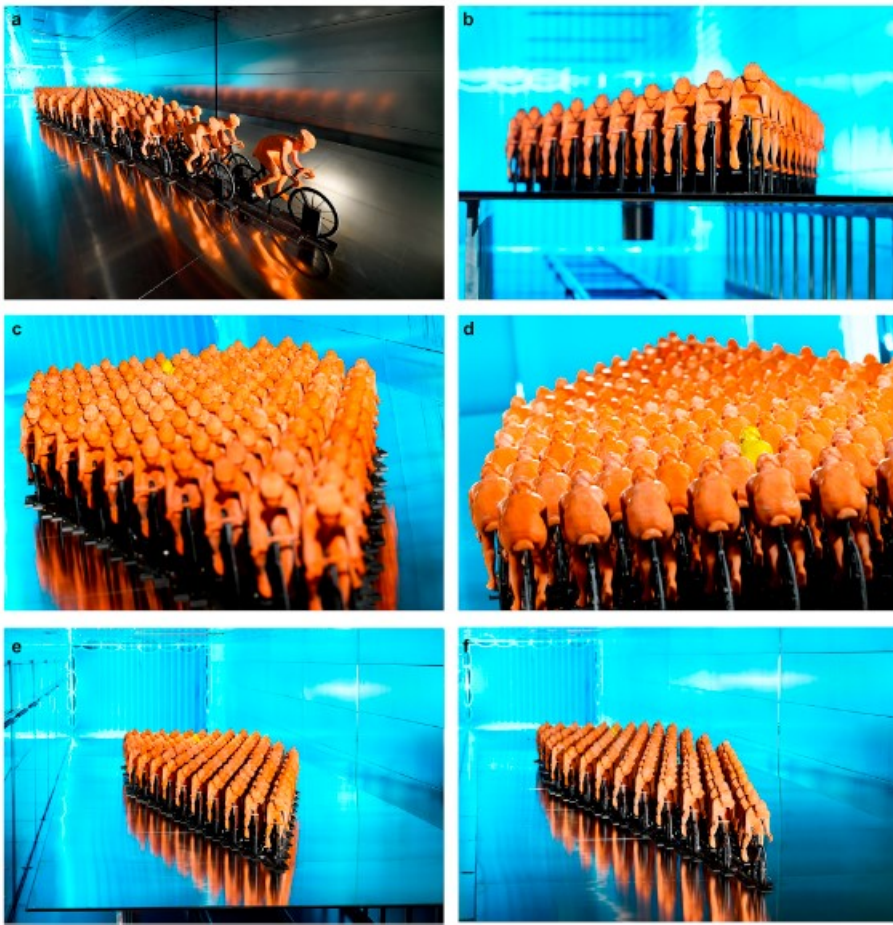


Figura 12: Fotografie dei modelli in scala 1:4 del Peloton A, nell'esperienza in galleria del vento.

offerto dagli atleti in posizione più avanzata, ma non beneficiano, a differenza degli atleti delle file avanti, degli effetti legati alla presenza di atleti, prossimi ad essi, che pedalano della loro scia.

I risultati ottenuti per il Peloton B sono leggermente differenti. Il primo atleta avverte una resistenza aerodinamica del 94% rispetto a quella del ciclista isolato, a seguito della maggior spaziatura longitudinale, ed è di solito qualche punto percentuale maggiore anche il carico aerodinamico avvertito dai ciclisti nelle altre posizioni. La differente densità di atleti si ripercuote quindi, in maniera significativa, solamente sul concorrente in posizione più avanzata.

I risultati ottenuti con la simulazione computazionale sono leggermente differenti, e si discostano da quanto ottenuto in galleria del vento particolarmente per gli atleti posizionati più al fondo del gruppo. Questo è molto probabilmente dovuto alla complessità di riprodurre computazionalmente le strutture di flusso generate da una così vasta moltitudine di ciclisti. La minima resistenza ottenuta con l'approccio CFD è del 5%, con l'approccio EFD del 7%, posizionata alla diciassettesima e ultima fila per il primo, alla quindicesima e terzultima per il secondo.

