



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA AEROSPAZIALE**

# **Preparazione e Analisi dati di un test in galleria del vento di prototipo MotoStudent**

**Relatore:**

**Prof. Gabriele Bellani**

**Presentata da:**

**Giovanni Battista Cavallaro**

---

**Sessione del 12/2023**

**Anno Accademico 2022/2023**



# Indice

1	Introduzione.....	1
1.1	MotoStudent.....	2
2	Background teorico.....	4
2.1	Aerodinamica di una moto da corsa.....	4
2.1.1	Resistenza.....	5
2.1.2	Portanza e Momento di Beccheggio.....	7
2.1.3	Effetto delle forze aerodinamiche sul moto rettilineo di una moto.....	9
2.1.4	Ulteriori effetti aerodinamici.....	10
2.2	Fluidodinamica Computazionale.....	12
2.2.1	Equazioni di Navier-Stokes mediate alla Reynolds.....	13
2.2.2	Strato Limite.....	15
2.2.3	Modellazione della rotazione delle ruote.....	17
2.3	Galleria del Vento.....	19
2.3.1	Struttura tipica di una galleria del vento a bassa velocità.....	19
2.3.2	Montaggio del modello e modellazione della strada.....	23
2.3.3	Differenze tra galleria del vento e comportamento in pista.....	25
3	Setup sperimentale.....	29
3.1	Aerotunnel.....	29
3.2	Modello.....	30
3.3	Obiettivi dell'esperimento e prove effettuate.....	32
3.4	Simulazioni numeriche.....	37
4	Risultati.....	40
4.1	Svolgimento delle prove e acquisizione dati.....	40
4.2	Aeromappa.....	41
4.3	Prove sulla geometria delle carene.....	45
4.4	Ottimizzazione postura pilota.....	48
4.5	Posizione di frenata.....	51
4.6	Confronto con simulazioni numeriche.....	52

5	Conclusioni.....	58
5.1	Sviluppi futuri.....	59
6	Bibliografia.....	61
	Appendice A.....	64
	Appendice B.....	67
	Appendice C.....	68
	Appendice D.....	70
	Appendice E.....	72
	Ringraziamenti.....	75

# 1 Introduzione

La ricerca applicata al mondo del motorsport ha come fine ultimo lo sviluppo di un veicolo che in pista sia più veloce della concorrenza. Questa tesi in particolare affronta il problema dell'ottimizzazione delle prestazioni di una moto da corsa tramite uno studio della sua aerodinamica.

Se confrontato con i veicoli a quattro ruote, il campo dell'aerodinamica delle moto da corsa è più giovane e presenta alcune peculiarità. Durante un giro di pista, il pilota di una moto da corsa sfrutta la sua posizione in sella per influenzare a suo vantaggio la dinamica della moto. L'esistenza di uno spettro continuo di posizioni che il pilota può assumere, così come la capacità delle moto moderne di affrontare le curve ad elevatissimi angoli di piega, rende lo studio dell'aerodinamica di una moto da corsa un argomento complesso. Non stupisce quindi che la ricerca aerodinamica si stia a lungo concentrata sulla riduzione della resistenza e che solamente negli ultimi decenni siano state prese in considerazione le altre componenti della forza aerodinamica [1], [2], [3].

L'oggetto dello studio presentato in questa tesi è il prototipo MotoStudent Electric del team UniBo Motorsport. La maggior parte degli studi svolti su prototipi MotoStudent si concentra sulla fase di progettazione delle carene della moto attraverso studi di fluidodinamica computazionale [4], [5], fa eccezione il lavoro di K. Wiński e A. Piechna [6] che sfruttano il modello di una MotoStudent elettrica per effettuare un'analisi su diversi modelli di turbolenza. Questo elaborato si allontana da questi lavori precedenti in quanto si concentra su una fase successiva e probabilmente più importante, la validazione delle simulazioni svolte attraverso uno studio del prototipo in galleria del vento.

Sono due gli obiettivi dei test svolti, il primo e più importante è l'ottimizzazione aerodinamica della moto, che si traduce nella ricerca di soluzioni per ridurre la resistenza aerodinamica. Il secondo obiettivo è la validazione degli strumenti di fluidodinamica computazionale utilizzati dal team durante lo sviluppo del prototipo. Per ridurre le possibili differenze tra le simulazioni numeriche e l'analisi in galleria del vento è stata sfruttata una tecnica, già utilizzata in ambito automobilistico, che prevede l'introduzione del modello virtuale di moto all'interno di una geometria rappresentativa della galleria del vento [7]. Per avere un riscontro con il comportamento in pista della

moto, le simulazioni sono state ripetute utilizzando un dominio di calcolo di dimensioni maggiori e condizioni al contorno rappresentative del movimento di strada e ruote.

L'elaborato è suddiviso in quattro sezioni, dopo questa introduzione verrà presentata la teoria alla base delle attività svolte. Verrà affrontato il tema dell'aerodinamica di un prototipo motociclistico da corsa ponendo particolare attenzione alle forze agenti sul piano longitudinale del veicolo e agli effetti di queste nel moto rettilineo. Saranno presentate le tecniche di fluidodinamica computazionale (CFD) per l'analisi aerodinamica di un veicolo, in particolare le equazioni di Navier-Stokes mediate alla Reynolds (RANS) e il  $k-\omega$  SST come modello di turbolenza. Nell'ultima parte di questa sezione teorica verrà presentata la galleria del vento come strumento di analisi e validazione aerodinamica e ne saranno descritte le principali componenti.

La terza sezione della tesi è dedicata alla descrizione della configurazione dell'esperimento, saranno presentate le caratteristiche della galleria del vento, i dettagli del modello utilizzato e una descrizione degli obiettivi e delle prove svolte. Infine, verrà affrontato il tema del setup delle simulazioni numeriche, la scelta del dominio di calcolo e delle condizioni al contorno che meglio modellano il problema in analisi.

Nell'ultima sezione dell'elaborato verranno presentati i dati ottenuti dalle prove svolte in galleria del vento e sarà effettuata un'analisi di questi risultati, anche attraverso un confronto con le simulazioni CFD.

## 1.1 MotoStudent

MotoStudent è una competizione internazionale interuniversitaria organizzata da Moto Engineering Foundation e TechnoPark MotorLand. L'obiettivo di questa competizione è il progetto e la realizzazione di un prototipo di moto da corsa che verrà valutato in un evento finale presso il circuito di Aragón. MotoStudent ha cadenza biennale ed è suddivisa nelle seguenti categorie:

- **MotoStudent Petrol:** riservata alle moto dotate di un motore a combustione interna.
- **MotoStudent Electric:** riservata alle moto con propulsione 100% elettrica.

La competizione è strutturata in due fasi dal nome MS1 e MS2, ognuna della quali permette di ottenere un massimo di 500 punti. Durante la fase MS1 è richiesto alla

squadra di giustificare le scelte fatte durante la progettazione, lo sviluppo e la costruzione del prototipo. La fase MS2 consiste invece in una serie di prove aventi lo scopo di valutare il comportamento dinamico e le prestazioni del prototipo.

Data la natura ingegneristica della competizione, il regolamento tecnico permette grande libertà progettuale alle squadre. Sono comunque presenti norme che puntano a salvaguardare la sicurezza dei partecipanti e garantire un livello di prestazioni relativamente bilanciato. Le dimensioni della moto sono limitate ed in linea con la categoria Moto3, sono inoltre introdotti dei componenti standard come il motore, le gomme e l'impianto frenante. Nella seguente tabella sono riportate alcune delle caratteristiche del prototipo di UniBo Motorsport, Nemesi.

*Tabella 1.1 Caratteristiche del prototipo MotoStudent di UniBo Motorsport*

<b>Nemesi</b>	
Peso (senza pilota)	< 130 kg
Massima velocità	> 190 km/h
Telaio	Perimetrale in fibra di carbonio
Forcellone	Alluminio fresato CNC
Gomme	Dunlop Moto3
Motore	Sincrono a magneti permanenti
Massima coppia	120 Nm
Massima potenza	48 kW
Massima velocità	7500 rpm
Batteria	Celle a ioni di litio
Massima tensione	126 V

## 2 Background teorico

### 2.1 Aerodinamica di una moto da corsa

In Figura 2.1 è rappresentato un sistema di coordinate cartesiane la cui origine coincide con il punto di contatto tra la ruota posteriore e il terreno, l'asse  $x$  ha verso opposto alla direzione del moto, l'asse  $z$  è verticale e punta verso il cielo, l'asse  $y$  è ortogonale agli altri due e il verso è conseguenza della convenzione della mano destra. In questo sistema di riferimento è possibile scomporre la forza e il momento aerodinamico nelle seguenti componenti:

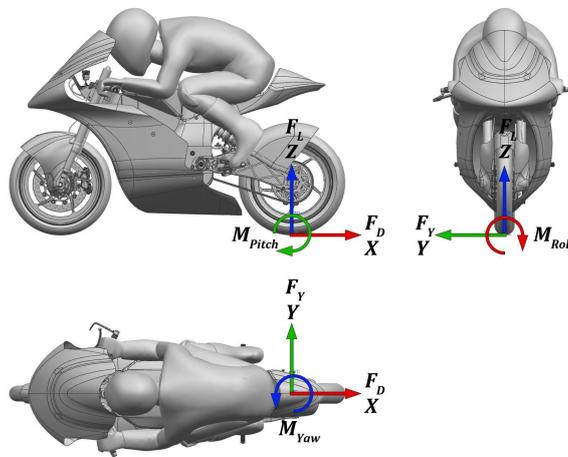


Figura 2.1 Rappresentazione del sistema di riferimento e relativa scomposizione della forza aerodinamica

- $F_D$ : componente della forza in direzione  $X$ , viene chiamata Resistenza o con il corrispettivo inglese, Drag.
- $F_L$ : componente della forza in direzione  $Z$ , prende il nome di Portanza, in inglese Lift. Nel caso questa abbia un valore negativo, quindi una componente di forza verso il terreno, è possibile che venga indicata come Downforce, o Deportanza.
- $F_Y$ : componente della forza in direzione  $Y$ , viene chiamata Forza laterale o Side force.
- $M_{Roll}$  indica la componente del momento nell'asse  $X$ , viene chiamato Momento di Rollio.
- $M_{Pitch}$  indica la componente del momento nell'asse  $Y$ , viene chiamato Momento di Beccheggio.
- $M_{Yaw}$  indica la componente del momento nell'asse  $Z$ , viene chiamato Momento di Imbardata.

Le forze e i momenti aerodinamici mostrano una dipendenza dal quadrato della velocità, nella descrizione delle caratteristiche di un corpo può risultare quindi conveniente l'introduzione di coefficienti adimensionali (Tabella 2.1). Questi coefficienti sono ottenuti dividendo le forze per la pressione dinamica  $q_{din} = 0.5 \rho v^2$ , per un'area di riferimento  $A$ , e nel caso dei momenti anche per una lunghezza di riferimento  $l_{rif}$ . In campo automobilistico l'area di riferimento utilizzata è solitamente l'area della proiezione del corpo nella direzione longitudinale (area frontale), la scelta della lunghezza ricade invece sul passo del veicolo.

