

Aerodinamica nel ciclismo: studio numerico delle forze globali

A cura di **Marco Panzeri**, Senior CFD Engineer, ANSYS Italia

I test in galleria del vento sono piuttosto frequenti per i professionisti del ciclismo, specialmente in preparazione delle prove a cronometro. Circa una decina di anni fa questi studi hanno portato a sviluppare delle biciclette innovative, con l'obiettivo di posizionare il ciclista in modo tale da ridurre la superficie resistente e far assumere una conformazione aerodinamicamente più efficiente. È tuttavia poco frequente avere delle valutazioni quantitative della relazione tra l'impegno fisico e le variabili aerodinamiche, così da poter dare risposta ad alcune domande comuni. Quanto cresce il dispendio di energia con l'aumento di velocità? Quanto vale lo sforzo aggiuntivo in presenza di vento? Come cambia in funzione della sua intensità e direzione? Quant'è la differenza tra pedalare da soli o in scia? In questo articolo viene presentato uno studio relativo a questi aspetti.

1. Introduzione

Lo sforzo fisico del ciclista si contrappone a tre 'resistenze': gli attriti meccanici, la forza di gravità e la resistenza aerodinamica.

Gli attriti sono dovuti al movimento delle parti meccaniche: ingranaggi, cuscinetti, contatto tra gomma e suolo, la forza di gravità si manifesta in salita, mentre l'aerodinamica è intrinsecamente legata al moto di un corpo in un fluido.

Benché impalpabile, l'aria esercita forze notevoli. Nel ciclismo su strada e su pista la resistenza aerodinamica è un aspetto fondamentale, che determina le tattiche e l'andamento stesso delle gare.

Per questa ragione i test in galleria del vento sono piuttosto frequenti per i professionisti, specialmente in preparazione delle prove a cronometro. Circa una decina di anni fa questi studi hanno portato a sviluppare delle biciclette innovative, con l'obiettivo di posizionare il ciclista in modo tale da ridurre la superficie resistente e far assumere una conformazione aerodinamicamente più efficiente.

In seguito l'Unione Ciclistica Internazionale ha fissato delle precise limitazioni alla fisiologia delle biciclette omologabili, con l'obiettivo di conservare la predominanza del fattore umano sull'aspetto meccanico nello sport del ciclismo e anche per garantire il livello di guidabilità, quindi di sicurezza. Nel rispetto di queste norme, gli studi continuano, concentrandosi anche sui più piccoli dettagli al fine di ridurre la resistenza aerodinamica, quindi lo sforzo fisico, per ottenere la massima prestazione.

È tuttavia poco frequente avere delle valutazioni quantitative della relazione tra l'impegno fisico e le variabili aerodinamiche, così da poter dare risposta ad alcune domande comuni. Quanto cresce il dispendio di energia con l'aumento di velocità? Quanto vale lo sforzo aggiuntivo in presenza di vento? Come cambia in funzione della sua intensità e direzione? Quant'è la differenza tra pedalare da soli o in scia?

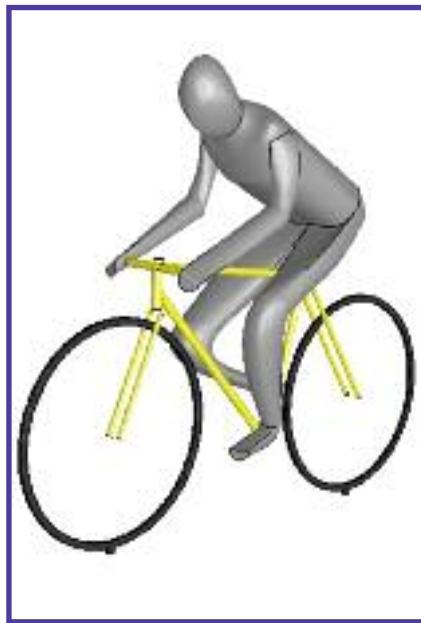


Fig. 2.1 – Modello geometrico del manichino e della bicicletta.

In questo articolo viene presentato uno studio relativo a questi aspetti.

Lo studio è stato condotto per mezzo di una tecnologia di calcolo al computer chiamata fluido dinamica computazionale (CFD, dall'inglese Computational Fluid Dynamics). La CFD risolve le equazioni che governano il moto dei fluidi, così da poter creare al computer un laboratorio fluidodinamico, in questo caso una galleria del vento virtuale. Questa tecnologia è largamente usata in un ampio numero di applicazioni di ricerca e di progettazione. I principali esempi nello sport sono le vetture di Formula 1 e le barche di Coppa America.

Tuttavia il continuo sviluppo, anche e soprattutto delle macchine di calcolo, permette di dire che l'esecuzione dello studio qui presentato è già possibile su un computer di larga diffusione ("da supermercato").

2. Note sul modello matematico e sui risultati

L'obiettivo dello studio qui presentato è di analizzare la relazione tra lo sforzo fisico e le variabili aerodinamiche globali, cioè la velocità di avanzamento, l'intensità e la direzione del vento, la scia.

Obiettivo di questo studio non è fornire valutazioni assolute, ad esempio quanti Watt di potenza. Questo richiederebbe la geometria dettagliata della bicicletta e del ciclista, il che comporterebbe maggiori risorse di calcolo, cioè computer più potenti, senza aggiungere nulla alla generalità dei risultati. Infatti i dettagli geometrici della bicicletta e del ciclista, così come la sua posizione, sarebbero arbitrari. Uno studio di dettaglio ha pienamente senso per la ricerca della massima prestazione di atleti professionisti. In tal caso la tecnologia CFD, integrata con tecnologie di prototipazione virtuale e di morphing geometrico, è in grado di fornire risultati con elevato livello di dettaglio, e merita di essere considerata in alternativa ai test in galleria. Esistono studi di questo tipo condotti per l'ottimizzazione ad esempio di caschi, ruote e geometrie dei tubi telaio.