La maggior parte degli ciclisti, come da dichiarazioni degli atleti professionisti [25], risente dunque di una resistenza aerodinamica molto ridotta, inferiore al 30% di quanto avvertito dal ciclista isolato, ed inferiore a quella ipotizzata in lavori precedenti a quelli di Blocken *et al.* [25]. Tuttavia, essendo la struttura e la densità del gruppo molto variabile durante la gara ciclistica, questi valori sono da considerarsi non indicativi dell'intera competizione, ma dei minimi [26]. Infine, al fine delle strategie messe in atto dai ciclisti durante una gara, non è da considerarsi solamente la riduzione del carico aerodinamico avvertito, ma anche altri fattori, quali ad esempio la possibilità di inseguire tempestivamente un tentativo di fuga, la necessità di cogliere opportunità utili per la propria fuga, o, in generale, la capacità di reagire celermente alle diverse situazioni che possono verificarsi. Compilate tali considerazioni, Blocken *et al.* [25] consigliano, per massimizzare i benefici di ogni aspetto della gara ciclistica, un posizionamento in prossimità della quarta o quinta fila.

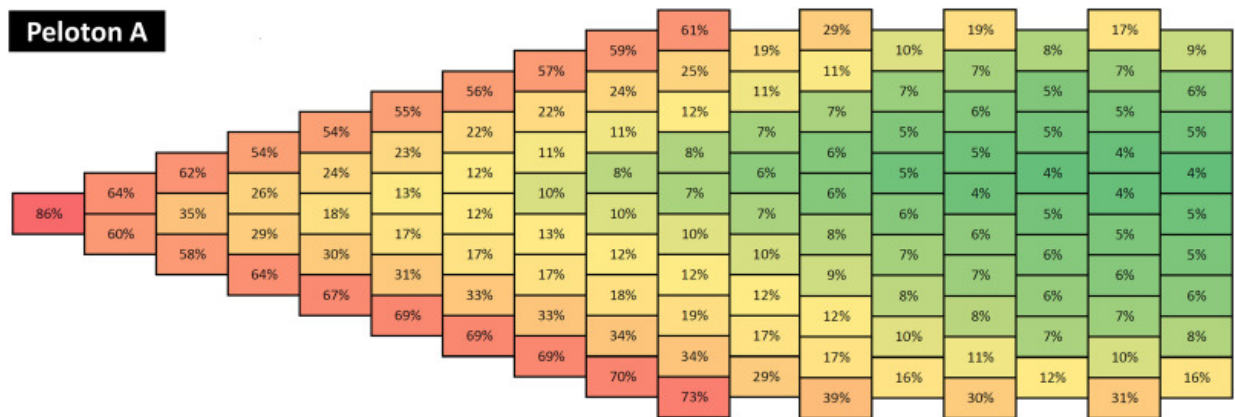


Figura 13: Resistenza aerodinamica di ogni ciclista del Peloton A, in termini percentuali, rispetto al carico aerodinamico avvertito da un ciclista isolato che viaggia alla medesima velocità.

