

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Relazione per la prova finale

***«Valutazione dei parametri per l'ottimizzazione della
performance nel ciclismo: importanza della cura
dell'aerodinamica»***

Tutor universitario: Prof. F. Picano

Laureando: *Filippo Baldin*

Matricola: 1136438

Padova, 16/11/2023

Gli ultimi anni hanno visto un enorme progresso della tecnica nel ciclismo e una ricerca dei marginal gain al fine di massimizzare la performance.

OBIETTIVI:

Analizzare i parametri resistivi che influenzano la performance nel ciclismo con particolare attenzione agli aspetti aerodinamici.

Per fare ciò ci si concentrerà su:

- La definizione di performance
- La categorizzazione dei fattori resistivi
- L'analisi dell'aerodinamica nel ciclismo



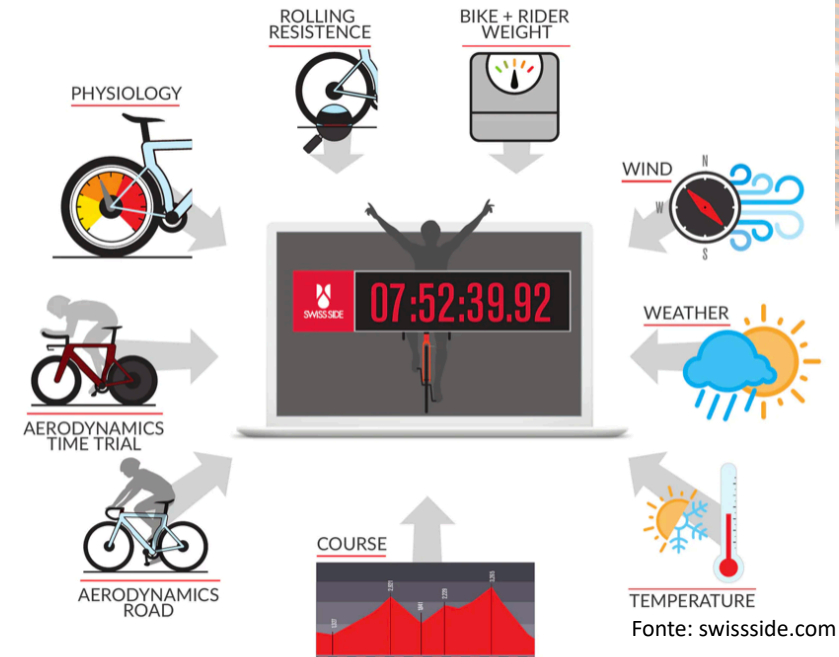
Fonte: teamineosgrenadiers.com

Per la terza legge della dinamica, la somma delle forze che agiscono su un ciclista è uguale alla somma delle forze che si oppongono al suo avanzamento.

Ciò si può scrivere come un'equazione di equilibrio:

$$F_{(+)} = F_{(-)} \text{ dove: } \rightarrow F_{(+)} = F_{tire}$$

$$F_{(-)} = F_{wind} + F_{gravity} + F_{rolling} + F_{vibration} + F_{inertia} + F_{mecc}$$



Esplicitando i termini e convertendoli in potenza si ottiene la formulazione di performance

$$P_{crank} = \frac{v_b}{c_{loss}} \left(\frac{1}{2} \rho v_w^2 C_d A + mg \sin(\theta) + c_{rr} mg \cos(\theta) + \frac{P_{abs}}{v_b} + a \left(m + \frac{I}{r^2} \right) + \mu mg \cos(\theta) \right)$$

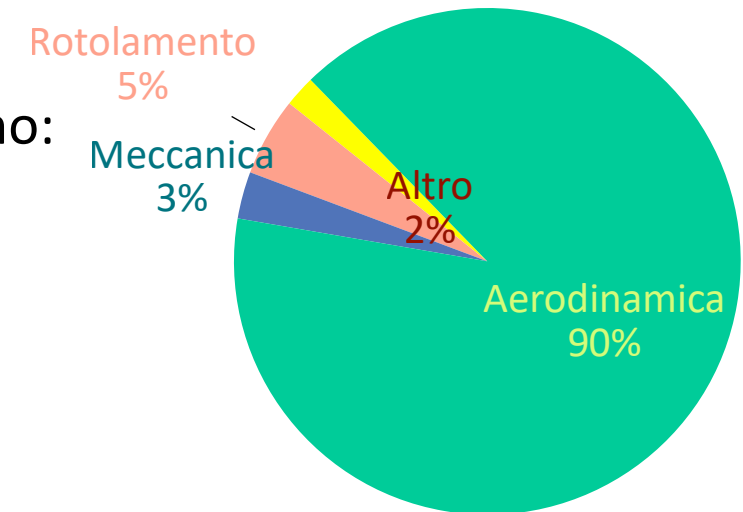
La risoluzione dell'equazione per la velocità descrive la relazione tra la velocità stessa e il sistema ciclista-bicicletta:

$$v_b = \frac{P_{crank} c_{loss}}{\underbrace{\frac{1}{2} \rho v_w^2 C_d A + mg \sin(\theta) + c_{rr} mg \cos(\theta) + \frac{P_{abs}}{v_b} + ma + \mu mg \cos(\theta)}_{F_{(-)}}}$$