Tabella 2.1: Definizione dei coefficienti aerodinamici

$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho v^2 A}$	$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho v^2 A}$	$C_Y = \frac{F_Y}{\frac{1}{2} \rho v^2 A}$
$C_{M_{Roll}} = \frac{M_{Roll}}{\frac{1}{2} \rho v^2 A l_{rif}}$	$C_{M_{Yaw}} = \frac{M_{Yaw}}{\frac{1}{2} \rho v^2 A l_{rif}}$	$C_{M_{Pitch}} = \frac{M_{Pitch}}{\frac{1}{2} \rho v^2 A l_{rif}}$

In alcune situazioni risulta complesso calcolare l'area frontale, oppure potrebbe essere presente la volontà di considerare anche l'effetto della dimensione del corpo all'interno del coefficiente. In questi casi è pratica comune utilizzare un'area di  $1m^2$  come riferimento. Per distinguere questi nuovi coefficienti da quelli tradizionali (Tabella 2.1) viene aggiunta la lettera "A", ad esempio  $C_D A$ .

## 2.1.1 Resistenza

Il drag generato da un corpo può essere scomposto in più componenti sulla base del fenomeno fisico all'origine della resistenza:

- **Resistenza di Attrito:** dovuta agli sforzi tangenziali ( $\tau$ ) sulla parete del corpo. Questi sono generati dalla differenza di velocità tra il fluido e la superficie del corpo e dalla viscosità del fluido stesso.
- **Resistenza di Forma:** dovuta alla differente distribuzione di pressione tra la superficie frontale e posteriore di un corpo, per effetto del distacco del flusso dalla sua superficie.

- **Resistenza Indotta:** in ambito aerospaziale è la componente di resistenza proporzionale alla portanza generata, dovuta alla tridimensionalità del flusso attorno ad un'ala di ampiezza finita e alla conseguente generazione di vortici di estremità.
- **Resistenza d'Onda:** dovuta al manifestarsi di onde d'urto quando il flusso attorno ad un corpo entra nel regime transonico o supersonico.

Restringendosi ora al campo motociclistico e fatta eccezione dei prototipi da record di velocità, è possibile affermare che il regime in cui opera una moto è strettamente subsonico. Di conseguenza la componente di resistenza d'onda può essere considerata nulla. Sempre con l'eccezione dei veicoli per record di velocità, dotati di carenature aerodinamiche dalle dimensioni notevoli e che coprono l'intero prototipo, la geometria di una moto è tale da farla rientrare nella categoria dei *corpi tozzi* (Figura 2.2). Per questi corpi la scia<sup>1</sup> assume dimensioni paragonabili a quelle del corpo stesso e il contributo della resistenza di forma risulta significativamente maggiore rispetto alla resistenza d'attrito.

		pressure drag	viscous drag
a)	cross-flow plane plate	100%	0%
b)	racebike	95%	5%
c)	sphere	90%	10%
d)	ellipsoid	60%	40%
e)	airfoil	10%	90%
f)	long-flow plane plate	0%	100%

Figura 2.2 Contributo della resistenza di forma e attrito per diversi corpi  
(immagine da C. Feichtinger [8] )

Sempre per effetto della forma del corpo, la resistenza risulta essere la componente della forza aerodinamica che influisce maggiormente sulle prestazioni di una moto. Il parametro su cui l'influenza del drag risulta più evidente è la massima velocità

<sup>1</sup> Regione di flusso rotazionale e generalmente turbolento causata dal distacco dello strato limite dalle pareti del corpo

raggiungibile. Data  $P_{disp}$  la potenza disponibile alla ruota e trascurando i contributi alla resistenza di origine non aerodinamica, la condizione di massima velocità ( $v_{max}$ ) viene raggiunta quando l'intera potenza del motore viene dissipata dalle forze aerodinamiche:

$$P_{disp} = P_{aero} \quad (2.1.1)$$

$$P_{aero} = F_D \cdot u_{max} = \frac{1}{2} \rho C_D A v_{max}^3 \quad (2.1.2)$$

$$v_{max} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot P_{disp}}{\rho C_D A}} \quad (2.1.3)$$

Per massimizzare la velocità e ridurre i consumi risulta evidente la necessità di minimizzare la potenza dissipata per effetto della resistenza aerodinamica. Gli unici parametri su cui è possibile lavorare in fase di progetto sono il coefficiente di resistenza e l'area frontale. Per minimizzare la resistenza è quindi necessario lavorare sulla forma della carenatura ( $C_D$ ), sulle dimensioni della moto e sulla posizione di guida del motociclista ( $A$ ).

## 2.1.2 Portanza e Momento di Beccheggio

Pur essendo la resistenza la principale forza aerodinamica agente nel piano XZ, l'effetto della portanza sul comportamento della moto è comunque non trascurabile. Una forza verticale  $F_L$  positiva va infatti a ridurre il carico agente sulle ruote della moto, portando ad una riduzione nella tenuta di strada alle alte velocità [9]. Il carico sulle ruote non è però influenzato solamente dalle forze ma anche dall'effettiva distribuzione della pressione sulla moto. Da Figura 2.3 risulta evidente come, utilizzando il sistema di riferimento presentato in Figura 2.1, alla portanza e resistenza è accompagnato un momento  $M_{pitch}$  positivo. Questo momento di beccheggio genera una ulteriore forza verticale diretta verso l'alto sulla ruota anteriore, il contributo sulla ruota posteriore risulta invece essere opposto. Questo fenomeno è noto come trasferimento di carico.

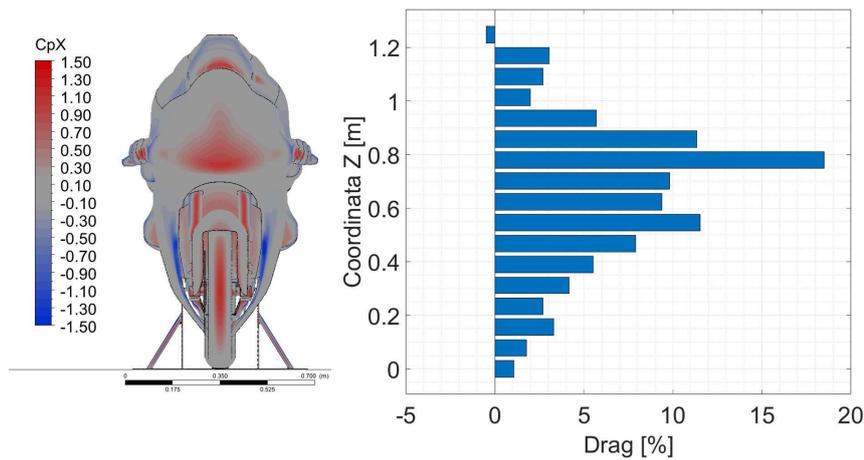


Figura 2.3 Grafico della percentuale di resistenza generata a diverse altezze da terra. A sinistra un contour di  $CpX^2$  mette in evidenza le zone della moto che contribuiscono maggiormente alla generazione di drag

Uno degli obiettivi della generazione di downforce su una moto risulta quindi essere la riduzione del cosiddetto “front wheel lift” [8] (Figura 2.4). La strategia attualmente più utilizzata per combattere questo fenomeno è l’uso di alette sulla parte frontale del cupolino, introdotte per la prima volta in MotoGP nella stagione 2016. Questo argomento è trattato più nel dettaglio nei lavori di B. González Arcos [1], che presenta uno studio sulle appendici aerodinamiche della stagione MotoGP 2020, e di G. Peri e J. Capuana [2] che studiano la scelta del corretto profilo alare da utilizzare per massimizzare la downforce e ridurre il tempo sul giro.

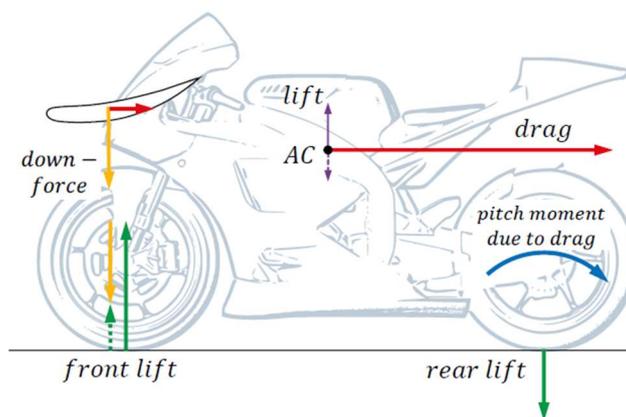


Figura 2.4 Forze aerodinamiche sul piano XZ di una moto (immagine da C. Feichtinger [8])

<sup>2</sup> Dato il prodotto tra lo scalare coefficiente di pressione ( $C_p = \frac{p}{0.5\rho v^2}$ ) e il vettore normale alla superficie,  $CpX$  è la componente lungo la direzione X di questo prodotto

## 2.1.3 Effetto delle forze aerodinamiche sul moto rettilineo di una moto

Nel capitolo 2.1.1 è stato affrontato l'effetto della resistenza sulla massima velocità della moto. Per completare la trattazione del moto rettilineo si vanno ora ad affrontare le manovre di accelerazione e frenata.

Per l'accelerazione di una moto è possibile individuare due limiti: il primo causato dalla perdita di trazione, il secondo invece dall'impennata [10]. Per facilitare la trattazione si prende ora un modello semplificato del sistema in cui si suppone che la forza di resistenza aerodinamica  $F_D$  sia applicata nel baricentro e che siano nulle la forza di resistenza al rotolamento e la portanza  $F_L$ .

*Tabella 2.2 Raccolta delle variabili utilizzate nella seguente trattazione*

Simbolo	Descrizione
$m$	massa di moto e pilota
$S$	spinta generata alla ruota posteriore
$\ddot{x}$	accelerazione
$g$	accelerazione di gravità
$x_{CG}$	distanza lungo l'asse x tra ruota posteriore e baricentro
$p$	passo della moto
$z_{CG}$	distanza lungo l'asse z tra ruota posteriore e baricentro
$\mu_p$	coefficiente di attrito longitudinale tra ruota e asfalto
$\mu_{lat}$	coefficiente di attrito laterale tra ruota e asfalto

L'accelerazione della moto può essere scritta come:

$$m\ddot{x} = S - F_D \quad (2.1.4)$$

La spinta generata è limitata dal carico verticale sulla ruota posteriore  $N_r$  e dal coefficiente di attrito tra ruota e asfalto  $\mu_p$ .

$$S \leq \mu_p \cdot N_r \quad (2.1.5)$$

$$N_r = mg \frac{(p - x_{CG})}{p} + S \frac{z_{CG}}{p} \quad (2.1.6)$$

Per effetto della perdita di trazione il vincolo sulla accelerazione risulta essere:

$$\ddot{x} \leq \frac{\mu_p \cdot g \cdot \frac{(p - x_{CG})}{p}}{\left(1 - \mu_p \frac{z_{CG}}{p}\right)} - \frac{F_D}{m} \quad (2.1.7)$$

La condizione limite per l'insorgere del fenomeno dell'impennata si raggiunge quando il carico verticale sulla ruota anteriore  $N_f$  è zero. Il valore dell'accelerazione in questa condizione risulta essere:

$$\ddot{x} = g \frac{x_{CG}}{z_{CG}} - \frac{F_D}{m} \quad (2.1.8)$$

In entrambe le formule, (2.1.7) e (2.1.8), la resistenza aerodinamica ha un effetto negativo, riducendo la massima accelerazione raggiungibile a velocità più elevate.