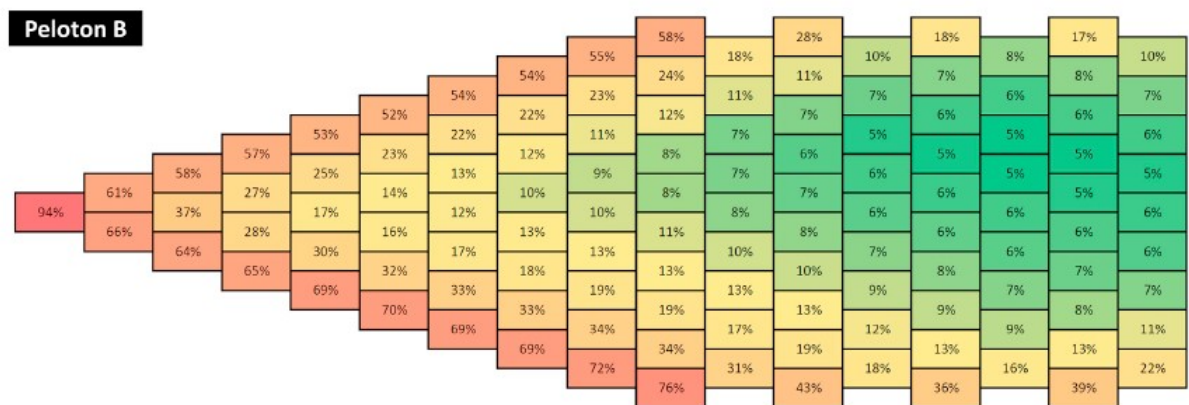


Figura 14: Resistenza aerodinamica di ogni ciclista del Peloton B, in termini percentuali, rispetto al carico aerodinamico avvertito da un ciclista isolato che viaggia alla medesima velocità.

## 5 Conclusioni

In questo lavoro si è approfondito uno degli aspetti della aerodinamica del ciclismo, ovvero l'effetto della disposizione spaziale di ciclisti e veicoli, durante le competizioni ciclistiche, sulla riduzione della resistenza aerodinamica.

I paragrafi 4.1 e 4.4, riguardanti specificatamente le sole biciclette, possono ora essere utilizzati come primo riferimento per studiare e programmare la disposizione degli atleti durante le manifestazioni ciclistiche, sfruttando al massimo i vantaggi descritti in termini di riduzione del carico aerodinamico avvertito e ottimizzando di conseguenza la performance ciclistica. Si è infatti affermato, attingendo ai dati presenti in letteratura, che l'allineamento in tandem di un gruppetto di ciclisti favorisce sia il leading cyclist, con una riduzione della resistenza fino al 5%, sia i drafting cyclists, con una diminuzione fino al 60% circa nel caso di nove atleti distanziati, a due a due, di 15cm. Inoltre, l'analisi delle informazioni presenti negli articoli scientifici di settore, ha condotto ad affermare che la configurazione di cycling peloton sia da preferire a quella in tandem nel caso di elevata numerosità degli atleti, riuscendo essa a garantire un beneficio aerodinamico anche doppio.

I paragrafi 4.2 e 4.3 si sono, invece, concentrati sull'analisi dell'interazione aerodinamica fra un ciclista e i veicoli motorizzati, quali una motocicletta o un'automobile, spesso presenti durante le manifestazioni ciclistiche per le più disparate motivazioni. A tal proposito si è evidenziato come la riduzione di resistenza aerodinamica che può derivarne sia assai elevata e disomogeneamente distribuita fra gli atleti che partecipano alle competizioni. Di conseguenza è stata sottolineata la mancanza di opportuna regolamentazione sportiva, atta a ridurre tali disuguaglianze, riproponendo alcune considerazioni e coerenti consigli di modificazione della normativa vigente già avanzati da alcuni illustri scienziati e ricercatori.

Infine, rimangono aperti vari rami della ricerca, che non sono stati trattati in questo lavoro. Alcuni di essi, invero, sono già stati parzialmente oggetto d'indagine. Secondo quanto riportato in letteratura, ad esempio, la maggior parte degli esperimenti in galleria del vento e delle simulazioni computazionali sono state effettuate con atleti in posizione statica, mentre ridotta è la quantità di informazioni relative alle variazioni indotte dall'azione del pedalare sulla schermatura aerodinamica. Ancora, la gran parte degli articoli reperibili si concentra sull'analisi di situazioni prive di vento, nonostante le competizioni ciclistiche in ambiente aperto raramente si svolgano in ambienti in cui l'aria è effettivamente ferma. L'approfondimento di questi ulteriori parametri garantirebbe certamente una più completa comprensione del tema. Infine, vi sono alcune possibili future aree di ricerca, le quali, al massimo della conoscenza dello scrivente, non hanno ancora suscitato l'interesse di alcuno,

cioè quanto accade quando i ciclisti pedalano in piedi sui pedali, situazione che può verificarsi sia in volata sia durante una ripida salita, e che, dunque, si presta per essere analizzata e successivamente ottimizzata in termini aerodinamici.