Nello studio qui presentato invece si sono voluti considerare alcuni aspetti generali, focalizzando l'attenzione sulla relazione tra sforzo fisico e variabili aerodinamiche globali: si è presa a riferimento una certa situazione e se ne sono analizzate le variazioni col modificarsi delle condizioni.

Avendo questo obiettivo, si è considerato come modello geometrico un manichino semplificato, che, pur conservando la generalità dei risultati, permette di contenere la richiesta di potenza delle macchine di calcolo da impiegare. Analogamente, anche per la bicicletta si è utilizzato un modello geometrico semplificato e componenti come raggi, trasmissione, freni, non sono stati considerati. Il modello geometrico utilizzato è mostrato in Fig. 2.1.

La posizione è fissa, cioè il movimento di pedalata delle gambe non è considerato. Il software utilizzato (Fluent v6.2) permette di considerarlo, ma i calcoli sarebbero stati sensibilmente più onerosi.

Lo stato di riferimento scelto considera percorso piano (quindi nessun contributo dalla forza di gravità), nessun attrito meccanico, assenza di vento, velocità di avanzamento pari a 36 km/h.

Tale velocità è piuttosto frequente per un ampio numero di ciclisti non professionisti. Bisogna poi sottolineare che le caratteristiche del flusso sul sistema ciclista + bicicletta non cambiano al variare della velocità, quindi i risultati possono essere immediatamente estesi all'intero campo di velocità compreso tra 20 e 60 km/h (per gli esperti di aerodinamica: il numero di Reynolds è sostanzialmente costante).

Nei casi con vento laterale si pone la questione della non simmetria geometrica. Per la posizione delle gambe, considerate ferme, i calcoli danno ovviamente risultati leggermente diversi per vento proveniente da destra o da sinistra. Qui si è scelto di dare i valori medi tra le due situazioni.

La misura dello sforzo fisico è riportata sia in termini di forza aerodinamica che di potenza.

La tecnologia CFD utilizzata, benché poco conosciuta, è ampiamente collaudata da oltre vent'anni, come testimoniato dalle numerose applicazioni industriali e di ricerca scientifica.

Nella valutazione dei risultati qui presentati bisogna però ricordare che sono strettamente legati al modello geometrico considerato. Una diversa posizione del manichino o un manichino di conformazione differente porterebbe a variazioni.

3. Sforzo fisico in funzione della velocità

Quanto è necessario incrementare l'impegno per aumentare la velocità?

La risposta a questa domanda non richiede una galleria del vento o un software CFD.

È noto che la resistenza aerodinamica aumenta con il quadrato della velocità, perciò la curva della resistenza in funzione della velocità può essere facilmente tracciata.

Per quanto riguarda la potenza, la curva può essere ricavata semplicemente ricordando che la potenza è data dal prodotto della forza per la velocità.

In entrambi i casi è comodo utilizzare valori adimensionalizzati, cioè normalizzati rispetto a uno stato di riferimento. Ad esempio, questo può essere fatto dividendo i valori di resistenza e potenza per i rispettivi valori massimi, cioè i valori corrispondenti alla velocità massima raggiungibile dal ciclista.

I grafici seguenti (Fig.3.1 e Fig.3.2) sono riferiti a un ciclista che si suppone essere in grado di raggiungere 60 km/h come velocità massima (ricordiamo che si sta considerando nessun attrito, nessuna pendenza e aria ferma). Quindi a 60 km/h il ciclista esprime la sua massima potenza, cioè 1.0 (100%), mentre a velocità inferiori esprime una frazione della potenza massima. Ad esempio, è necessario solo lo 0.3 (30%) della potenza

Fig.3.1 – Resistenza in funzione della velocità.
Valori normalizzati rispetto a 60 km/h.



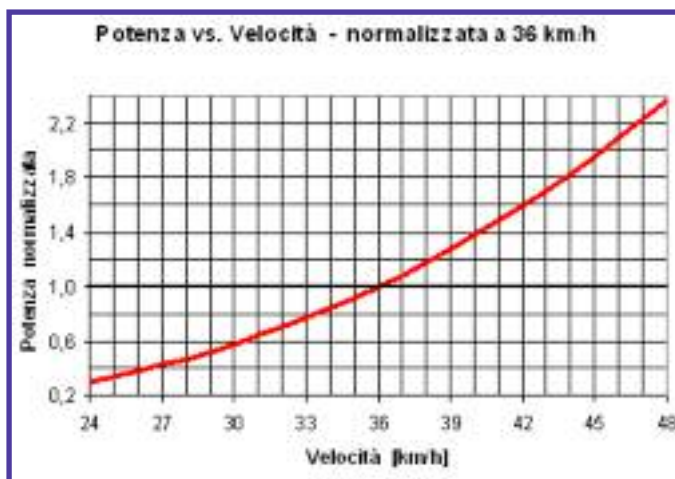
Fig.3.2 – Potenza in funzione della velocità.
Valori normalizzati rispetto a 60 km/h.



Fig.3.3 – Resistenza vs. Velocità - normalizzata a 36 km h.
Valori normalizzati rispetto a 36 km/h.



Fig.3.4 – Potenza in funzione della velocità.
Valori normalizzati rispetto a 36 km/h.