Un effetto opposto si ha invece durante la fase di frenata, in questa condizione la resistenza aerodinamica va ad influire positivamente sulla massima decelerazione della moto. Il drag fornisce infatti un ulteriore rallentamento che non è limitato dalla tenuta degli pneumatici, inoltre la presenza di un momento relativo all'asse y positivo va ad aumentare il carico sulla ruota posteriore, allontanando il limite di ribaltamento della moto.

## 2.1.4 Ulteriori effetti aerodinamici

Lo studio presentato in questa tesi si limita all'analisi delle prestazioni di una moto in condizioni di angoli di rollio e sideslip nulli. Ritengo comunque necessario affrontare molto brevemente gli effetti di questi angoli.

La presenza di una superficie laterale molto maggiore di quella frontale rende le moto sensibili ai venti trasversali. Uno studio in galleria del vento ad angoli di sideslip ( $\beta$ ) tra  $0^\circ$  e  $20^\circ$  presentato da J. Katz [11] mostra come al crescere di  $\beta$  venga registrato un aumento sia di  $C_D$  che di  $C_Y$ . D. Fintelman et al. [12] affrontano lo stesso problema con un approccio numerico. I loro risultati mostrano un incremento della portanza, della forza laterale e del momento di rollio al crescere dell'angolo di sideslip. Per alti valori di  $\beta$  riscontrano inoltre una riduzione della componente della forza aerodinamica lungo la direzione longitudinale della moto.

Angoli di rollio diversi da zero si incontrano quando la moto si trova in curva. In queste condizioni la forza prodotta da un'ala come quella di Figura 2.4 non agisce più lungo la direzione verticale ma con un angolo pari a quello di piega della moto ( $\varphi$ ). Nelle ipotesi di una curva a velocità e raggio ( $R_c$ ) costanti, l'equilibrio delle forze laterali risulta essere il seguente:

$$\mu_{lat}(mg - F_L \cos\varphi) = \frac{mv^2}{R_c} - F_L \sin\varphi \quad (2.1.9)$$

Nel caso venga prodotta downforce ( $F_L < 0$ ), solo una parte di questa forza va ad aumentare il carico sulle ruote, una seconda componente genera invece una ulteriore spinta verso l'esterno della curva. A differenza di una macchina da corsa, l'effetto di un profilo deportante può quindi avere un effetto negativo o positivo in base all'angolo di piega necessario ad affrontare la curva. Il comportamento reale è ulteriormente complicato dalla posizione effettiva del pilota. È infatti possibile che con la sua postura vada ad aumentare o ridurre l'angolo effettivo di piega, influenzando il rapporto tra componente verticale e laterale della forza aerodinamica.

Un tentativo di sfruttare la posizione del pilota per ridurre la componente di forza laterale viene presentato da V. Sedlák [13] che propone l'utilizzo di una coppia di ali a dietro negativo. Con questa soluzione una delle due ali risulterebbe parallela al terreno mentre l'altra verrebbe bloccata dal pilota, riducendo la forza laterale generata. Per quanto questa proposta basata sull'interferenza sia teoricamente possibile, le soluzioni attualmente adottate in MotoGP per massimizzare il carico in curva sono basate invece sull'effetto suolo. Ducati utilizza due convogliatori che, quando la moto si trova in piega, vanno ad aumentare la portata d'aria sotto la moto, generando così una zona di bassa pressione. Uno studio numerico su una soluzione dalla geometria simile è presentato da B. González-Arcos e P.J. Gamez-Montero [3].

## 2.2 Fluidodinamica Computazionale

La fluidodinamica computazionale è un metodo di risoluzione dei problemi fluidodinamici basato sull'utilizzo di algoritmi numerici e la discretizzazione del dominio in un numero finito di volumi elementari. Rispetto ad altri metodi di analisi aerodinamica, come la galleria del vento o i test in pista, la CFD presenta diversi vantaggi: l'assenza di un modello fisico può portare ad una riduzione dei costi e dei tempi di sviluppo, l'approccio numerico permette inoltre di analizzare l'intero campo di moto e simulare condizioni difficilmente replicabili in un ambiente come la galleria del vento. Quello che ad oggi rimane uno dei problemi della fluidodinamica computazionale è la necessità di ottenere risultati accurati senza però incorrere in costi computazionali eccessivi.

In base al problema che si intende studiare e al livello di accuratezza richiesto esistono diversi approcci alla risoluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes. Il primo approccio possibile è la *Direct Numerical Simulation (DNS)*, questo metodo prevede di risolvere direttamente le equazioni di Navier-Stokes per ogni elemento della griglia di calcolo. Un veicolo tipicamente opera in condizioni caratterizzate da un numero di Reynolds<sup>3</sup> medio alto, usando il passo della moto come lunghezza ed una velocità di 120km/h si arriva ad un valore  $Re \sim 3.0 \cdot 10^6$ , indice di un flusso turbolento. Nel caso di una DNS risulta necessario risolvere la turbolenza dalla scala più grande, dell'ordine della dimensione del veicolo, fino ai vortici più piccoli, dal nome di *scale di Kolmogorov*, dalle dimensioni tali da rendere le forze viscosse dominanti e l'energia cinetica contenuta nei vortici dissipata sotto forma di calore. La necessità di risolvere la turbolenza fino alla più piccola scala possibile rende le simulazioni numeriche dirette estremamente costose da un punto di vista computazionale, anche per flussi con numeri di Reynolds relativamente bassi. La più complessa geometria di un veicolo e i numeri di Reynolds più elevati rendono necessaria in ambito industriale una modellazione della turbolenza [14].

L'approccio diametralmente opposto alle DNS è quello dei modelli *RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)*, in cui la turbolenza è totalmente modellata e la soluzione ottenuta risulta essere una media nel tempo. Questo permette di utilizzare griglie di

---

<sup>3</sup> Il numero di Reynolds è un numero adimensionale definito come  $Re = (\rho v L) / \mu$  e rappresenta il rapporto tra le forze d'inerzia e le forze viscosse.

calcolo con celle di dimensione maggiore e di conseguenza un minor numero di elementi totali. Esistono poi una serie di modelli intermedi tra DNS e RANS, le *LES (Large Eddy Simulation)* vanno a risolvere la turbolenza nelle sue scale temporali e spaziali maggiori, modellizzando invece quelle più piccole. Sono stati introdotti anche modelli ibridi RANS-LES in cui il flusso in prossimità della parete è modellato tramite RANS mentre le zone lontano dalla superficie sono risolte con LES. Una descrizione più approfondita di questi metodi è presentata da P. Ekman [14].

### 2.2.1 Equazioni di Navier-Stokes mediate alla Reynolds [15]

Le velocità tipiche di una moto sono tali da poter classificare il flusso attorno a questo corpo come incomprimibile. In questa approssimazione la viscosità e la densità del fluido vengono considerate costanti e le equazioni del moto sono ridotte all'equazione di conservazione della massa e all'equazione di conservazione della quantità di moto.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.2.1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (2.2.2)$$

Le variabili presenti in queste equazioni mostrano una dipendenza dal tempo oltre che dalla posizione, si può quindi procedere con la decomposizione di Reynolds per sostituire al valore istantaneo la somma del valore medio e di una fluttuazione attorno alla media.

$$\Phi(x_i, t) = \bar{\Phi}(x_i) + \Phi'(x_i, t) \quad (2.2.3)$$

Si può quindi introdurre questa decomposizione all'interno delle equazioni (2.2.1) e (2.2.2), andando successivamente a mediarle nel tempo.

$$\overline{\frac{\partial \bar{u}_i + u'_i}{\partial x_i}} = 0 \quad (2.2.4)$$

$$\rho \frac{\partial \overline{\bar{u}_i + u'_i}}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\overline{\bar{u}_i + u'_i})(\overline{\bar{u}_j + u'_j})}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{\bar{p} + p'}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 (\overline{\bar{u}_i + u'_i})}{\partial x_j^2} \quad (2.2.4)$$

Queste equazioni possono essere semplificate ulteriormente tendendo in considerazione la linearità della media temporale e la proprietà della fluttuazione di avere media nulla.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.2.5)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (2.2.6)$$

Le equazioni (2.2.5) e (2.2.6) prendono il nome di equazioni di Navier-Stokes mediate. La forma di queste equazioni è simile alle tradizionali equazioni di Navier-Stokes, fatta eccezione per la presenza del termine  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  che prende il nome di *sforzi di Reynolds*. In questa forma il sistema di equazioni è aperto, presenta infatti un numero di incognite superiore al numero di equazioni, risulta quindi necessario introdurre una modellazione del tensore degli sforzi di Reynolds.

Un possibile approccio al problema sfrutta il concetto di *viscosità turbolenta*  $\nu_T$ , introdotto da Boussinesq nel 1877. Così facendo è possibile mettere in relazione il tensore degli sforzi di Reynolds con i gradienti di velocità media, arrivando alla seguente formulazione:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \rho \nu_T \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.2.7)$$

in cui  $\nu_T$  è funzione di posizione e tempo,  $k$  invece è l'*energia cinetica turbolenta* ed è definita come segue:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (2.2.8)$$

Il problema della chiusura risulta ora semplificato, si è infatti passati dalla necessità di conoscere le 6 componenti del tensore degli sforzi di Reynolds alla singola variabile  $\nu_T$ . Esistono numerosi modelli per la viscosità turbolenta, i più comuni sono lo *Spalart-Allmaras* tra i modelli ad una equazione,  $k$ - $\epsilon$  e  $k$ - $\omega$  risultano essere invece i modelli a due equazioni più popolari.

Il modello  $k$ - $\omega$  *Shear Stress Transport (SST)* proposto da Menter (1993) [16] rappresenta un tentativo di sfruttare i punti di forza dei due modelli  $k$ - $\epsilon$  e  $k$ - $\omega$ . Nel modello viene introdotta una 'blending function' tale da permettere l'utilizzo del modello  $k$ - $\omega$  in prossimità delle pareti e il  $k$ - $\epsilon$  nelle regioni più lontane dal corpo. Così facendo si ottiene un modello che al pari del  $k$ - $\epsilon$  risulta meno sensibile alle condizioni al

contorno mantenendo però i vantaggi del  $k-\omega$  nella risoluzione della regione vicino alla parete [17].

## 2.2.2 Strato Limite

Una corretta risoluzione dello strato limite risulta fondamentale per ottenere risultati accurati. Questa regione è la principale fonte di vorticità e turbolenza, inoltre è in prossimità delle pareti che i gradienti delle grandezze fluidodinamiche risultano più intensi. Per poter comprendere i diversi approcci esistenti è necessario descrivere quelle che sono le diverse zone costituenti uno strato limite turbolento. Si introducono quindi la distanza dalla parete adimensionalizzata  $y^+$  e la velocità d'attrito  $u_\tau$ :

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu} \quad (2.2.9)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2.2.10)$$

in cui  $\tau_w$  rappresenta lo sforzo di taglio alla parete.