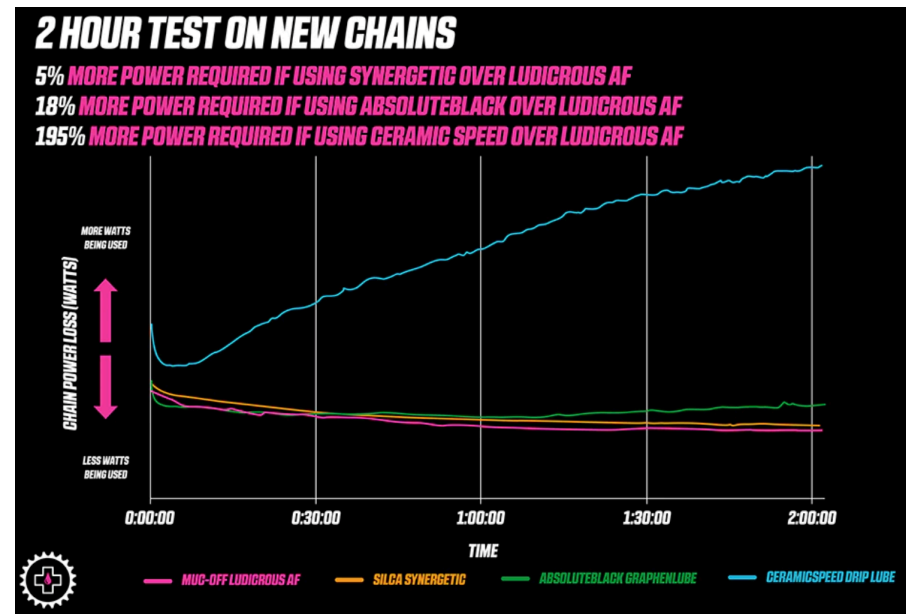
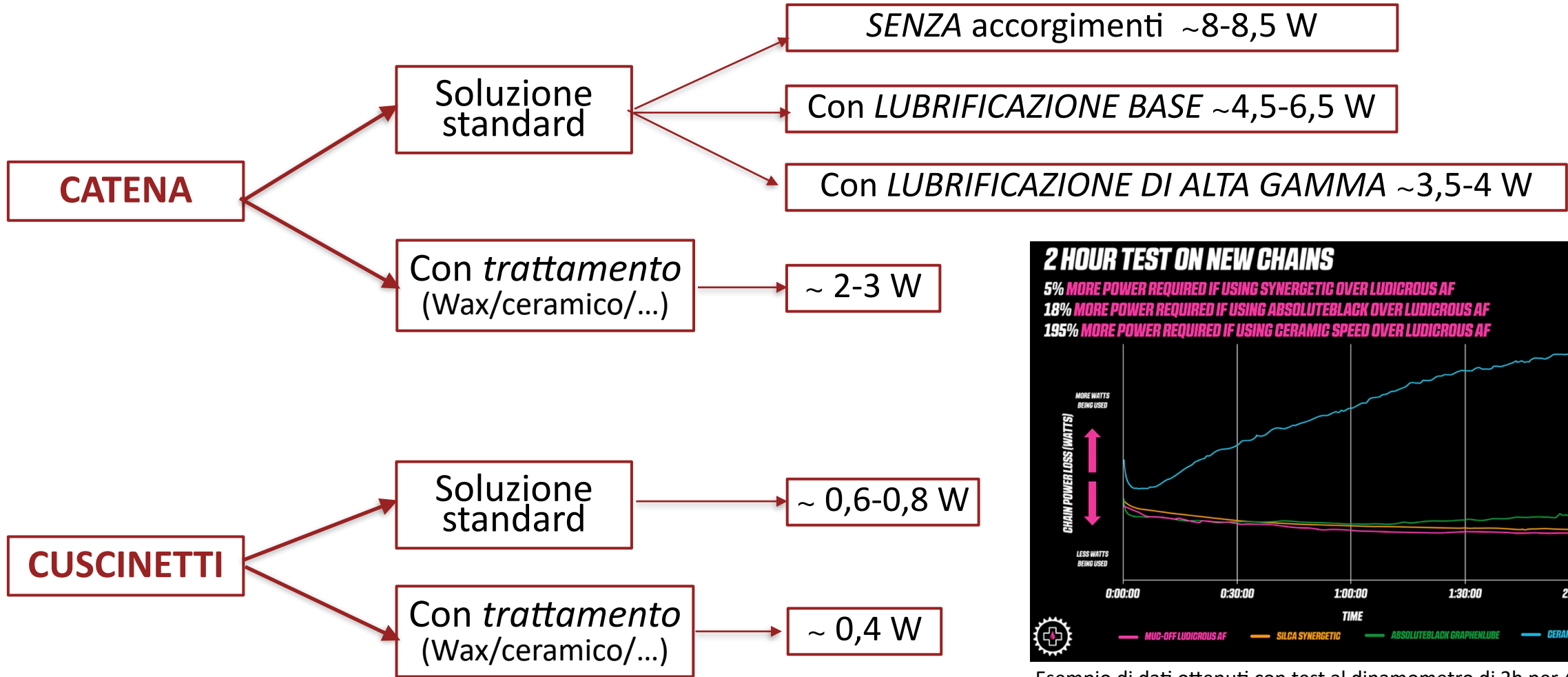
Per una data potenza espressa, la velocità d'avanzamento è inversamente proporzionale alla somma delle forze resistive.