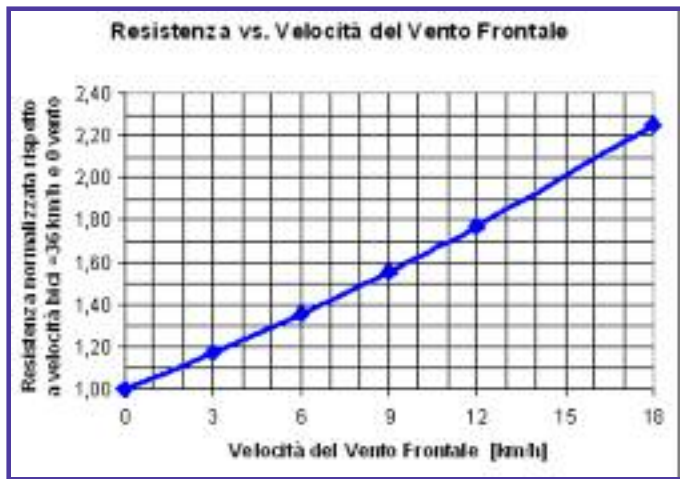


Fig.4.1 – Resistenza in funzione della velocità del vento frontale. Valori normalizzati rispetto a velocità di avanzamento=36 km/h e assenza di vento.



Fig.4.2 – Potenza in funzione della velocità del vento frontale. Valori normalizzati rispetto a velocità di avanzamento =36 km/h e assenza di vento.



Fig.5.1 – Resistenza in funzione dell'angolo del vento. Velocità vento=12km/h. Valori normalizzati rispetto a velocità di avanzamento =36 km/h e assenza di vento.

massima per procedere a 40 km/h. Considerare il valore di riferimento 1.0 in corrispondenza della velocità massima è appropriato per brevi scatti, mentre per distanze più lunghe potrebbe essere preferibile far riferimento a velocità medie. Le Figure 3.3 e 3.4 mostrano le curve di resistenza e di potenza in funzione della velocità, normalizzate rispetto ai valori a 36 km/h (velocità di riferimento per questo studio).

4. Vento frontale

La situazione di vento contrario che soffia perfettamente allineata con la direzione di moto è la peggiore ma anche piuttosto rara. L'effetto sullo sforzo aggiuntivo del ciclista è

lo stesso di un aumento di velocità, infatti è sufficiente sommare la velocità del vento alla velocità di avanzamento per poter continuare ad usare i grafici del paragrafo precedente.

Ad esempio la condizione di velocità della bicicletta di 36 km/h con vento frontale che soffia a 12 km/h corrisponde alla condizione di velocità della bicicletta di 48 km/h in assenza di vento.

Ne segue che, per mantenere invariato il livello di sforzo, il ciclista dovrà ridurre la propria velocità di un valore pari alla velocità del vento (continuiamo a trascurare gli attriti).

Viceversa, nel caso di vento a favore, perfettamente allineato con la direzione di moto,

la velocità del vento deve essere sottratta alla velocità di avanzamento della bicicletta. Malgrado queste semplici considerazioni riassumano l'essenza del fenomeno, sono stati fatti alcuni calcoli CFD.

Si è considerata una velocità di avanzamento costante, pari a 36 km/h, e vento frontale, contrario, a diverse velocità, fino a 18 km/h. Il confronto tra i risultati ottenuti e le considerazioni teoriche (si vedano i dati del paragrafo precedente) hanno permesso di confermare la validità e l'accuratezza della tecnologia CFD utilizzata.

La resistenza e la potenza calcolate con la CFD sono riportate in Fig.4.1 e Fig.4.2. La normalizzazione è rispetto alla condizione di riferimento scelta, cioè velocità di avanzamento 36 km/h e assenza di vento.

La potenza è stata considerata come il prodotto della resistenza e della somma delle velocità del vento e di avanzamento. Se si preferisce considerare la potenza come il prodotto della resistenza per la sola velocità di avanzamento, allora si può continuare a considerare il grafico della resistenza, essendo la velocità di avanzamento costante.

5. La direzione del vento

Nel caso in cui la variabile da studiare sia la direzione di provenienza del vento, non ci sono considerazioni teoriche che possano venire in aiuto. Perciò è necessario un calcolo CFD, oppure un test in galleria del vento, purché dotata di piattaforma mobile, così da permettere la rotazione del modello rispetto al vento. Qui è stato considerato vento con velocità pari a 12 km/h, cioè 1/3 della velocità di avanzamento (=36 km/h), per angoli di direzione del vento da 0° a 135°. L'angolo 0° è la situazione di vento perfettamente frontale, l'angolo 90° vento perfettamente laterale.

Data la posizione delle gambe, qui considerate ferme, i calcoli danno risultati diversi per vento proveniente da destra o da sinistra. Per il modello geometrico considerato, Fig.2.1, la resistenza è superiore nel caso di vento che soffia dalla destra del manichino. L'entità della differenza cresce con la velocità del vento. Infatti aumentando la velocità del vento aumenta l'angolo di incidenza della velocità totale e quindi cambiano le caratteristiche del campo aerodinamico. Considerando la situazione di vento perfettamente laterale, 90°, la differenza parte dal 1.5% per vento a 3 km/h, e aumenta al 9% per vento a 18 km/h.

I dati qui di seguito riportati sono la media tra le due situazioni, vento da destra e da sinistra, a parità di angolo.

Lo stato di riferimento (valore di riferimento 1.0) è quello di velocità di avanzamento pari a 36 km/h e assenza di vento. Resistenza e potenza riportati in Fig.5.1 e Fig.5.2 sono normalizzati rispetto a tale condizione.

La potenza qui è calcolata come il prodotto della resistenza per la somma di velocità di avanzamento e componente di velocità del vento allineata con la direzione di avanzamento.

Si osserva come la differenza tra i valori a 0° e 30° sia piccola.

La ragione può essere cercata considerando le componenti di velocità totale, cioè velocità

del vento sommata alla velocità della bicicletta, riportate in Fig.5.3. Da 0° a 30° la componente frontale (allineata alla direzione di avanzamento e usata per il calcolo della potenza) diminuisce leggermente, da 48 a 46 km/h, mentre la componente laterale (perpendicolare alla direzione di avanzamento) aumenta da 0 a 6 km/h. In termini aerodinamici, questo significa che per vento a 30° la velocità totale è pari a 46.8 km/h con un'incidenza di 7.4°. La differenza è piccola rispetto a 48 km/h e 0° (vento frontale), stimabile grossolanamente attorno al 5%.