Lo strato limite può essere suddiviso in un *inner layer* ed un *outer layer*. L'*inner layer* a sua volta è composto da tre regioni distinte [18] (Figura 2.5):

- Viscous sublayer
- Buffer layer
- Log-law region

Nel viscous sublayer ( $y^+ < 5$ ) le forze viscosse prevalgono su quelle inerziali e l'andamento della velocità in funzione della distanza dalla parete è dato dalla formula  $u^+ = y^+$ . La log-law region ( $y^+ > 30$ ) prende il nome dalla relazione tra velocità e  $y^+$  che, in questa regione, è logaritmica. Qui sono le forze d'inerzia a prevalere e può inoltre essere individuata la presenza di grandi vortici di rimescolamento.

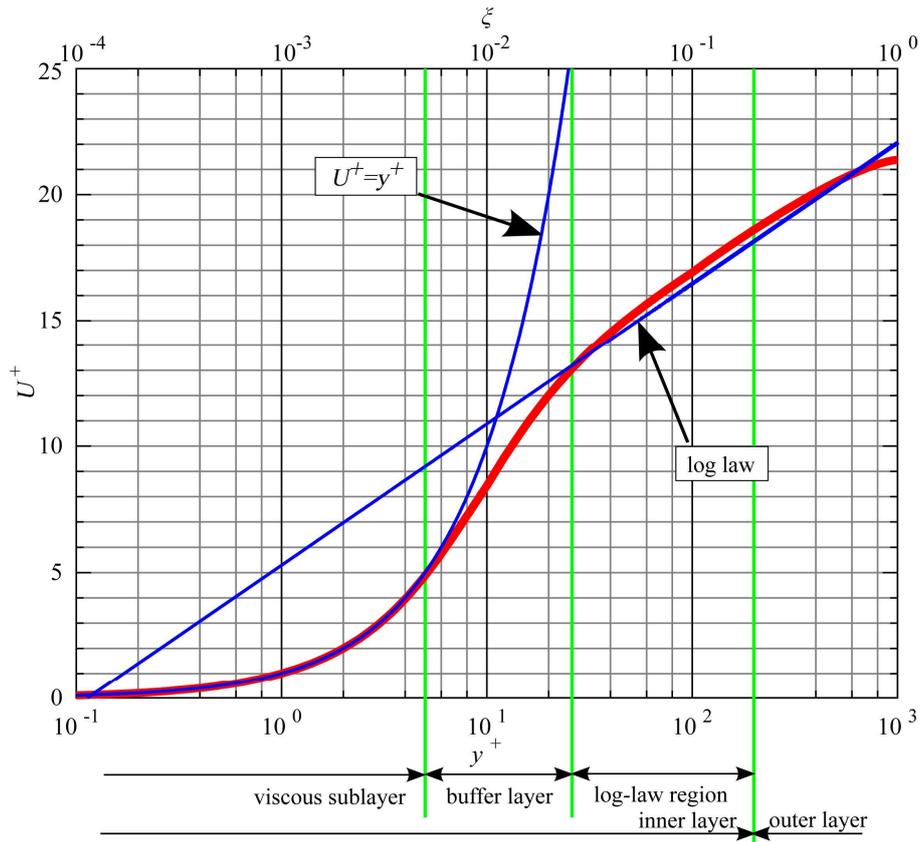


Figura 2.5 Suddivisione dello strato limite turbolento  
 (aokomoriuta (青子守歌), CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons)

Esistono due approcci al problema della modellazione dello strato limite. Il primo, chiamato *near-wall modeling*, consiste nel risolvere lo strato limite fino al viscous sublayer. È necessario quindi che il centro della cella a contatto con la parete abbia un valore di  $y^+$  prossimo ad uno. Questo, unito alla necessità di evitare grandi variazioni nelle dimensioni di celle adiacenti tra loro, fa sì che per catturare completamente lo strato limite sia richiesto un elevato numero di layer prismatici. Esiste quindi un secondo approccio in cui viscous sublayer e buffer layer non vengono risolti ma modellati attraverso formule semi-empiriche chiamate *wall functions*. In questo caso è richiesto che il centro della prima cella ricada nella log-law region, quindi un valore di  $y^+$  superiore a 30 [17]. Uno dei problemi dell'approccio con funzioni di parete è legato alla difficoltà che questo metodo mostra nel predire correttamente il punto di separazione in presenza di gradienti di pressione avversi. Per corpi in cui la separazione è determinata dalla geometria, come può essere il caso per alcune moto, è possibile però che entrambi gli approcci portino a risultati simili [6].

### 2.2.3 Modellazione della rotazione delle ruote

Il campo di moto attorno ad un veicolo è fortemente influenzato dalla rotazione delle ruote, ne consegue che per ottenere risultati accurati da una simulazione CFD sia necessario modellarne il comportamento in modo corretto. Confrontando il comportamento di una ruota in movimento con quello di una ruota stazionaria le differenze sono molteplici: la rotazione porta ad una riduzione nella portanza e resistenza per effetto dell'anticipo della separazione e di una pressione di base<sup>4</sup> più elevata, inoltre l'anticipo della separazione fa sì che la scia della ruota sia più alta rispetto al caso non rotante [19].

L'approccio più comune per modellare la rotazione di un oggetto è l'utilizzo della condizione al contorno *Rotating Wall*. Sulla parete viene introdotta una velocità tangenziale alla superficie della cella e di intensità proporzionale alla velocità di rotazione e alla distanza dall'asse di rotazione (Figura 2.6). Se questa modellazione risulta corretta per la quasi totalità dello pneumatico, questo non è più vero per le razze e il cerchio. In alcune zone la velocità risultante non è solamente tangente alla superficie ma presenta anche una componente ad essa normale. Fisicamente questo verrebbe interpretato come un flusso entrante o uscente da una parete solida, chiaramente ciò non è possibile e risulta quindi necessario un approccio diverso [20].

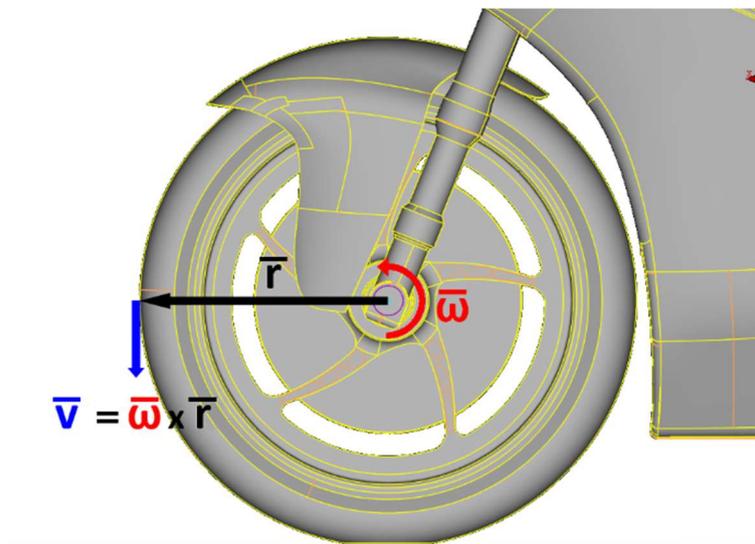


Figura 2.6 Rappresentazione della velocità applicata alla parete con la condizione al contorno "Rotating Wall"

<sup>4</sup> Con base è indicata la regione di un corpo compresa tra i punti di separazione

L'approccio che più si avvicina alla realtà è chiamato *Sliding Mesh* e consiste nel fisicamente ruotare la porzione di mesh di interesse ad ogni time step. Questo metodo richiede quindi una simulazione non stazionaria e può portare ad un aumento significativo nel tempo di simulazione. Una via di mezzo è rappresentata dall'utilizzo di un *Moving Reference Frame* (MRF). Il dominio di calcolo viene diviso in più zone, alcune stazionarie e altre invece dotate di una certa velocità angolare  $\omega$ . Questa soluzione risolve il problema della componente di velocità normale alla superficie, nel sistema di riferimento rotante, infatti, la velocità del cerchio risulta essere nulla. Essendo questo un sistema di riferimento non inerziale, è necessario però modificare le equazioni di Navier-Stokes introducendo gli effetti dell'accelerazione centrifuga e della forza di Coriolis. L'introduzione di questi termini non è senza problemi, i risultati di una simulazione con Moving Reference Frame mostrano infatti una certa sensibilità alle scelte fatte in termini di dimensione del MRF e posizione delle interfacce [20]. Questo primo problema può essere limitato andando a ridurre allo stretto necessario la zona interessata dal MRF, c'è però un secondo problema che è intrinseco a questa modellazione. L'approccio con Moving Reference Frame è un'approssimazione stazionaria di un problema che per sua natura non lo è, il componente rotante è immobile nella simulazione e questo fa sì che i risultati ottenuti siano rappresentativi di una specifica posizione e non del generale comportamento del corpo.

## 2.3 Galleria del Vento

La galleria del vento ha a lungo rappresentato il principale strumento di ricerca e sviluppo aerodinamico nel mondo aerospaziale e automobilistico, oggi parte di queste attività vengono svolte tramite CFD ma gli esperimenti in galleria rimangono comunque fondamentali nel processo di validazione dei modelli numerici utilizzati.

Il *principio di reciprocità* afferma che le forze aerodinamiche generate da un corpo che si muove in un fluido con velocità  $\vec{v}$  costante sono uguali alle forze generate nel caso in cui il corpo fosse fermo e il fluido avesse velocità  $-\vec{v}$ . Questo principio viene sfruttato in una galleria del vento per poter studiare il comportamento aerodinamico di un corpo in un sistema di riferimento in cui è fermo, e la misura delle forze risulta essere più semplice. Per avere la certezza che i risultati ottenuti dalla prova in galleria siano rappresentativi del comportamento reale è necessario che ci sia *similitudine dinamica*. Questa condizione si traduce in un vincolo sulla geometria dei corpi studiati, che devono essere geometricamente simili, ed un vincolo sul flusso che, nei due problemi, deve rispettare il principio di similitudine cinematica. Introducendo l'analisi dimensionale è possibile ricondurre queste condizioni all'uguaglianza dei numeri adimensionali che descrivono il sistema, nel caso di una galleria del vento subsonica questi sono il numero di *Reynolds* e quello di *Mach*:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (2.3.1)$$

$$M = \frac{v}{a} \quad (2.3.2)$$

dove  $a$  rappresenta la velocità del suono per il fluido in esame.

### 2.3.1 Struttura tipica di una galleria del vento a bassa velocità

Le gallerie del vento a bassa velocità possono essere classificate sulla base della geometria della struttura, distinguendo le gallerie a *circuito aperto* da quelle a *circuito chiuso*. Nel primo caso l'aria viene aspirata dall'ambiente esterno e attraverso un convergente raggiunge la camera di prova, il flusso incontra poi un diffusore e una ventola che lo scarica nuovamente in atmosfera. Nelle gallerie a circuito chiuso l'aria viene invece fatta ricircolare grazie all'introduzione di una sezione di ritorno che, tramite appositi raccordi, collega la ventola al convergente. Questa soluzione porta a

diversi vantaggi: a pari velocità e dimensioni della camera di prova una galleria a circuito chiuso richiede meno energia per il suo funzionamento, la stessa galleria risulterà anche meno rumorosa dell'equivalente a circuito aperto. Le gallerie a circuito chiuso permettono di ottenere una maggiore qualità del flusso, che risulterà inoltre meno influenzato dalle condizioni atmosferiche dell'ambiente di laboratorio data l'assenza di uno scambio d'aria con l'esterno. Questo ultimo punto rappresenta però anche uno dei difetti di questa tipologia di struttura che, nel caso di uso prolungato, richiede la presenza di uno scambiatore di calore per evitare l'incremento della temperatura del flusso.