Considerando il peso delle singole resistenze sul totale, le principali sono:

- La resistenza meccanica (~3%)
- La resistenza al rotolamento (~5%)
- La resistenza aerodinamica (~90%)



La **RESISTENZA MECCANICA** è generata dai fenomeni d'attrito nel sistema di trasmissione e nei cuscinetti.



Esempio di dati ottenuti con test al dinamometro di 2h per 4 catene con differenti lubrificanti (Fonte: muc-off.com)

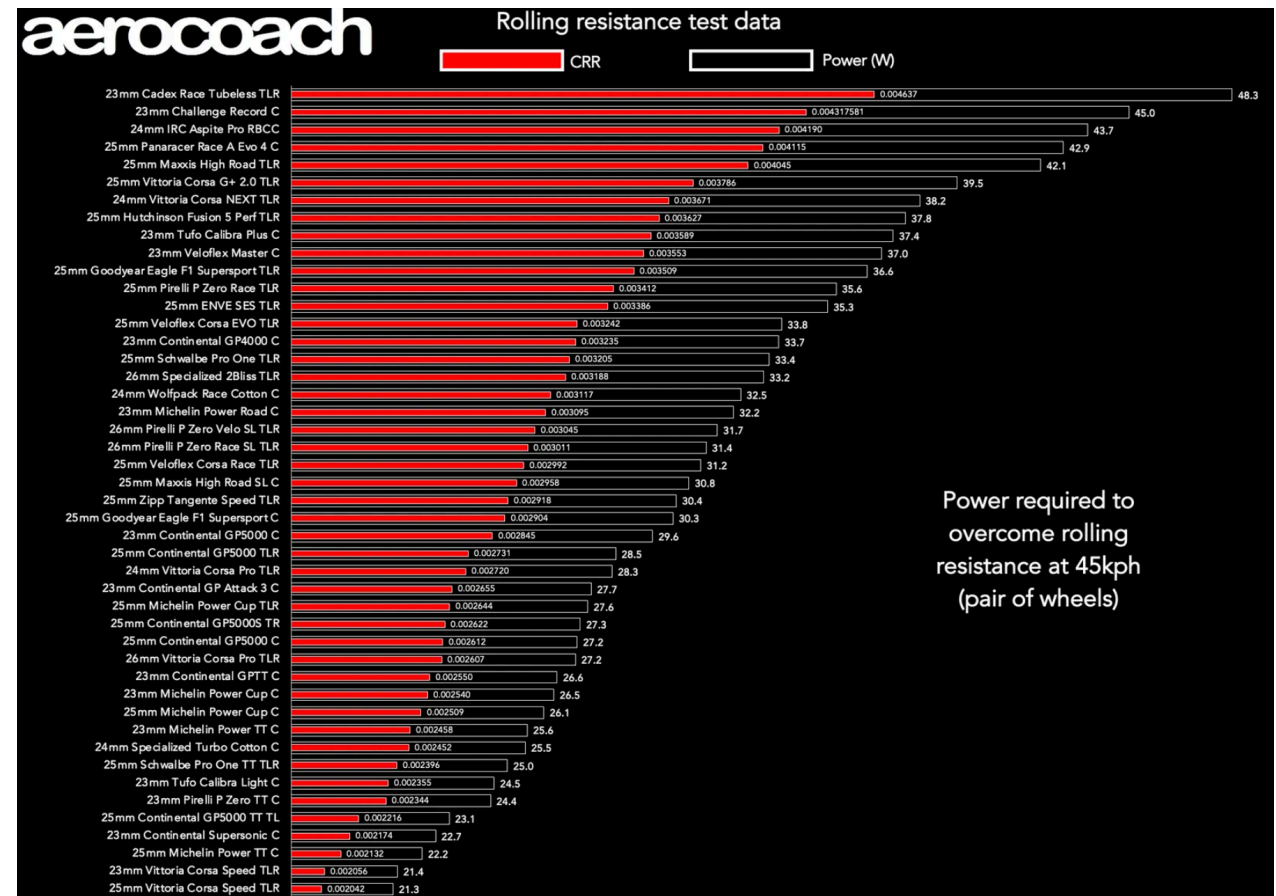
La **RESISTENZA AL ROTOLAMENTO** è generata dal moto d'avanzamento della ruota col suolo ed è calcolabile come la differenza d'energia per formare la sezione piatta a contatto col suolo e quanta energia lo pneumatico restituisce spingendo e tornando nella sua forma originale