Si potrebbe pensare che la componente laterale di velocità non abbia influenza sulla resistenza. Non è così, come si può osservare dai valori per angolo del vento a 90°. Anche in questa condizione di vento perfettamente laterale la resistenza e la potenza sono maggiori rispetto alla condizione di riferimento con assenza di vento. Sia resistenza che potenza mostrano un incremento del 20% (1.2) per il manichino e per la condizione considerata.

I valori scendono sotto a 1.0 per angolo di 100° circa, mentre si potrebbe pensare che il vento aiuti per tutti gli angoli superiori a 90°.

Questi risultati confermano la sensazione dei ciclisti che il vento aumenti sensibilmente la fatica anche quando soffia lateralmente.

I calcoli evidenziano che questo è dovuto al maggior sforzo per avanzare, non a un impegno aggiuntivo per bilanciare la componente di forza laterale.

La componente laterale di forza aerodinamica è confrontata con la resistenza per diversi angoli del vento in Fig.5.4.

Si osserva come la forza laterale sia pressoché costante per direzioni del vento tra 60° e 100°. A 135° il valore di forza laterale è circa il 30% della resistenza, per i valori di velocità del vento e di avanzamento considerati.

A 0°, così come in assenza di vento, è stata calcolata una leggera componente di forza laterale, evidentemente legata alla non simmetria della posizione del manichino. Si può dire che nella realtà il movimento di pedalata annulla tale non simmetria, e comunque il ciclista, che stia pedalando o meno, bilancia istintivamente questa piccola forza laterale. Grazie ai suoi strumenti di visualizzazione, la CFD permette di comprendere come il vento laterale incrementi la resistenza all'avanzamento.

Di seguito vengono confrontate le situazioni di assenza di vento e di vento perfettamente laterale con velocità pari a 12 km/h. La velocità di avanzamento è pari a 36 km/h in entrambi i casi.

In termini aerodinamici, nella condizione di vento perfettamente laterale, qui si ha una velocità totale pari a poco meno di 38 km/h con angolo di incidenza di 18.4°. Confrontando con la condizione di assenza di vento la differenza è stimabile attorno all'11%, se calcolata semplicemente in base al quadrato delle velocità totali e trascurando grossolanamente l'angolo di incidenza, quindi calcolando per eccesso. Invece, lo sforzo supplementare richiesto risulta essere del 20%. C'è quindi qualche altro aspetto da indagare.

Fig.5.2 – Potenza in funzione dell'angolo del vento. Velocità del vento=12km/h. Valori normalizzati rispetto a velocità di avanzamento=36 km/h e assenza di vento.



Fig.5.3 –Componenti di velocità totale in funzione dell'angolo del vento. La velocità totale è la somma delle velocità di avanzamento =36km/h e del vento=12km/h.

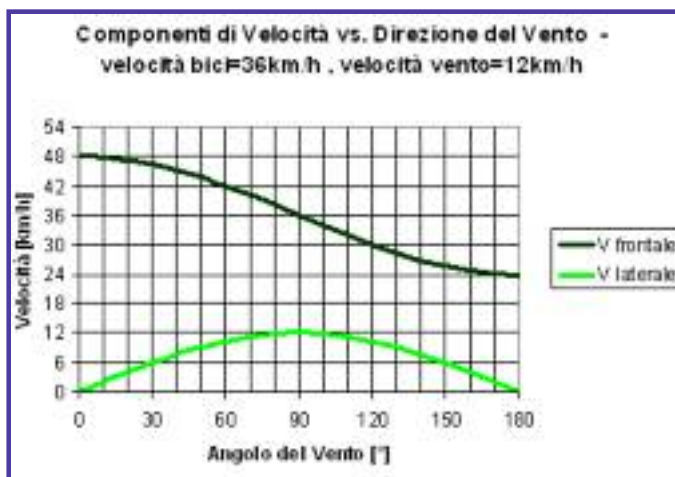
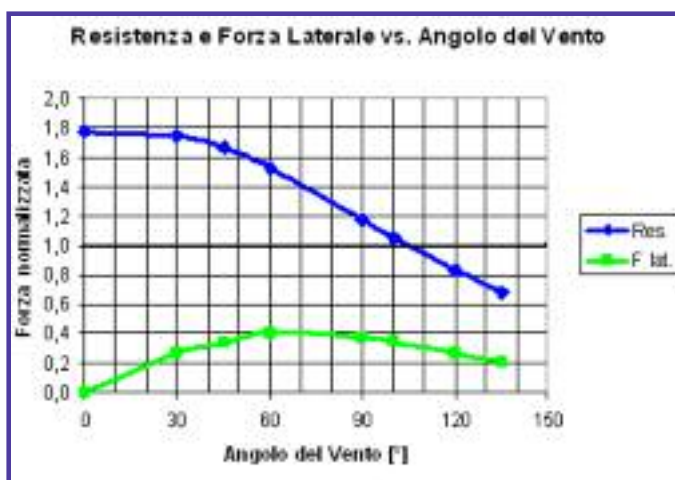


Fig.5.4 – Resistenza e forza laterale in funzione dell'angolo del vento. Velocità del vento=12km/h. Valori normalizzati rispetto a velocità di avanzamento=36 km/h e assenza di vento.



La variabile utile a questa indagine è la pressione normalizzata P' , definita come il valore locale di pressione statica diviso per il suo valore nel punto di ristagno, cioè dove la velocità si annulla impattando sulla superficie del manichino. Quindi P' è uguale a 1 nei punti di ristagno, mentre valori inferiori, anche negativi, corrispondono via via a depressioni progressivamente maggiori. Osservando la distribuzione di P' su un corpo si può allora analizzare in dettaglio il suo comportamento aerodinamico.