## 6 Bibliografia

1. R. Arina, *Fondamenti di Aerodinamica*, Seconda Edizione (2019). Levrotto & Bella Editrice.
2. R.I.Basu, *Aerodynamic forces on structures of circular cross-section. Part 1. Model-data obtained under two-dimensional conditions in low-turbulence streams*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 21 (1985) 273-294
3. S. Scarsoglio, *Termodinamica applicata e trasmissione del calore*. Politecnico di Torino - Materiali del corso
4. I. Tani, *Low-speed flows involving bubble separations*, in D. Kuchemann and L.H.G. Stearne (Eds.), Progress in Aeronautical Sciences, Vol. 5, Pergamon Press, Oxford, 1964
5. A. Fage and J.H. Warsap, *The effects of turbulence and surface roughness on the drag of a circular cylinder*. Aeronautical Research Committee, Reports and Moranda 1929
6. M.M. Zdravkovich, *Conceptual overview of laminar and turbulent flows past smooth and rough circular cylinders*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 33 (1990) 53-62
7. A. Lankadasu and S. Vengadesan, *Interference effect of two equal-sized square cylinders in tandem arrangement: With planar shear flow*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2008; 57:1005–1021
8. Sakamoto H, Haniu H, Obata Y, *Fluctuating forces acting on two square prisms in a tandem arrangement*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 1987; 26:85–103
9. G. Buresti, *Vortex shedding from bluff bodies*. Chapter 4 in “Wind Effects on Buildings and Structures”. (Riera J.D., Davenport A.G., Eds.), Balkema, Rotterdam, 1998, pp. 61-95
10. M.M. Zdravkovich and D.L. Pridden, *Interference between two circular cylinders; series of unsuspected discontinuities*. Journal of Industrial Aerodynamics, 2(1977) 255–270
11. D. Biermann and W.H. Herrnstein, Jr., *The interference between struts in various combinations*. National Advisory Committee for Aeronautics, Tech. Rep. 468 (1933)

12. B. Blocken, *Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations*. Building and Environment 91 (2015) 219-245
13. R. N. Meroney, *Ten questions concerning hybrid computational/physical model simulation of wind flow in the built environment*. Building and Environment 96 (2016) 12-21
14. B. Blocken, C. Gualtieri, *Ten iterative steps for model development and evaluation applied to Computational Fluid Dynamics for Environmental Fluid Mechanics*. Environmental Modelling & Software 33 (2012) 1-22
15. T. Stathopoulos, *Computational wind engineering: Past achievements and future challenges*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 67&68 (1997) 509-532
16. B. Blocken, *50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 129(2014)69–102
17. B. Blocken, T. Defraeye, E. Koninckx, J. Carmeliet, P. Hespel, *CFD simulations of the aerodynamic drag of two drafting cyclists*. Computers & Fluids 71 (2013) 435–445
18. D.M. Fintelman, H. Hemida, M. Sterling, F.-X. Li, *CFD simulations of the flow around a cyclist subjected to crosswinds*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 144(2015)31–41
19. P. Mannion, Y. Toparlar, E. Clifford, M. Hajdukiewicz, T. Andrienne, B. Blocken, *On the effects of crosswinds in tandem aerodynamics: An experimental and computational study*. European Journal of Mechanics / B Fluids 74 (2019) 68–80
20. T. Defraeye, B. Blocken, E. Koninckx, P. Hespel, J. Carmeliet, *Computational fluid dynamics analysis of cyclist aerodynamics: Performance of different turbulence-modelling and boundary-layer modelling approaches*. Journal of Biomechanics 43(2010) 2281–2287
21. A. Bechmann, N. N. Sorensen, J. Berg, J. Mann, P.E. Rethore, *The Bolund experiment, part II: blind comparison of microscale flow models*. Bound-Layer Meteorol 2011;141:245-71