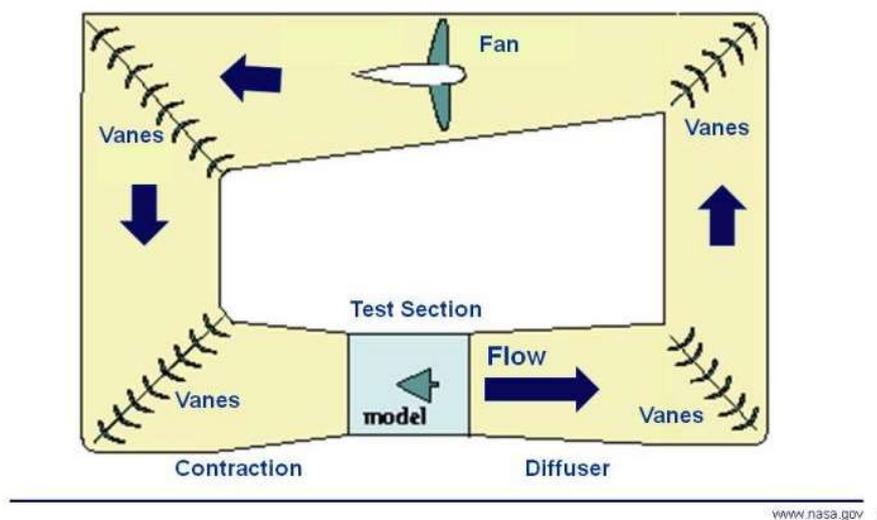


Figura 2.7 Schema di una galleria del vento a circuito chiuso  
(fonte NASA Glenn Research Center)

Nelle pagine seguenti verranno descritte le diverse sezioni che compongono una galleria del vento. In questa trattazione, basata sul libro di Barlow et al. [21], verrà presa come riferimento la struttura di una galleria del vento a circuito chiuso, essendo questa la categoria di galleria usata durante questa attività.

## Divergente

Il divergente, o diffusore, è un componente posizionato a valle della camera di prova che, attraverso un opportuno aumento di sezione, rallenta il flusso riducendone così la potenza dissipata per effetti viscosi. I parametri che descrivono il divergente sono l'*area ratio*, il rapporto tra sezione di uscita e sezione d'ingresso, e l'angolo. Per minimizzare le perdite e le dimensioni della struttura è necessario che la velocità venga ridotta nella

minor distanza possibile, con quindi angoli e rapporti tra aree elevati. È però fondamentale evitare il fenomeno della separazione dello strato limite che porterebbe ad una effettiva riduzione della sezione del diffusore, un aumento delle perdite e possibili oscillazioni in camera di prova e sulla ventola. È pratica comune quindi mantenere angoli di apertura sotto i  $3^\circ$  e valori di area ratio intorno a 3 per le singole sezioni del diffusore [21].

## **Ventola**

Le perdite per effetti viscosi fanno sì che, per mantenere costante la velocità dell'aria in galleria, sia necessario fornire energia al flusso. Questo compito è affidato ad una ventola che, operando come un compressore, fornisce al flusso un incremento di pressione. La velocità dell'aria in galleria è quindi funzione del punto di equilibrio tra l'aumento di pressione fornito dalla ventola, funzione delle velocità del flusso e del motore, e le perdite in galleria e sul modello, che a loro volta dipendono dalla velocità oltre che dalle caratteristiche della struttura. La posizione della ventola è frutto di diverse considerazioni [21]: l'efficienza della ventola, che impatta sui costi di esercizio, il costo di installazione della ventola, ed infine il rumore generato da questo componente, che impone di posizionarlo il più lontano possibile dalla camera di prova per ridurre l'inquinamento acustico. La posizione scelta ricade solitamente sul ramo di ritorno, tra il secondo ed il terzo angolo, una soluzione che permette anche di minimizzare il rischio che la ventola sia danneggiata dal distacco di componenti dal modello.

## **Angoli**

La soluzione più adottata per realizzare il percorso di ritorno del flusso in una galleria a circuito chiuso consiste nell'uso di quattro angoli di  $90^\circ$  che collegano tra loro altrettante sezioni rettilinee. Questi angoli da soli possono rappresentare più della metà delle perdite di carico dell'intero circuito [21] ed è quindi di fondamentale importanza la loro corretta progettazione. Per ridurre le perdite è pratica comune inserire deviatori di flusso che guidino l'aria nel cambio di direzione. La forma di questi deviatori, da

semplici lamine curve a veri profili alari, influenza le perdite di carico oltre che la sensibilità degli stessi all'angolo di incidenza del flusso.

## Camera di calma

In camera di prova è richiesto un flusso il più uniforme possibile, questa caratteristica non è però solitamente presente nel flusso in uscita dal quarto angolo della galleria che invece risulta disomogeneo, disallineato rispetto all'asse della galleria e con un alto livello di turbolenza ( $I_{\%}$ ). Una camera di calma viene quindi introdotta a monte del convergente con lo scopo di migliorare la qualità del flusso.

$$I_{\%} = \frac{\sqrt{\frac{1}{3}(u'^2 + v'^2 + w'^2)}}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2}} \cdot 100 \quad (2.3.3)$$

Un primo elemento utilizzato è il nido d'ape (*honeycomb*), questo consiste in celle di sezione quadrata, circolare o esagonale unite tra loro e dalla profondità pari a circa 6-8 volte il loro diametro. L'honeycomb va a raddrizzare il flusso, riducendo le componenti di velocità ortogonali all'asse della camera di prova, purtroppo però non è altrettanto efficace a ridurre le non uniformità del flusso. A tal fine viene utilizzata una serie di reticoli di fili (*turbulence screens*) che, se posizionati alla corretta distanza tra loro, permettono di uniformare il profilo di velocità e ridurre la turbolenza assiale [21].

## Convergente

Il principale compito del convergente è, tramite un'opportuna riduzione della sezione, accelerare il flusso dalla bassa velocità della camera di calma fino al valore desiderato in camera di prova. Questa contrazione ha altri effetti positivi, il livello di turbolenza viene ulteriormente abbassato e la presenza di un gradiente di pressione positivo porta ad una riduzione dello spessore dello strato limite sulle pareti. A differenza del diffusore, nel convergente è possibile raggiungere rapporti tra area di ingresso e uscita elevati con una lunghezza minima del componente. Sono però presenti degli effetti secondari che potrebbero causare una separazione del flusso, come gradienti di pressione avversi nella sezione iniziale e terminale del convergente o la presenza di flussi secondari negli spigoli nel caso di sezioni rettangolari.

## Camera di prova

La camera di prova è la sezione della galleria del vento in cui viene posizionato il modello. Tra le caratteristiche che la descrivono, un primo parametro fondamentale è la dimensione della sezione della camera di prova ( $A_{wt}$ ), questa può essere confrontata con l'area frontale del modello ( $A_m$ ) per ottenere un parametro noto come *bloccaggio* ( $\varphi$ ):

$$\varphi = \frac{A_m}{A_{wt}} \quad (2.3.4)$$

Una seconda caratteristica fondamentale della camera di prova è la sua configurazione, è possibile infatti che questa abbia una *sezione open-jet* o una *sezione chiusa*. Nel primo caso la camera di prova è aperta su tre lati mentre la presenza del pavimento modella la strada. I vantaggi della configurazione open-jet sono un migliore accesso al modello e una minore influenza del bloccaggio. Il principale problema è rappresentato dall'interfaccia tra il getto che esce dal convergente e l'aria stazionaria che lo circonda, questa causa infatti perdite elevate, limitando la lunghezza massima della camera di prova e richiedendo una maggiore potenza [22]. La sezione chiusa presenta caratteristiche opposte: è più sensibile al bloccaggio e presenta un gradiente di pressione negativo a causa delle perdite generate dalle pareti, allo stesso tempo però il flusso risulta più stabile rispetto alla configurazione open-jet [23]. La configurazione *slotted wall* rappresenta una via di mezzo tra le due tipologie di camera di prova, delle aperture longitudinali vengono introdotte nelle pareti laterali e superiore permettendo così l'uso di modelli di dimensioni maggiori.

### 2.3.2 Montaggio del modello e modellazione della strada

La soluzione più semplice per montare un veicolo nella camera di prova consiste nel posizionarlo su una piattaforma a livello del pavimento e collegata ad una bilancia che misura le forze e i momenti agenti sul corpo. Un problema di questo metodo consiste nel fatto che la misura effettuata dalla bilancia è relativa alle forze agenti sulla piattaforma e non propriamente sul veicolo. Per minimizzare questo effetto va ridotta al minimo la superficie della piattaforma, è pratica comune usare dei piatti di dimensione ridotta sotto le ruote del veicolo, così facendo l'unico effetto da tenere in considerazione è il campo di pressione generato dalla ruota sul piatto.

La configurazione appena presentata ha il problema di non rappresentare una corretta simulazione del comportamento reale del veicolo, sia il pavimento che le ruote sono infatti stazionarie. Una prima conseguenza è lo sviluppo di uno strato limite sul pavimento della galleria e un conseguente diverso profilo di velocità sotto al corpo. Gli effetti di questa differenza saranno tanto maggiori quanto minore è l'altezza da terra del veicolo. Esistono svariati metodi per rimediare a questo problema, con diversi livelli di complessità e costo:

- Piattaforma rialzata
- Aspirazione dello strato limite a monte del modello
- Aspirazione dello strato limite sotto al modello
- Soffiaggio tangenziale
- Tappeto mobile

Con la prima soluzione si va a posizionare il nuovo livello della “strada” sopra lo strato limite del pavimento della galleria, questo non elimina il problema ma permette di ridurre lo spessore dello strato limite sotto il veicolo. Lo stesso effetto può essere ottenuto anche aspirando lo strato limite a monte del modello. Questa aspirazione può anche essere distribuita sotto tutto il modello attraverso una piattaforma perforata. Il soffiaggio tangenziale rappresenta una soluzione diametralmente opposta all'aspirazione, si introduce un flusso che energizza lo strato limite e ne riduce lo spessore. La soluzione che più si avvicina alla realtà prevede l'uso di un tappeto sotto al veicolo che, messo in rotazione alla stessa velocità del flusso, modella il movimento della strada. Questa soluzione, se accoppiata ad una aspirazione a monte, impedisce totalmente lo sviluppo di uno strato limite. Il tappeto può avere una larghezza ridotta, permettendo di mantenere il sistema descritto in precedenza per la misurazione delle forze, oppure può estendersi sotto tutto il veicolo. In questo caso il modello deve essere supportato da un braccio (*sting*) ed è necessaria una bilancia interna al modello per misurare le forze. Se le ruote del modello sono in contatto con il tappeto, per la loro rotazione si può sfruttare il movimento di quest'ultimo. Anche le altre soluzioni descritte permettono di modellare la rotazione delle ruote, in questo caso tra le piattaforme e le ruote vengono introdotti dei cilindri che sono messi in rotazione da motori elettrici.