P' è mostrato per la condizione di assenza di vento in Fig.5.5, per la condizione di vento perfettamente laterale in Fig.5.6 (è considerato vento che soffia da destra, condizione peggiore nel caso qui in esame). Per consen-

tire un confronto visivo più immediato, il valore di ristagno per la condizione di assenza di vento è usato come riferimento in entrambe le figure.

Anche ad un'analisi superficiale si osserva come, nella condizione di vento laterale, P' superi il valore 1 in varie zone del manichino. Questo significa che l'aria esercita una forza maggiore rispetto alla situazione di assenza di vento. Poiché tali aree si trovano nella parte frontale, ne segue una maggiore resistenza all'avanzamento. Inoltre nella parte posteriore destra della schiena si osserva una maggiore depressione, anch'essa causa di maggiore resistenza.

Questi risultati suggeriscono che una posizione aerodinamica più efficiente porterebbe

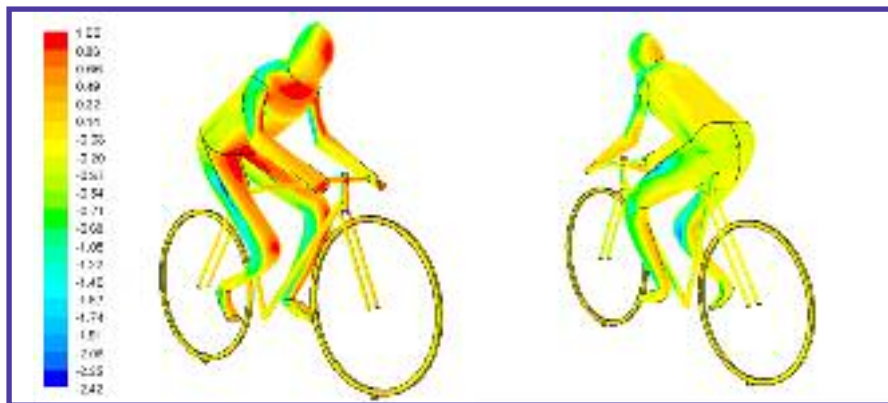


Fig.5.5 – Distribuzione di Pressione Statica Normalizzata P' sulla superficie del manichino. Condizione di assenza di vento.

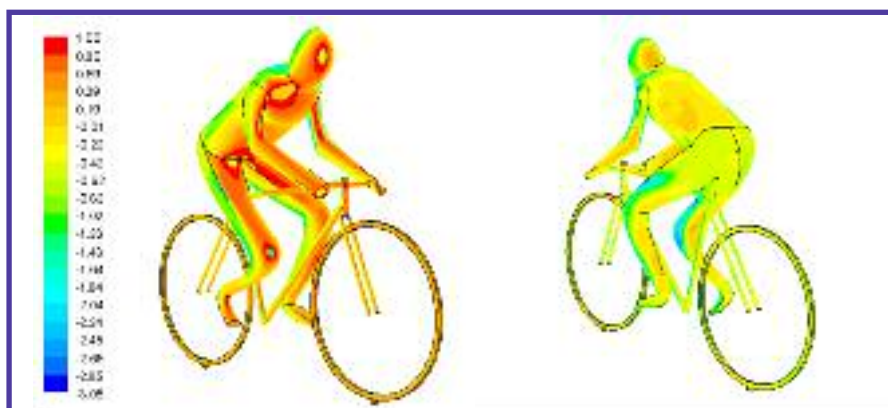


Fig.5.6 – Distribuzione di Pressione Statica Normalizzata P' sulla superficie del manichino. Condizione di vento perfettamente laterale.

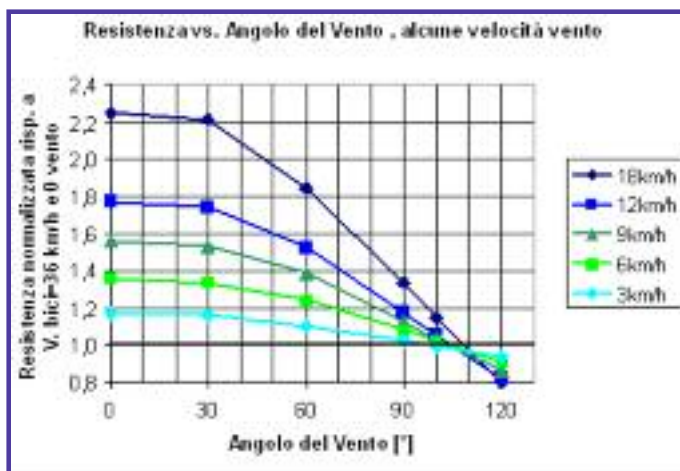


Fig.5.7 – Resistenza in funzione dell'angolo del vento, per alcune velocità del vento. Velocità di avanzamento =36km/h.

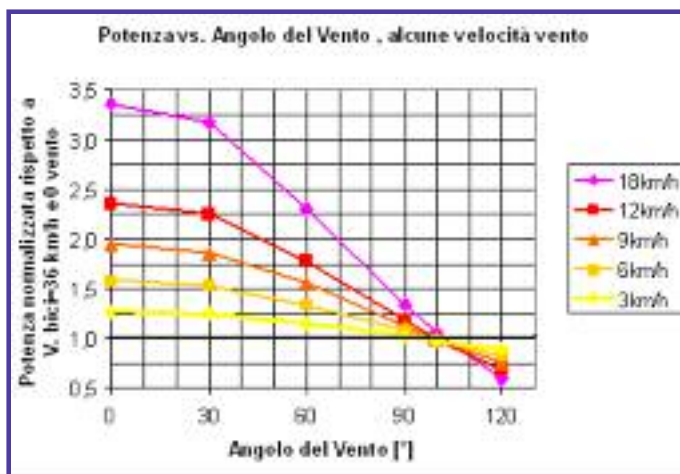


Fig.5.8 – Potenza in funzione dell'angolo del vento, per alcune velocità del vento. Velocità di avanzamento =36km/h.

un miglioramento percentuale maggiore nella condizione di vento laterale rispetto alla condizione di assenza di vento o di vento perfettamente frontale.