In base alle configurazioni ruota-pneumatico e alla tipologia di copertura, valori tipici variano tra 20W e 40W



Riduzioni della resistenza sono ottenibili con:

- Camere d'aria in TPU o lattice
- Coperture Tubeless
- Cerchi con canale interno maggiore
- Cerchi con tecnologia Hookless



Lista delle resistenze al rotolamento delle principali coperture (clincher, tubolari e tubless) (Fonte: aero-coach.co.uk)

La **RESISTENZA AERODINAMICA** è generata dall'interazione del corpo col flusso d'aria che lo investe. Tale contributo è quantificabile come:

$$P_{wind} = v_b F_{wind} = v_b \frac{1}{2} \rho v_w^2 C_d A$$

Densità dell'aria

Funzione della pressione dell'aria, temperatura e umidità relativa. Un aumento della quota o particolari condizioni ambientali la minimizzano migliorando la prestazione

Coefficiente di resistenza

Consta di due termini:

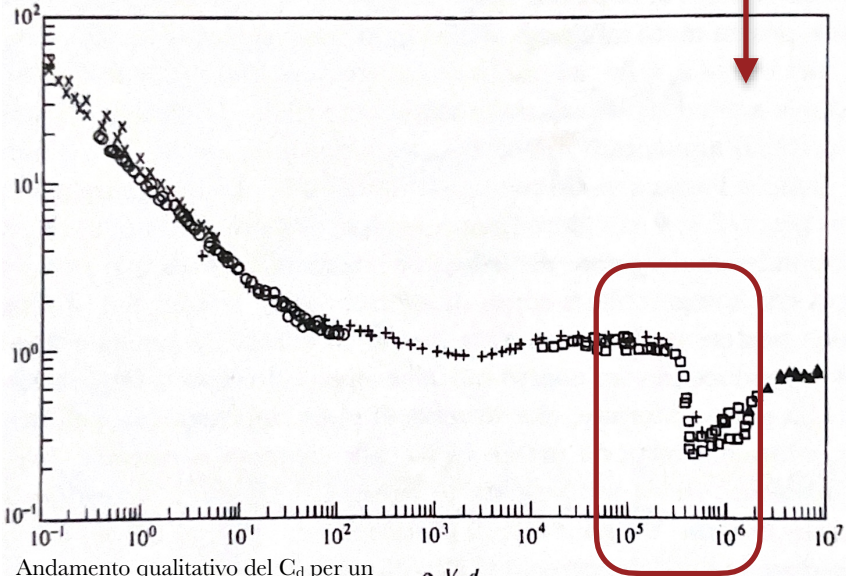
- la **resistenza d'attrito**: prodotta dal moto del fluido intorno al corpo. Parte dell'energia cinetica è trasformata in calore.
- la **resistenza di forma**: gli effetti viscosi modificano la distribuzione della pressione lungo il contorno del corpo. Si origina una scia a valle del corpo nella quale la pressione è più bassa del previsto.

Area Frontale

Dipende dalla massa, dall'altezza del corpo e dalla posizione del ciclista in bicicletta. Viene misurata con il metodo di pesatura delle fotografie o di digitalizzazione. Recentemente si usano scansioni 3D. Più è bassa più si è efficienti.

➔ Ciclisti e biciclette sono corpi tozzi caratterizzati da una complessa topologia del flusso e da una sua massiccia separazione. Per comprendere il flusso si approssimano le diverse parti del corpo con corpi tozzi semplificati come *cilindri*, il cui flusso è stato ampiamente studiato.

Nel ciclismo, il corpo dell'atleta viaggia spesso a **numeri di Reynolds (Re)** vicini a quelli di transizione rendendo sfruttabile il fenomeno della **drag crisis**

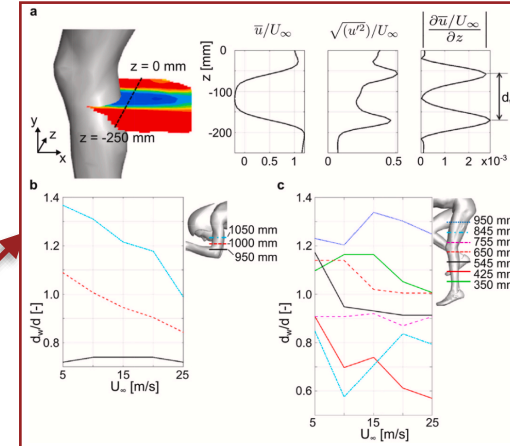


Andamento qualitativo del C_d per un corpo tozzo come il cilindro circolare $Re = \frac{\rho_{\infty} V_{\infty} d}{\mu_{\infty}}$ in funzione del numero di Reynolds (Fonte: Aerodinamica; Graziani)

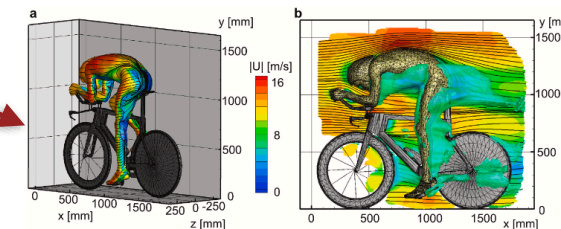
Il Re a cui inizia la drag crisis può essere diminuito aumentando la turbolenza del flusso incidente o cambiando le rugosità superficiali.