### 2.3.3 Differenze tra galleria del vento e comportamento in pista

Oltre alla già citata necessità di simulare il movimento della strada e la rotazione delle ruote, esistono altri effetti che possono allontanare il comportamento del flusso in galleria del vento da quello realmente sperimentato dal veicolo su strada o pista. Usando come esempio la configurazione con sezione di prova chiusa, si possono individuare:

- Effetti di scala
- Presenza di supporti per mantenere il modello in posizione
- Presenza delle pareti della galleria del vento

Gli effetti di scala sono presenti nel caso in cui le dimensioni del modello utilizzato siano inferiori rispetto al veicolo reale. Per mantenere costante il numero di Reynolds è quindi necessario aumentare la velocità del fluido, o modificarne la viscosità. Questo non è sempre possibile, la velocità raggiungibile in camera di prova è limitata sia dalla potenza della ventola, sia dalla necessità di mantenere relativamente basso il numero di Mach, così da ridurre gli effetti dovuti alla comprimibilità del fluido. È quindi possibile che il numero di Reynolds in galleria del vento sia più basso rispetto a quanto normalmente sperimentato dal veicolo. Un valore più basso del numero di Reynolds influisce sul comportamento dello strato limite ed in particolare sulla sua transizione da laminare a turbolento che, in queste condizioni, avviene più tardi. Questo causa differenze nella resistenza di attrito e può inoltre portare ad una separazione prematura dello strato limite su alcuni componenti.

I supporti che collegano il modello alla bilancia introducono due effetti chiamati *tara* e *interferenza*. Con *tara* viene identificata la forza aerodinamica, principalmente resistenza, direttamente generata dal supporto. L'*interferenza* rappresenta invece l'effetto che la presenza di questa struttura ha sul comportamento del flusso attorno al modello. Lo studio di questi effetti è tutt'altro che semplice e non può essere ridotto ad una sola misura delle forze sul supporto senza il modello in camera di prova. Barlow et al. [21] presentano una serie di metodi sperimentali per ricavare i valori di *tara* e *interferenza*, precisando come queste misure vadano ripetute per ogni assetto provato. Un metodo alternativo per la stima degli effetti di *interferenza* è rappresentato da simulazioni numeriche dell'effettiva geometria della galleria del vento. Questa tecnica,

usata nel mondo aeronautico, permette lo studio di interazioni complesse come quelle tra pavimento e half-model nei test con piano di simmetria [24].

In una galleria del vento con camera di prova a sezione chiusa, la presenza delle pareti laterali introduce una serie di effetti sul flusso, i principali sono [21]:

- Galleggiamento orizzontale
- Bloccaggio solido
- Bloccaggio di scia

Il galleggiamento orizzontale è un effetto generato dall'ispessimento dello strato limite lungo le pareti della camera di prova e dalla conseguente riduzione della pressione statica lungo la direzione del flusso. Il galleggiamento orizzontale può essere ridotto introducendo un graduale incremento della sezione della camera di prova, questo non risolve però totalmente il problema dal momento che la crescita dello strato limite sulle pareti è influenzata anche dalla geometria del modello montato. Considerando un corpo di lunghezza  $l$  e una variazione di pressione lineare  $\frac{dp}{dx} = p'$ , la componente di resistenza generata dal galleggiamento è [21]:

$$D_{HB} = p' \int_0^l S(x) dx = p' \cdot V \quad (2.3.5)$$

dove  $S(x)$  rappresenta l'area della sezione ad una distanza  $x$  dall'inizio del corpo. Questa trattazione è una semplificazione del comportamento reale in cui va anche considerato l'effetto del restringimento della sezione effettiva sul comportamento delle linee di flusso (streamline squeezing), ma evidenzia comunque come l'effetto del galleggiamento orizzontale sia modellabile come un incremento della resistenza sperimentata dal corpo.

Le pareti della camera di prova confinano il flusso e causano un locale incremento di velocità attorno al veicolo. Questo effetto, chiamato bloccaggio solido, è dovuto alla riduzione della sezione che il flusso può attraversare per effetto della presenza del modello ed è quindi legato al rapporto  $\varphi$  tra area frontale del corpo e sezione della camera di prova. Un secondo effetto di bloccaggio è causato dalla scia del veicolo, la cui presenza ha un effetto equivalente ad una riduzione della sezione della camera di prova a valle del corpo.

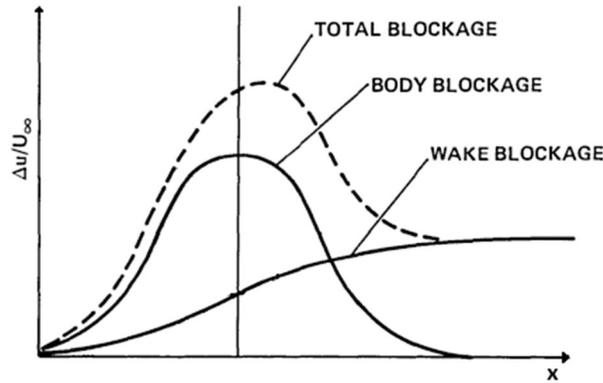


Figura 2.8 Incremento di velocità dovuto al bloccaggio solido e bloccaggio di scia (immagine rielaborata a partire da Allmaras [25])

L'incremento nella resistenza causato dal bloccaggio solido e di scia viene solitamente modellato come un incremento di velocità o pressione dinamica [23]:

$$U_{corr} = U + \Delta U = U + \varepsilon U = U(1 + \varepsilon) \quad (2.3.6)$$

$$q_{corr} = q(1 + \varepsilon)^2 \quad (2.3.7)$$

Nel calcolo dei coefficienti aerodinamici è quindi necessario utilizzare questo valore corretto di pressione dinamica, la relazione tra questo coefficiente corretto e quello originale è:

$$C_{D_{corr}} = \frac{C_D}{q_{corr}/q} = \frac{C_D}{(1 + \varepsilon)^2} \quad (2.3.8)$$

$\varepsilon$  rappresenta un coefficiente che quantifica gli effetti del bloccaggio, un primo esempio di una sua stima viene fornito da Barlow et al. [21]:

$$\varepsilon = \frac{1}{4} \frac{A_m}{A_{wt}} \quad (2.3.9)$$

Esistono poi correzioni più complesse, sviluppate originariamente per l'ambito aeronautico, che sfruttando la teoria del flusso potenziale permettono di tenere conto anche della forma del corpo e della galleria. Nell'ambito dello studio dei corpi tozzi una delle prime correzioni è stata sviluppata da Maskell [26] basandosi sullo studio della separazione per le lastre piane:

$$\frac{q_{corr}}{q} = 1 + \frac{1}{2} C_{D0} \left( \frac{A_m}{A_{wt}} \right) - \frac{1}{C_{P_b}} (C_D - C_{D_i} - C_{D0}) \frac{A_m}{A_{wt}} \quad (2.3.10)$$

Nella correzione appare un termine legato al coefficiente di pressione sulla base del corpo, sempre secondo Maskell però l'approssimazione  $-\frac{1}{C_{P_b}} = \frac{5}{2}$  è da ritenersi accettabile per la maggioranza dei flussi tridimensionali. Se si trascura poi l'effetto della resistenza indotta ( $C_{Di}$ ) e parassita ( $C_{D0}$ ) è possibile ricavare una forma semplificata della correzione:

$$\frac{q_{corr}}{q} = 1 + \frac{5}{2} C_D \left( \frac{A_m}{A_{wt}} \right) \quad (2.3.11)$$

Anche nel caso di corpi tozzi sono presenti correzioni più complesse e che prendono in considerazione più fattori, una descrizione e confronto tra questi diversi metodi è presentato da Hyvärinen [27] nell'ambito di uno studio sull'aerodinamica dei camion.

## 3 Setup sperimentale

### 3.1 Aerotunnel

L'attività di test presentata in questa tesi è stata svolta interamente presso Aerotunnel, una galleria del vento a circuito chiuso ad asse orizzontale situata a Gorizia. La struttura è dotata di due camere di prova a sezione chiusa, quella superiore, di dimensioni minori, è dedicata a test su bici, moto e modelli aeronautici in scala, la camera inferiore è dedicata a test a bassa velocità con piccoli veicoli e modelli. Entrambe le camere sono dotate di una bilancia a 6 gradi di libertà basata su estensimetri e posizionata sotto il pavimento. Per effetto della presenza della seconda camera di prova, la struttura della galleria si allontana da quella tipica descritta nei paragrafi precedenti, la sezione con le ventole è infatti posizionata immediatamente a valle del diffusore. La struttura non possiede poi alcun sistema di controllo della crescita dello strato limite lungo le pareti, non è inoltre possibile mettere in rotazione delle ruote del prototipo.

<b>Caratteristiche Aerotunnel</b>	
Camera superiore	
Dimensioni (WxHxL) [m]	2.4 x 2.4 x 6
Massima velocità	140 km/h
Caratteristiche	Finestra laterale per osservare il modello Registrazione prove con 3 telecamere
Camera inferiore	
Dimensioni (WxHxL) [m]	7.0 x 2.4 x 10
Massima velocità	50 km/h
Caratteristiche	Finestra superiore per osservare il modello Piattaforma girevole 0-360°
Misura delle forze	Bilancia dinamometrica a 6 gradi di libertà
Potenza ventola	640 kW
Contrazione convergente	3:1
Sistema di controllo della temperatura	nessuno
Sistema di riduzione dello strato limite	nessuno
Strumentazione	Generatore di fumo Sonde di pressione statica Anemometria a filo caldo

## 3.2 Modello

Le dimensioni della galleria del vento hanno permesso di effettuare i test in scala 1:1, in particolare le prove sono state svolte sull'effettivo prototipo della squadra. Questa scelta porta con sé dei vantaggi e svantaggi, che sono evidenziati nella tabella che segue.

*Tabella 3.1 Vantaggi e svantaggi di un modello di dimensioni reali invece che in scala ridotta*

<b>PRO</b>	<b>CONTRO</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• L'utilizzo della moto reale elimina gli effetti di scala</li><li>• Non è necessario considerare le diverse deformazioni tra modello e veicolo reale</li><li>• L'utilizzo del prototipo reale riduce i costi, non è necessario produrre un modello specifico per la galleria del vento</li><li>• A differenza di un modello in scala, sulla moto reale sono presenti tutti i dettagli ed eventuali difetti di produzione</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Le maggiori dimensioni rispetto ad un modello in scala aumentano gli effetti di bloccaggio, rendendo più complesso un confronto con le condizioni incontrate in pista</li><li>• Il test in galleria del vento può essere effettuato solo al termine della fase di produzione</li><li>• Non è possibile forare la superficie della moto per effettuare misure di pressione</li></ul>

Per facilitare i cambi di assetto e garantire che questi venga mantenuti anche a diverse velocità in camera di prova, alle sospensioni della moto sono state apportate le seguenti modifiche:

- L'ammortizzatore posteriore è stato sostituito da un tubo metallico rigido con due fori ad una distanza nota. Per variare l'assetto sono stati realizzati tubi di lunghezza differente
- All'anteriore sono state rimosse le molle dalla forcella telescopica e sono stati utilizzati dei distanziali per imporre la lunghezza corretta



*Figura 3.1 Distanziali utilizzati per ricreare gli assetti desiderati*

L'installazione del modello in camera di prova è stata realizzata sfruttando i nottolini sul forcellone, già usati per il cavalletto posteriore, per il collegamento alla moto, il fissaggio del supporto alla piattaforma della bilancia è avvenuto sfruttando alcuni fori preesistenti (Appendice B). Il supporto consiste in due ali verticali saldate ad una piastra orizzontale, per aumentarne ulteriormente la rigidità e di conseguenza ridurre le vibrazioni del modello, sono stati introdotti due puntoni tra le pareti verticali del supporto e la sua base. Un secondo supporto per la ruota anteriore è stato fornito dalla struttura ospitante durante la fase di installazione in camera di prova, con lo scopo di incrementare la stabilità del modello.