Il passo successivo consiste nella valutazione complessiva delle variazioni di sforzo in funzione di velocità e direzione del vento, come riportato in Fig.5.7 e in Fig.5.8. La velocità della bicicletta è fissata a 36 km/h. Il valore di riferimento 1.0 corrisponde alla condizione di assenza di vento.

6. Scia di un ciclista

Analizzare la scia del manichino preso a riferimento per questo studio è utile per studiare gli effetti su un secondo ciclista.

Per farlo si può considerare una porzione d'aria la cui superficie ricalchi, più o meno approssimativamente, la sezione frontale del ciclista. Questa "sezione di studio" viene posizionata a diverse distanze lungo la direzione di avanzamento. La prima posizione è presa a monte del manichino e dà il valore di riferimento, essendo una zona d'aria non perturbata, le altre posizioni sono nella scia. Per ogni posizione la grandezza significativa è il quadrato della velocità media, calcolata come media dei valori di velocità rilevati in un certo numero di punti della sezione stessa, e normalizzato dividendolo per il valore rilevato nella sezione a monte, dove aria non perturbata.

In questo modo è possibile confrontare il "livello di energia" per ogni posizione lungo la scia, come mostrato in Fig.6.1. Infatti il quadrato della velocità è direttamente legato alla resistenza aerodinamica, come già visto nel paragrafo 3 (attraverso la pressione dinamica, derivante dal moto di un corpo in un fluido). Ne segue che valori minori comportano una minore resistenza all'avanzamento.

Ovviamente, l'effetto della scia diminuisce con il crescere della distanza dal corpo che la genera. In questo caso il livello di energia torna a 1 ad una distanza di circa 20 metri dal manichino. Il profilo completo è mostrato in Fig.6.2 (qui è stata considerata la situazione di assenza di vento).

Questa curva mostra il risparmio di energia da parte di un ipotetico ciclista in funzione della sua posizione nella scia del primo.

Si nota che la curva è sostanzialmente la stessa indipendentemente dalla velocità di avanzamento. Gli aerodinamici osservano infatti che il numero di Reynolds è praticamente costante, quindi le caratteristiche del campo aerodinamico non cambiano per lo spettro di velocità considerate.

Naturalmente, alle diverse velocità cambia il valore assoluto dello sforzo risparmiato.

Bisogna sottolineare che questa analisi è un'approssimazione della situazione reale. Infatti la presenza di un ciclista nella scia del primo ne modifica le caratteristiche. L'indagine rigorosa richiede il calcolo CFD del sistema completo di entrambi i ciclisti.

7. Ciclisti in coppia

Sono considerati due manichini identici e perfettamente allineati, per due distanze tra la ruota posteriore del primo e la ruota anteriore del secondo: 25cm e 50cm.

Il primo calcolo riguarda la situazione in

assenza di vento. Come valore di riferimento 1.0 è stato preso il valore del ciclista singolo, visto nei paragrafi precedenti.

Sia la resistenza che la potenza del secondo ciclista, quello che sta in scia, diminuiscono a 0.70 per distanza 25cm, a 0.71 per distanza 50cm.

Questi numeri sono in buon accordo con le stime del paragrafo 6.

Osservando la lieve differenza tra i valori per le due distanze in esame, e considerando che, a 36 km/h, 25cm sono percorsi in 2.5 centesimi di secondo, il suggerimento potrebbe essere quello di preferire una distanza leggermente superiore. Questo aumenterebbe solo di poco il livello di sforzo, mentre guadagnerebbe la sicurezza.

Riguardo al primo ciclista, resistenza e potenza scendono a 0.98 per entrambe le distanze. Questo lieve miglioramento è legato alla modifica della scia dovuto alla presenza del secondo ciclista.

Nella realtà il ciclista che segue non è perfettamente allineato con il primo. Si è quindi eseguito un calcolo per uno scostamento laterale di 10cm, distanza 50cm. La situazione per il primo ciclista non cambia, i valori rimangono a 0.98, mentre per il secondo ciclista la riduzione di resistenza e di potenza vale 0.74.

L'allineamento appare quindi più importante della distanza.

Questi risultati sono stati riscontrati uguali per due velocità di avanzamento: 36km/h e 48km/h, come prevedibile.

Si ricordi che i risultati sono legati alla forma geometrica del manichino utilizzato per i calcoli. Modifiche di forma o posizione porterebbero variazioni dei risultati.

Il secondo punto di indagine riguarda la sensibilità al vento, in particolare alla sua direzione, per la coppia di ciclisti.

Si è considerato distanza pari a 50cm, perfetto allineamento, velocità di avanzamento 36km/h e velocità del vento 12km/h.

L'angolo 0° è la situazione di vento perfettamente frontale, l'angolo 90° è la situazione di vento perfettamente laterale.

Lo stato di riferimento è il ciclista singolo con vento perfettamente frontale (valore di riferimento 1.0). La resistenza e la potenza di Fig.7.1 e Fig.7.2 sono normalizzate rispetto a questa condizione.

Si continua a osservare la lieve riduzione di sforzo del primo ciclista della coppia rispetto al ciclista singolo.

Il secondo ciclista si avvantaggia sensibilmente della scia per angoli del vento inferiori a 30°. Per angoli maggiori i valori diventano molto simili per tutti i tre ciclisti.

Naturalmente i ciclisti reali hanno la sensibilità per capire la direzione del vento e quindi muoversi nella posizione migliore per ogni condizione.