La valutazione dell'inizio della drag crisis per ogni parte del corpo porta all'identificazione del valore ottimale di rugosità da applicare per ciascuna zona del body

Valutazioni sulla resistenza di singole parti del corpo o di componenti devono essere correlate tra loro, la **Resistenza totale** è influenzata anche dall'interazione tra le scie delle diverse parti.

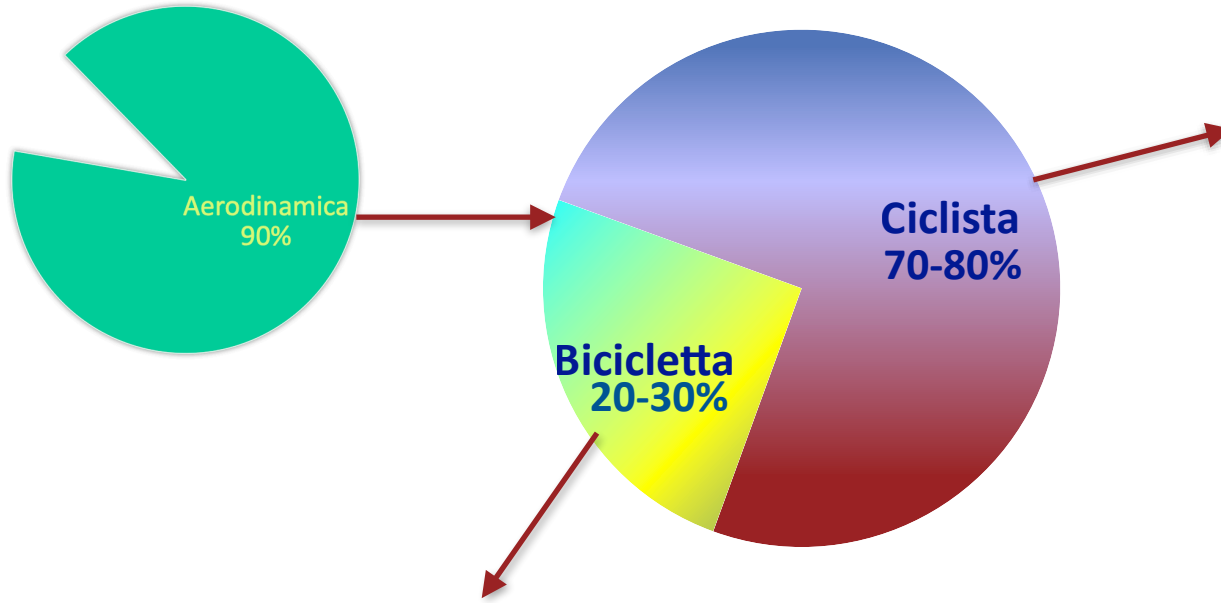


Valutazione aerodinamiche per, rispettivamente, una gamba e un braccio isolati



Valutazione della resistenza di ciclista e bici assieme

(Fonte immagini: Cyclist Aerodynamics through time: Better, faster, stronger; Malizia, Blocken)



Aerodinamica del **ciclista**:

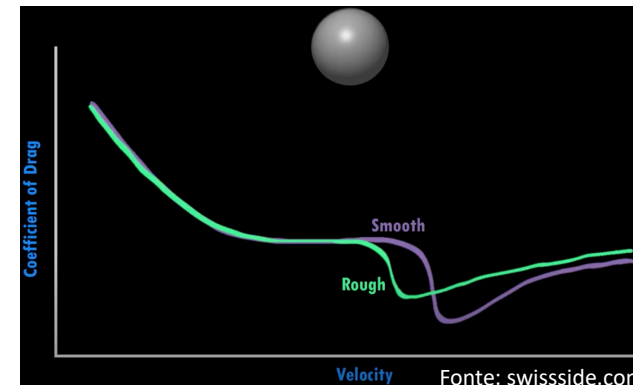
- **Posizioni** accurate minimizzano l'area frontale e garantiscono una gestione del flusso efficiente. Ottenibile un risparmio di decine di W;
- Scegliere un **casco** efficiente aerodinamicamente e adatto alle proprie esigenze fa risparmiare fino a 10W;
- **Abbigliamento** aderente, con disposizione dei tessuti per gestione del flusso e ottimizzazione dei vortici fa risparmiare anche 20-30W;
- La cura di altre **componenti indossabili**: calzini, copriscarpa, guanti, scarpe.

Aerodinamica della **Bicicletta**:

- Cura del progetto del **kit telaio**;
- **Integrazione** linee idrauliche e cablaggi;
- **Ruote** con profilo aerodinamico a vari angoli di imbardata; sistema di ritenzione hookless; superficie martellata;
- **Manubri** o pieghe con flare (~5°) per ottimizzare posizionamento e area frontale.