*Figura 3.2 Supporti utilizzati per fissare il modello alla pedana in camera di prova*

Per quanto riguarda il pilota, l'utilizzo della moto in dimensioni reali permette di sfruttare due approcci differenti. La prima possibilità è quella di far salire in moto il pilota reale, questa soluzione è quella che più si avvicina alle effettive condizioni in pista, permettendo inoltre di effettuare prove in posizioni diverse con lo scopo di individuare quella di minima resistenza aerodinamica. La possibilità che ha il pilota umano di cambiare posizione rappresenta però anche uno dei difetti di questa soluzione, riducendo infatti la ripetibilità delle misure. Per poter valutare correttamente le differenze tra più configurazioni è infatti necessario ridurre al minimo i parametri che subiscono variazioni in modo da isolarne gli effetti, la posizione del pilota potrebbe diventare quindi una ulteriore variabile da tenere in considerazione.

Una soluzione a questo problema è l'utilizzo di un manichino al posto del pilota, rimuovendo così l'incognita sulla posizione. In questo ambito, lo stato dell'arte consiste nell'effettuare una scansione 3D del pilota in moto, da cui viene successivamente sviluppato il manichino [28]. La soluzione adottata per questi test è leggermente diversa, è stato infatti sfruttato un manichino fornito da una azienda partner della squadra. Questo permette di avere una posizione costante, fondamentale per le prove comparative, con però lo svantaggio di una geometria che non replica perfettamente quella utilizzata nelle analisi CFD in fase di sviluppo.

### **3.3 Obiettivi dell'esperimento e prove effettuate**

La definizione degli obiettivi di questa attività non può non prendere in considerazione il contesto in cui i test vengono svolti. Essendo MotoStudent una competizione, emerge la necessità di massimizzare le prestazioni della moto per poter sconfiggere gli avversari in pista. Nel contesto dell'aerodinamica di un prototipo MotoStudent Electric questo obiettivo si traduce nella necessità di minimizzare la resistenza aerodinamica del pilota in sella al prototipo. MotoStudent è anche una competizione ingegneristica in cui viene richiesto agli studenti di validare le simulazioni svolte durante la fase di progettazione, la galleria del vento diventa quindi uno strumento per ottenere un riscontro sulle simulazioni fluidodinamiche svolte. Questo confronto permette di ottenere dati per migliorare le tecniche di simulazione e di introdurre correzioni ai coefficienti aerodinamici utilizzati nel simulatore lap-time interno alla squadra.

Dopo averne presentato gli obiettivi, si procede ora a descrivere quei parametri dell'esperimento che sono risultati modificabili tra le prove effettuate, e quelli che invece non è stato possibile controllare. Per quanto riguarda la galleria del vento, la velocità del flusso in camera di prova è l'unica variabile che è stato possibile controllare, altri parametri come la densità e temperatura sono stati solamente misurabili. Per quanto riguarda la moto si è agito sulla geometria delle carene, sulla posizione del pilota in sella alla moto e sull'assetto del prototipo. Le caratteristiche della struttura hanno reso impossibili le prove ad angoli di imbardata e rollio diversi da zero, attraverso opportune regolazioni delle sospensioni anteriori e posteriori è stato però possibile modificare l'altezza della moto e l'angolo di beccheggio.

Verranno ora presentate le prove effettuate durante questa sessione di test, descrivendone le caratteristiche e gli obiettivi specifici.

## **Aeromappa**

Lo scopo di un'aeromappa è caratterizzare il comportamento aerodinamico di un veicolo nelle diverse condizioni che può incontrare durante il suo utilizzo. Sono stati scelti tre assetti rappresentativi di diverse situazioni incontrate in pista:

- **Rest:** la configurazione della moto soggetta alla sola forza peso, oltre che l'assetto usato nelle simulazioni CFD in fase di sviluppo della moto
- **Max Braking:** la configurazione della moto in condizioni di massima frenata, con massima compressione della forcella ed estensione della sospensione posteriore
- **Max Acceleration:** la configurazione della moto in condizioni di massima accelerazione, con massima estensione della forcella e compressione della sospensione posteriore

Questi tre assetti sono stati provati a tre velocità: 15 m/s, rappresentativi della minima velocità della moto in pista, 35 m/s ed infine una velocità intermedia, 25 m/s. Per queste prove è stato scelto di utilizzare il manichino per due vantaggi principali: in primo luogo questo garantisce minime differenze nella posizione del pilota tra le diverse misure effettuate, inoltre il manichino è più facile da scansionare, semplificandone quindi l'introduzione in un futuro modello per le simulazioni CFD.

L'obiettivo di queste prove di aeromappa non è solo analizzare le forze aerodinamiche nei diversi assetti, questi risultati possono infatti anche essere usati come base di un confronto con le simulazioni numeriche. Introducendo più configurazioni della moto è possibile valutare non solo la differenza tra CFD e galleria del vento in un singolo assetto, ma anche la capacità delle simulazioni numeriche di modellare correttamente gli effetti delle variazioni di assetto.

*Tabella 3.2 Dimensioni caratteristiche delle sospensioni della moto nei tre assetti provati in galleria del vento*

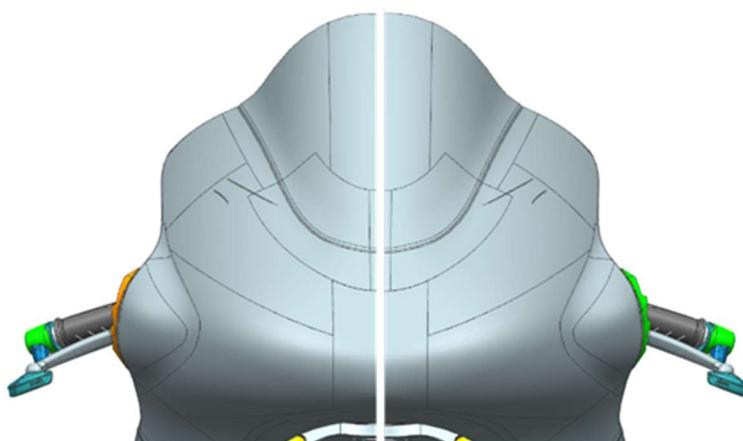
<b>Configurazione</b>	<b>Lunghezza</b>	<b>Corsa</b>	<b>Interasse</b>	<b>Corsa</b>
	<b>Forcella</b> [mm]	<b>Forcella</b> [mm]	<b>Mono</b> [mm]	<b>Mono</b> [mm]
Rest	523	27	287.96	10.65
Max Acceleration	550	0	259.11	39.5
Max Braking	440.7	109.3	298.61	0

## **Modifiche alla geometria delle carene**

L'utilizzo dell'effettivo prototipo della squadra non ha permesso di introdurre grandi cambiamenti alla geometria della moto, le modifiche che sono state provate in galleria riguardano quindi piccole ottimizzazioni e l'aggiunta di componenti realizzate in rapid prototyping. Per facilitarne il montaggio le carene sono state divise in più parti unite tra loro tramite sganci rapidi. Questa soluzione introduce delle discontinuità tra le diverse sezioni che non erano presenti nelle le simulazioni CFD e che potrebbero causare un peggioramento delle prestazioni aerodinamiche della moto. La prima modifica che è stata provata ha previsto quindi l'applicazione di uno strato di nastro adesivo metallico con lo scopo di rimuovere queste discontinuità (Figura 3.3). La seconda modifica geometrica proposta prevede invece l'introduzione di un generatore di vortici nella zona del cupolino davanti alle mani del pilota (Figura 3.4), prendendo spunto da una geometria vista sul prototipo MotoGP di KTM, che potrebbe avere lo scopo di ridurre la resistenza e/o migliorare il confort del pilota [29]. Sono state preparate tre geometrie del vortex generator, rispettivamente a tre (ST1), quattro (ST2) e cinque denti (ST3).



*Figura 3.3 Dettaglio delle discontinuità sulla superficie delle carene, a destra la stessa zona della moto dopo l'applicazione del nastro metallico*



*Figura 3.4 Modello CAD degli add-on testati in galleria del vento*

Queste prove sono state svolte principalmente con il manichino e con l'obiettivo di valutare se le modifiche proposte potessero portare ad una riduzione della resistenza.

## **Ottimizzazione della postura del pilota**

Questa attività, da svolgere necessariamente con l'effettivo pilota della moto, ha come obiettivo la ricerca della posizione di minima resistenza del pilota. L'assetto della moto utilizzato durante queste prove è quello Rest, in quanto rappresenta al meglio la configurazione della moto nella parte finale di un rettilineo, quando appunto il pilota cerca di posizionarsi per minimizzare la resistenza. Non sono state effettuate prove a velocità superiori a 25 m/s in quanto il pilota avrebbe fatto fatica a mantenere costante la sua posizione.

Sono state provate tre posizioni differenti:

- **Posizione 1:** la posizione più naturale del pilota
- **Posizione 2:** posizione con gambe più strette e avambracci appoggiati alle carene
- **Posizione 3:** come posizione 2 ma con uno spessore di 30mm introdotto tra la sella ed il pilota

## **Posizione in fase di frenata**

Una delle caratteristiche peculiari delle moto rispetto ad altri veicoli è la possibilità che ha il pilota di modificare la sua posizione di guida in base alle necessità. Durante la frenata il pilota di moto estende le braccia e alza il torso in modo da massimizzare la superficie esposta al flusso d'aria e aumentare la resistenza aerodinamica. Una stima dell'aumento del  $C_{DA}$  in frenata risulta estremamente importante nell'ottica di introdurre questo effetto all'interno del simulatore di tempo sul giro della squadra.

Le prove con il pilota alzato sono state effettuate con due assetti della moto. L'assetto di base (REST) è stato scelto per poter isolare l'effetto della posizione più esposta del pilota, l'assetto di frenata (MAX BRAKING) è invece più rappresentativo dell'effettiva configurazione assunta dalla moto in approccio ad una curva.

## **Visualizzazione**

L'attività di visualizzazione ha l'obiettivo di valutare il comportamento qualitativo del flusso sia in prossimità della superficie della moto, sia lontano dal corpo. Per la visualizzazione del flusso vicino alla parete sono stati utilizzati dei fili di lana (tufts) applicati sulla superficie della moto con del nastro adesivo. Questa tecnica mostra la direzione locale dell'aria ed è in grado di cogliere eventuali instabilità e altri effetti non stazionari, purtroppo però la presenza dei fili può influenzare il comportamento del flusso e causare un aumento di resistenza. Per la visualizzazione del flusso lontano dal corpo è stata utilizzata la macchina del fumo in dotazione alla struttura ospitante.