8. Scia della coppia di ciclisti

Applichiamo la stessa procedura vista nel paragrafo 6 alla coppia di ciclisti, per valutare gli effetti su un ipotetico terzo compagno. Come già evidenziato, tale procedura non è rigorosa, poiché ogni nuovo ciclista aggiunto alla fila modifica la scia di quelli che lo pre-

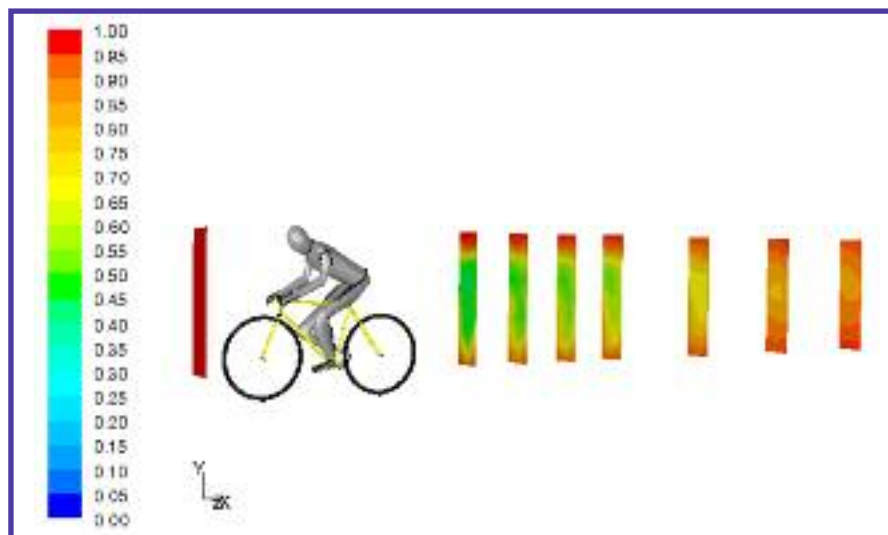


Fig.6.1 – "Livello di energia" per alcune distanze lungo la scia del manichino. I valori sono normalizzati rispetto alla posizione a monte. Valori più bassi indicano una minore resistenza all'avanzamento di un corpo. Si nota la non simmetria della scia, dovuta alla posizione non simmetrica del manichino.

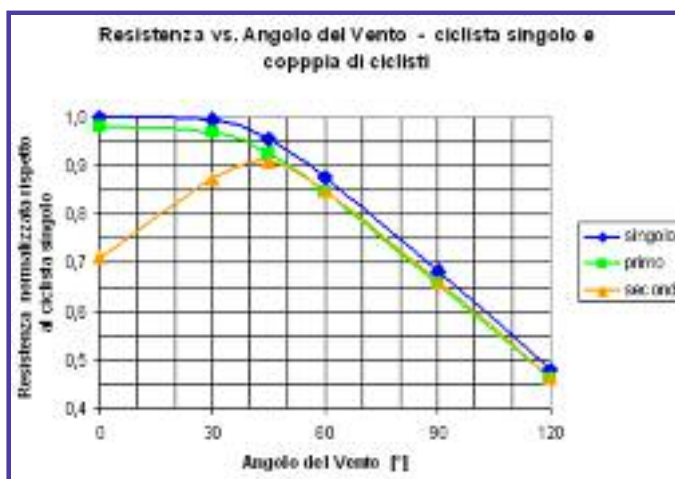
Fig.6.2 – "Livello di energia" lungo la scia di un ciclista.

Per ogni velocità di avanzamento, i valori sono normalizzati rispetto al valore corrispondente della posizione a monte. La curva non è perfettamente lineare a causa della morfologia dei vortici nella scia.



Fig.7.1 – Resistenza in funzione dell'angolo del vento per coppia di ciclisti.

Distanza=50cm.
Velocità di avanzamento =36km/h.
Velocità del vento=12km/h.



cedono. Tuttavia, i risultati del paragrafo 7 hanno mostrato che può essere una buona approssimazione della situazione reale, almeno per piccole distanze e in assenza di vento laterale.

E' stato anche mostrato come i dati, una volta normalizzati con il corrispondente valore a monte, non dipendono dalla velocità di avanzamento.

I valori qui riportati sono stati calcolati per velocità di avanzamento pari a 36 km/h,

assenza di vento, distanza tra le biciclette 50cm, allineamento perfetto.

Il livello di energia è riportato in Fig.8.1 per alcune distanze lungo la scia.

Il profilo completo è mostrato in Fig.8.2, confrontato con quello del ciclista singolo. I dati evidenziano l'elevato risparmio di cui beneficerebbe un ipotetico terzo ciclista, sensibilmente maggiore rispetto a quello del secondo ciclista.

Le differenze sono rilevanti per distanze fino



Fig.7.2 – Potenza in funzione dell’angolo del vento per coppia di ciclisti.

Distanza=50cm.
Velocità di avanzamento =36km/h.
Velocità del vento=12km/h.

l’utilizzo di una ruota posteriore lenticolare.

La velocità di avanzamento è stata fissata a 40 km/h e sono state considerate velocità del vento da 0 fino a 48 km/h.

Anche il Dottor Young ha trovato un incremento di resistenza. In particolare, per velocità del vento laterale pari al 33% della velocità di avanzamento, Young ha calcolato un valore pari a circa 1.2 per ruota tradizionale, circa 1.1 per ruota lenticolare (si noti che questa è una valutazione approssimata, da me ricavata dal grafico fornito da Young). Il valore 1.2 per ruota tradizionale è in accordo con il valore qui calcolato di Fig.5.1. L’accordo è buono anche per velocità del vento minori, mentre a velocità superiori la resistenza calcolata da Young aumenta meno rispetto a quanto calcolato qui. Questo è probabilmente dovuto alle differenze della morfologia del manichino, che assumono un effetto rilevante per velocità del vento maggiori, cioè a angoli di incidenza più alti, come discusso nel paragrafo 5. Inoltre non è noto se Young abbia considerato, tra i casi di vento da destra o da sinistra, quello migliorativo (come è mia ipotesi sulla base delle immagini che ho potuto vedere), quello peggiorativo oppure la media tra i due (come fatto qui).