Fonte: sram.com/zipp

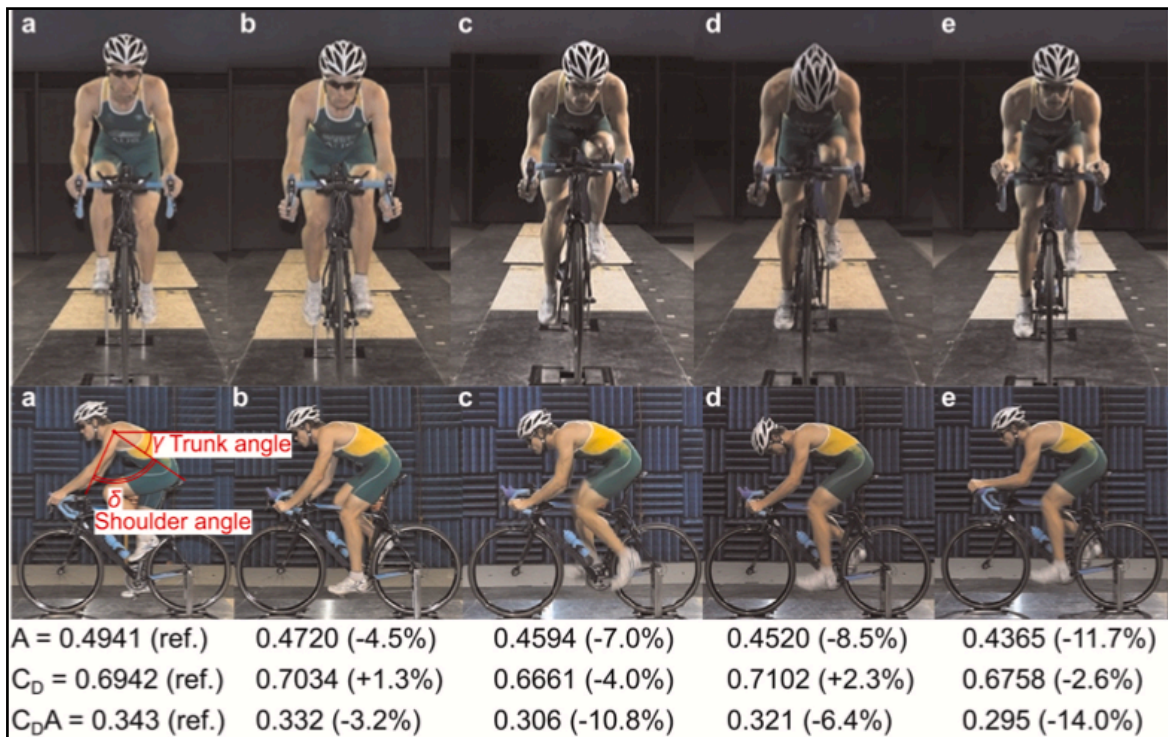


Fonte: swisside.com



Fonte: pinarello.com

Ottimizzare la **posizione in sella** permette di ridurre sia l'area frontale sia il Cd



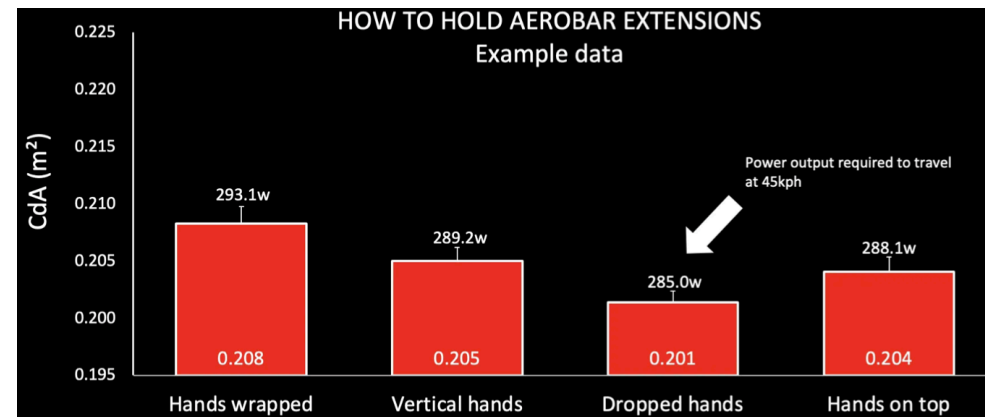
Resistenze aerodinamiche per le posizioni più impiegate.