22. P. Bradshaw, *Letter to Editor on Computers vs Wind Tunnels*. *Aeronaut. and Astronaut. Journal* (September 1975) 6
23. B. Fitton, O. Caddy, D. Symons, *The impact of relative athlete characteristics on the drag reductions caused by drafting when cycling in a velodrome*. *Journal of Sports Engineering and Technology* 2018, Vol. 232(I) 39-49
24. K. Shirasaki, K. Yamanobe, K. Akashi, W. Takashima, *Variation of the drafting effect on the trailing rider for different numbers of riders in a cycling group*. *Journal of Sport Engineering and Technology* 1-8 (2017)
25. B. Blocken, T. van Druenen, Y. Toparlar, F. Malizia, P. Mannion, T. Andrienne, T. Marchal, G. Maas, J. Diepens, *Aerodynamic drag in cycling pelotons: New insights by CFD simulation and wind tunnel testing*. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* 179 (2018) 319–337
26. F. Malizia, B. Blocken, *Cyclist aerodynamics through time: Better, faster, stronger*. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* 214 (2021) 104673
27. D.G. Wilson, *Bicycling Science*, third ed. (2004) MIT Press, Cambridge, MA
28. E.M. Ratamero, *Modelling peloton dynamics in competitive cycling: a quantitative approach*. (2015) Sports Science Research and Technology Support, ICSPORTS, Book Series Communications in Computer and Information Science, 464, pp. 42–56
29. B. Blocken, Y. Toparlar, *A following car influences cyclist drag: CFD simulations and wind tunnel measurements*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 145 (2015) 178-186
30. B. Blocken, F. Malizia, T. van Druenen, S. Gillmeier, *Aerodynamic benefits for a cyclist by drafting behind a motorcycle*. *Sports Engineering* (2020) <https://doi.org/10.1007/s12283-020-00332-z>
31. B. Blocken, Y. Toparlar, T. Andrienne, *Aerodynamic benefit for a cyclist by a following motorcycle*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 155 (2016) 1-10



32. B. Blocken, Y. Toparlar, T. van Druenen, T. Andrienne, *Aerodynamic drag in cycling team time trial*. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics 182 (2018) 128–145
33. A. Íñiguez-de-la Torre and J. Íñiguez, *Aerodynamics of a cycling team in a time trial: does the cyclist at the front benefit?*. European Journal of Physics 30 (2009) 1365-1369
34. N. Barry, D. Burton, J. Sheridan, M. Thompson, N. A. T. Brown, *An analysis of the wake of pedalling cyclists in a tandem formation*. Procedia Engineering 147 ( 2016 ) 7 – 12
35. T. Defraeye, B. Blocken, E. Koninckx, P. Hespel, P. Verboven, B. Nicolai, J. Carmeliet, *Cyclist Drag in Team Pursuit: Influence of Cyclist Sequence, Stature, and Arm Spacing*. Journal of Biomechanical Engineering, January 2012, Vol. 136
36. N. Barry, D. Burton, J. Sheridan, M. Thompson, N. A.T. Brown, *Flow field interactions between two tandem cyclists*. Exp Fluids (2016) 57:181
37. M. Belloni, S. Giappino, F. Robustelli, C. Somaschini, *Drafting effect in cycling: investigation by wind tunnel tests*. Procedia Engineering 147 ( 2016 ) 38 – 43
38. N. Barry, J. Sheridan, D. Burton, N. A. T. Brown, *The effect of spatial position on the aerodynamic interactions between cyclists*. Procedia Engineering 72 ( 2014 ) 774 – 779

## 7 Ringraziamenti

Un immenso grazie ai miei genitori e a mia sorella per non aver mai preteso nulla da me e al contempo avermi affiancato in tutte le mie necessità.

Un profondo ringraziamento a tutta la mia famiglia, nonni e zie, per il costante interesse e aiuto dimostratomi.

Un sincero ringraziamento a tutti i miei amici e colleghi per la propria presenza, comprensione e per l'assenza di giudizio.

Un sentito ringraziamento alle associazioni sportive e non, di cui ho fatto o faccio ancora parte, e che sono state indispensabili per la formazione del mio carattere e della mia visione del mondo. Per la medesima motivazione ringrazio tutti i professori con i quali ho interagito nella mia carriera scolastica.

Infine, un sincero pensiero ai miei datori di lavoro per la flessibilità accordatami in relazione ai miei impegni scolastici, e un ringraziamento per non averne mai fatto menzione.