Un risultato molto interessante riportato dal Dottor Young è che in assenza di vento il vantaggio dell’utilizzo di una ruota posteriore lenticolare è minimo: rispetto a una ruota tradizionale a raggi, la resistenza è inferiore di solo il 2%. Il vantaggio aumenta sensibilmente con la velocità del vento: ad esempio è di circa il 17% per velocità del vento pari a 32km/h (80% della velocità di avanzamento). Questo conferma le osservazioni del paragrafo 5.

- Il Dottor. Stephen Ferguson e il Dottor. Ross Zellat, Cd-adapco, Londra [Dynamics #25, estate 05], hanno studiato le prestazioni per le prove a cronometro a squadre, usando rispettivamente uno e nove manichini.

Hanno calcolato che la resistenza del corridore in seconda posizione nella fila è inferiore del 21% rispetto a quella del primo. Il terzo beneficia di un’ulteriore piccola riduzione di resistenza, mentre dal quarto all’ultimo la resistenza rimane costante. Nel caso della coppia di ciclisti qui è stata calcolata una riduzione di resistenza del secondo rispetto al primo pari al 28%. La differenza dei risultati si può imputare alle differenze dei manichini usati, visto che dalle immagini si desume che distanza e allineamento sono analoghe. Ferguson e Zellat hanno usato manichini in posizione più aerodinamica.

E’ quindi plausibile una scia minore e quindi un beneficio inferiore per chi segue.

Ferguson e Zellat hanno anche osservato la riduzione della resistenza del primo ciclista, valutandola tra 0.95 e 0.97.

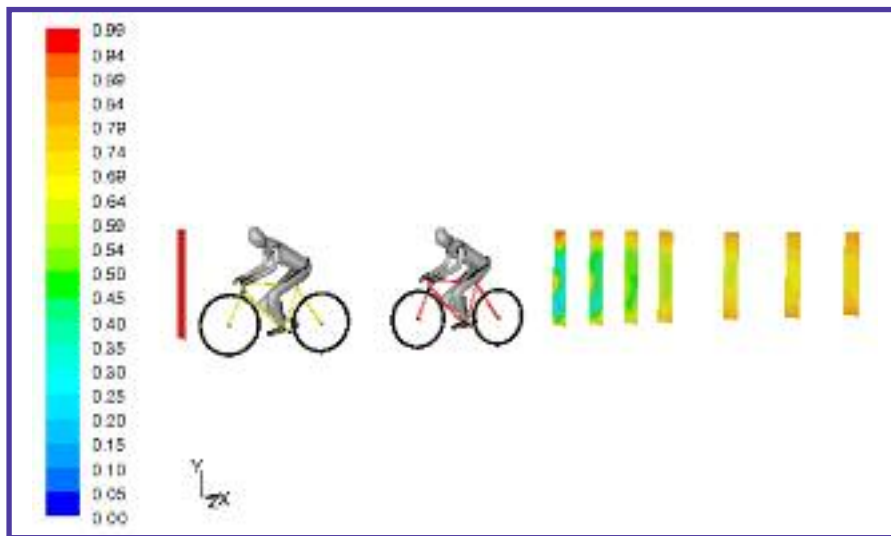


Fig.8.1 – “Livello di energia” per alcune distanze lungo la scia dei manichini.

I valori sono normalizzati rispetto alla posizione a monte.
Valori più bassi indicano una minore resistenza all’avanzamento di un corpo.

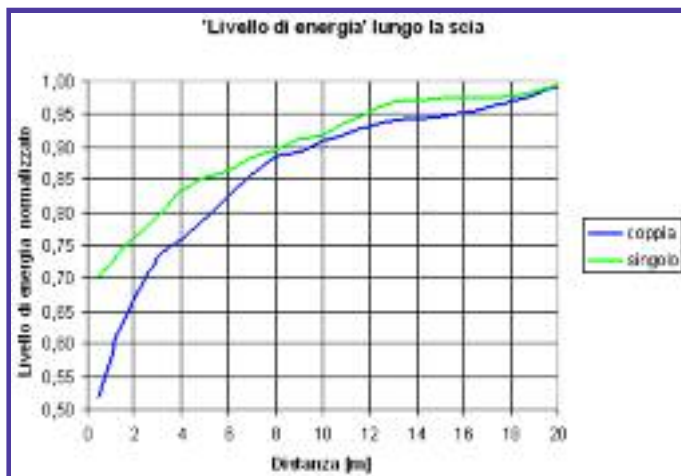


Fig.8.2 – “Livello di energia” lungo la scia : ciclista singolo e coppia.

Valori normalizzati rispetto alla posizione a monte.

La curva non è perfettamente lineare a causa della morfologia dei vortici nella scia.

a 4 metri (che a 36 km/h vengono percorsi in 4 decimi di secondo). Un possibile suggerimento che ne deriva è che non è strettamente necessario ridurre la distanza a meno di 50cm.

9. Lavori simili

Studi CFD analoghi a quello qui presentato sono stati condotti da altri autori. Non si ha qui la pretesa di darne un resoconto completo, poiché sono riportati solo i lavori di

cui sono a conoscenza al momento in cui scrivo.

- Il Dottor Richard Young, UKSI, Londra [Fluent News, primavera 2002], ha studiato gli effetti di vento laterale sui ciclisti. Ha concentrato l’attenzione sulla situazione di vento perfettamente laterale per un singolo manichino, e ha confrontato i risultati tra l’utilizzo di una ruota posteriore tradizionale a raggi e