(Fonte: Cyclist Aerodynamics through time: Better, faster, stronger; Malizia, Blocken)

Ottimizzare il posizionamento delle **mani** può far risparmiare, in posizione TT, circa **8 W**

Dall'analisi delle posizioni si rileva che i ciclisti dovrebbero avere un angolo del tronco basso (γ) per ridurre la resistenza aerodinamica, mantenendo le braccia all'interno della silhouette del corpo e con gli occhi rivolti in avanti. In questa posizione (e), sono state rilevate minori perturbazioni del flusso e una minore intensità di turbolenze nella scia

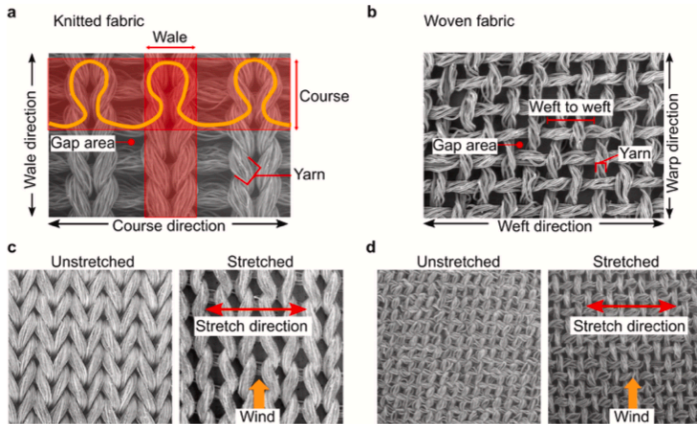
Risparmi del **20% circa**



Fonte: aero-coach.co.uk

Abbigliamento e accessori come guanti, copri-scarpe, calzini, hanno un'incidenza elevata sulla performance di un atleta. Al giorno d'oggi tutti i prodotti vengono sviluppati partendo da analisi CFD e WT

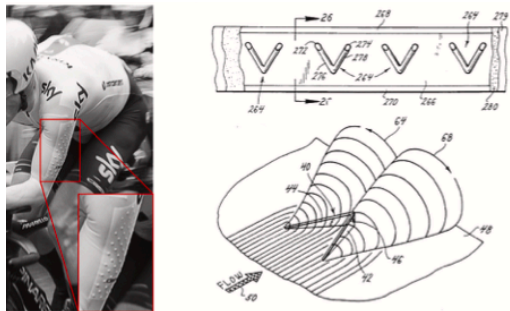
TIPOLOGIE DI FILATI: (a) a maglia: (b) intrecciato



Tali analisi permettono di ottimizzare la resa dell'abbigliamento in base alle caratteristiche del corridore, al tipo di competizione, e permette di definire il taglio, il tipo di filato e tipologie e posizionamento di cuciture e zip

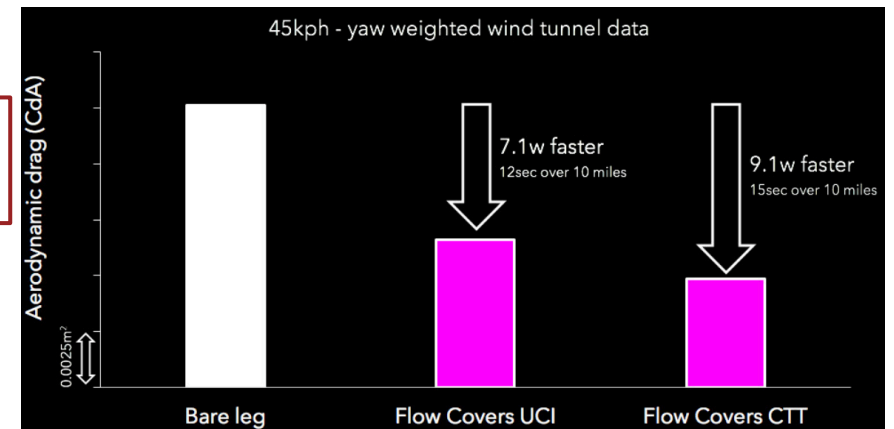
Curando la progettazione dei capi e scegliendo quelli più adatti alle proprie esigenze si può ottenere, a parità di condizioni del flusso incidente e di velocità d'avanzamento un **Risparmio tra 20-50 W circa**

ESEMPI DI APPLICAZIONE DI MACRO-RUGOSITÀ:
generatori di vortici "wheeler"



(Fonte: Cyclist Aerodynamics through time: Better, faster, stronger; Malizia, Blocken)

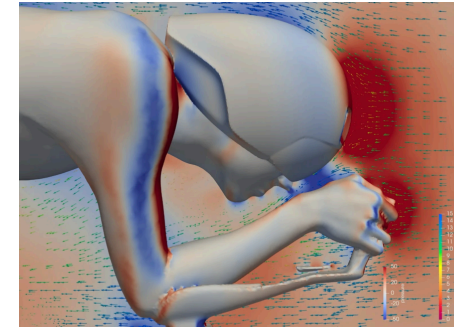
Un **copri-scarpa** può far risparmiare tra **7,1-9,1 W** rispetto il solo calzino



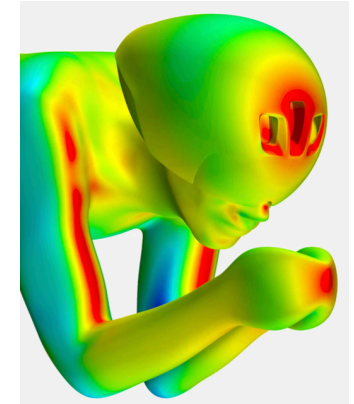
Il **casco** riveste notevole importanza aerodinamica poiché la testa, insieme a braccia e mani, è la prima parte del corpo che incontra il flusso d'aria e quindi incide in modo notevole sia sulla resistenza sia sull'area frontale

Considerando stesse tipologie di prodotti ci possono essere differenze tra **~6-10 W** circa

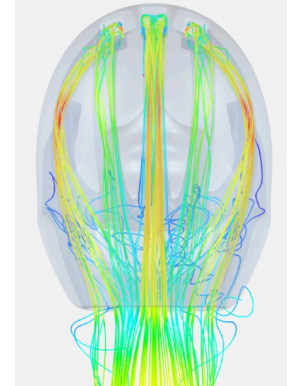
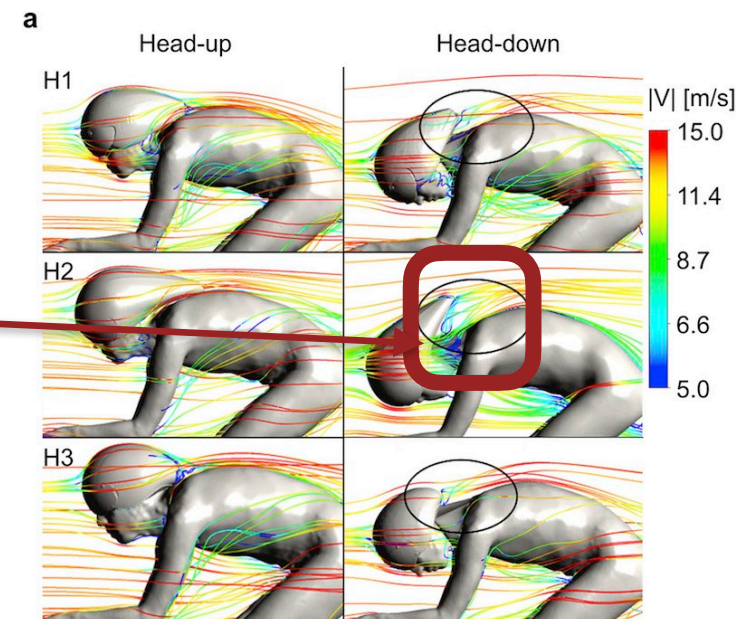
Per un casco, quello che fa realmente la differenza è il suo effettivo funzionamento sul singolo individuo, ognuno si differenzia per area frontale e l'adattamento del casco alla morfologia della testa. In definitiva, per ottimizzare il flusso, si minimizzano i differenziali di pressione tra la parte terminale del casco e la schiena o si impediscono distacchi del flusso, come si vede nella Figura a lato



Fonte: aero-coach.co.uk



www.dii.unipd.it



(Fonte: pocsports.com)

La **bici** incide per circa il 20-30% della resistenza aerodinamica complessiva. La progettazione moderna prevede:

- Lo sviluppo di un sistema bici integrato → Tutti i componenti devono essere sviluppati e testati insieme per ottimizzare i benefici complessivi
- Ottimizzare il profilo delle tubazioni → le più usate sono le cosiddette “D-shape” o quelle Naca per ottimizzare l'area frontale e garantire il miglior scorrimento del flusso attorno al telaio.



Esempi di questi atteggiamenti sono:

- L'integrazione delle linee idrauliche e cablaggi all'interno del telaio;
- Lo sviluppo di downtube per ridurre l'esposizione al flusso delle borracce;
- La diffusione di manubri con un certo flare (~5°): permettono di minimizzare l'area frontale e consentono una posizione raccolta delle spalle che ottimizza il posizionamento in sella.
- Realizzazione di appendici da cronometro che seguono la morfologia delle braccia e ottimizzano il flusso.



Rispetto a generazioni di prodotti che non prevedevano una cura aerodinamica gli attuali sono in grado di garantire risparmi di circa **10-20 di W**.

La **performance** nel ciclismo è influenzata da numerosi elementi e variabili di cui la più importante è **L'AERODINAMICA.**

un attento studio dell'aerodinamica permette di ottenere un guadagno di performance significativo, tra **5 e 25%**, molto di più rispetto al miglioramento di qualsiasi altro fattore resistivo.



la cura dell'aerodinamica attraverso una posizione in sella e del vestiario adeguati generano un guadagno di performance paragonabile o superiore a quello garantito da una bicicletta con materiali più pregiati, ruote e altri elementi meccanici o da mesi di allenamento. Il tutto è caratterizzato da costi sensibilmente più bassi

Possibili ulteriori **SVILUPPI E PROGRESSI FUTURI** nell'aerodinamica applicata al ciclismo sono:

- *L'affinamento degli strumenti CFD* al fine di rappresentare al meglio il maggior numero di condizioni possibili, oltre all'ideale flusso d'approccio a bassa turbolenza impiegato nei test WT, nelle simulazioni CFD e nei test su pista al coperto.
- *Ulteriore sviluppo di kit telaio*, per esempio con l'applicazione di generatori di vortici o nuove geometrie delle tubazioni, alla luce dei recenti spazi normativi, magari favoriti dall'introduzione di nuovi materiali costruttivi.