Il movimento dei fili di lana è stato registrato grazie alla presenza di videocamere esterne alla camera di prova, questo ha permesso di svolgere l'attività di visualizzazione in contemporanea alle altre prove.

### **3.4 Simulazioni numeriche**

Uno degli obiettivi di quest'attività in galleria del vento è ottenere dati da poter poi comparare con quanto indicato dalle simulazioni CFD svolte internamente al team. Questo confronto è complicato dalle differenti condizioni che sono simulate nelle analisi CFD, in cui sono modellati il movimento di strada e pneumatici, e in questi test in galleria del vento, dove gli effetti di interferenza con le pareti non sono trascurabili ed il suolo è fermo. Un altro elemento di differenza è dato dal livello di dettaglio dei due modelli, quello virtuale e quello reale, per le simulazioni numeriche è stato infatti necessario introdurre delle semplificazioni geometriche a causa della limitata potenza computazionale a disposizione. Questo rende i test in galleria del vento ancora più importanti nell'ottica di ottenere una stima realistica della resistenza aerodinamica della moto.

Alla luce di queste considerazioni si è scelto di svolgere due tipi di simulazioni: le prime con suolo in movimento e bloccaggio  $\varphi < 1\%$ , rappresentative delle condizioni in pista, e poi altre simulazioni in cui sono state introdotte le effettive dimensioni della camera di prova. Questa tecnica, già stata usata nell'ambito di prove su veicoli, ha dimostrato di essere in grado di predire con maggiore accuratezza i risultati di esperimenti in galleria del vento [7], [30].

I risultati ottenuti dalle simulazioni rappresentative della geometria della galleria del vento possono essere usati per effettuare un confronto diretto con i dati sperimentali ricavati durante le prove. Le simulazioni nel dominio di dimensioni maggiori permettono invece di stimare gli effetti della presenza delle pareti della galleria sulle forze e sul campo di moto attorno al veicolo, consentendo in futuro di correggere i risultati sperimentali e riportarli alle condizioni incontrate in pista.

Le dimensioni del dominio di calcolo riferite al sistema di riferimento di Figura 2.1 sono riportate nelle tabelle seguenti.

Tabella 3.3 Dimensioni del dominio per le simulazioni rappresentative della galleria del vento

<b>Direzione</b>	<b>Dimensione [m]</b>
X-	5
X+	8
Y-	1.2
Y+	1.2
Z-	0
Z+	2.4
Bloccaggio	8.9%
Elementi mesh	15M

Tabella 3.4 Dimensioni del dominio per le simulazioni rappresentative delle condizioni in pista

<b>Direzione</b>	<b>Dimensione [m]</b>
X-	5.5
X+	11
Y-	4
Y+	4
Z-	0
Z+	7
Bloccaggio	0.89%
Elementi mesh	16M

Entrambe le griglie di calcolo sono costituite da una mesh poliedrica non strutturata con approccio  $y^+ > 30$  e quindi modellazione dello strato limite tramite funzioni di parete. Sono stati generati 8 layer ortogonali con altezza iniziale 0.7 mm e growth ratio 1.25, è stato inoltre effettuato un raffinamento locale della mesh intorno alla moto tramite la definizione di regole sulla massima dimensione degli elementi di superficie e volume. In entrambe le simulazioni il radiatore è stato modellato tramite porous media. Per la simulazione rappresentativa della pista, è stata utilizzata la condizione moving wall sulla strada e la rotazione delle ruote è stata modellata con un approccio misto MRF e rotating wall.

Tutte le simulazioni sono state svolte tramite il programma Ansys Fluent su una workstation dotata di CPU Ryzen 5900X e 64GB di RAM.

*Tabella 3.5 Impostazioni del programma per le simulazioni svolte*

<b>IMPOSTAZIONI ANSYS FLUENT</b>	
Risolutore	Pressure Based
Tipologia simulazione	RANS Steady-State
Modello di turbolenza	k-omega SST
Pressure-Velocity scheme	Coupled
Spatial gradients	Least Squares Cell Based
Pressure	PRESTO!
Momentum	Second Order Upwind
Turbulence equations	Second Order Upwind
Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	1.225
Velocità [m/s]	25
Viscosità cinematica [kg/(m s)]	1.7894x10 <sup>-5</sup>

In totale sono state svolte quattro simulazioni, la configurazione Rest è stata provata sia con il dominio di dimensioni maggiori che con quello delle dimensioni della galleria, le configurazioni di massima accelerazione e massima frenata sono state simulate nel solo dominio di dimensioni minori.

## **4 Risultati**

### **4.1 Svolgimento delle prove e acquisizione dati**

Le singole prove sono state svolte seguendo la procedura indicata di seguito:

1. Zero della bilancia
2. Accensione delle ventole e attesa fino al raggiungimento della corretta velocità in camera di prova
3. Prima acquisizione dati della durata di 120 secondi
4. Seconda acquisizione dati della durata di 120 secondi

Nel caso di più prove con la stessa configurazione moto ma a velocità diverse, queste sono state svolte una di seguito all'altra, in ordine crescente di velocità, senza dover quindi fermare le ventole ed effettuare lo zero della bilancia ogni volta.

L'acquisizione dei dati è stata gestita interamente dagli ingegneri di AeroTunnel che durante la prova hanno accesso in tempo reale ai dati sul flusso in camera di prova (velocità, pressione, temperatura, umidità relativa) e alle misure delle bilance. Durante l'acquisizione i dati vengono campionati a 10hz, al termine dei due minuti sono calcolati in automatico i valori medi e le misure delle celle di carico sono convertite in forze e momenti nel sistema di riferimento della galleria. A partire dai dati relativi al flusso viene effettuata una stima della densità dell'aria (Appendice D), utilizzata nel calcolo dei coefficienti adimensionali. I dati forniti da AeroTunnel consistono nelle misure relative alle singole acquisizioni, identificate da un numero crescente, e dalle misure delle prove, calcolate come media delle acquisizioni relative alla specifica configurazione della moto e velocità del vento. Le prove svolte, una loro descrizione e i dati delle relative acquisizioni sono riportate nella loro interezza in Appendice E.

## 4.2 Aeromappa

I risultati delle prove di aeromappa effettuate con la moto nei tre assetti descritti nel capitolo 3.3 sono riportati di seguito.

*Tabella 4.1 Risultati relativi alle prove con moto in configurazione REST*

<b>Numero Prova</b>	<b>Velocità [m/s]</b>	<b>Densità [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>FX [kg]</b>	<b>C<sub>D</sub>A [m<sup>2</sup>]</b>
ID002	15.00	1.181	3.730	0.275
ID003	25.00	1.179	10.121	0.269
ID004	35.00	1.171	19.765	0.270



*Figura 4.1 Vista frontale e laterale della moto in configurazione REST*

*Tabella 4.2 Risultati relativi alle prove con moto in configurazione MAX ACCELERATION*

<b>Numero Prova</b>	<b>Velocità [m/s]</b>	<b>Densità [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>FX [kg]</b>	<b>C<sub>D</sub>A [m<sup>2</sup>]</b>
ID005	15.00	1.178	3.800	0.281
ID006	25.00	1.177	10.460	0.279
ID007	35.00	1.169	20.407	0.280



Figura 4.2 Vista frontale e laterale della moto in configurazione MAX ACCELERATION

Tabella 4.3 Risultati relativi alle prove con moto in configurazione MAX BRAKING

Numero Prova	Velocità [m/s]	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	FX [kg]	C <sub>D</sub> A [m <sup>2</sup> ]
ID008	15.00	1.178	3.510	0.260
ID009	25.00	1.176	9.540	0.255
ID010	35.00	1.168	18.801	0.258



Figura 4.3 Vista frontale e laterale della moto in configurazione MAX BRAKING

Tabella 4.4 Differenza di coefficiente di resistenza aerodinamica, i valori della configurazione REST sono stati usati come riferimento

ASSETTO		15 m/s	25 m/s	35 m/s
Frenata	$\Delta C_{DA}$	-0.016	-0.015	-0.013
	Differenza %	-5.7%	-5.5%	-4.6%
Accelerazione	$\Delta C_{DA}$	+0.006	+0.010	+0.009
	Differenza %	+2.1%	+3.6%	+3.5%

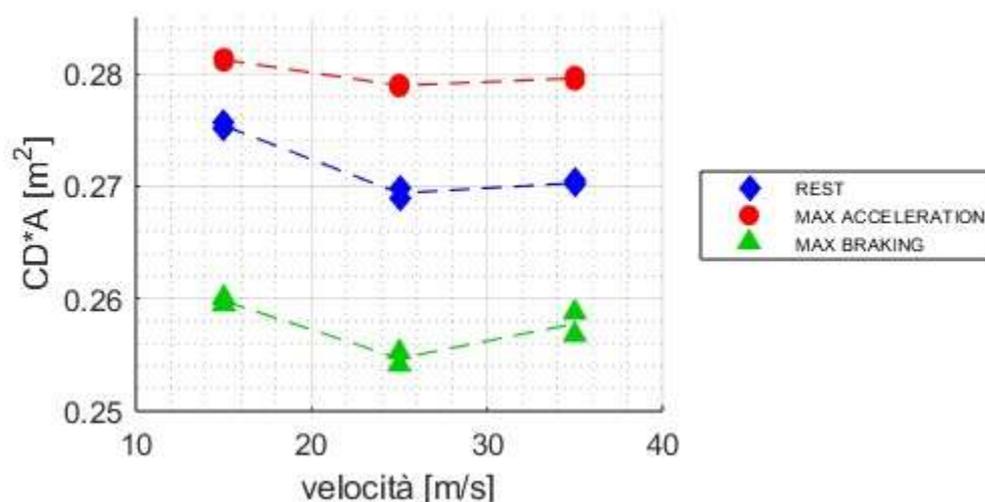


Figura 4.4 Coefficienti di resistenza in funzione della velocità in camera di prova e dell'assetto della moto

Dei tre assetti provati, la configurazione di frenata risulta essere quella che fa registrare il minor valore di resistenza aerodinamica, il secondo posto è occupato dalla configurazione base mentre il valore più alto di  $C_{DA}$  viene fatto registrare dall'assetto di massima accelerazione. Questo rimane vero per tutte le velocità che sono state testate, anche se l'assetto max acceleration si allontana leggermente dal trend degli altri due nella prova a 15 m/s (Figura 4.4).

Il comportamento della moto in assetto di frenata non è inaspettato, confrontando infatti le immagini di Figura 4.1 e Figura 4.3 risulta evidente come nella seconda la moto sia più bassa e quindi meno esposta al flusso. La compressione della sospensione anteriore avvicina tra loro il parafango e la carena, riducendo la portata d'aria attraverso questa sezione. Questo flusso andrebbe ad impattare contro la paratia frontale<sup>5</sup> e contribuirebbe

<sup>5</sup> Con il termine "paratia frontale" si intende in questo caso quella parte della carenatura della moto davanti al telaio e pacco batteria e con lo scopo principale di convogliare il flusso d'aria verso la parte bassa del prototipo dove è posizionato un radiatore. Questo componente si trova nella posizione che nelle moto con motore a combustione interna è tipicamente occupata dal radiatore dell'acqua.

alla generazione di una zona di alta pressione responsabile di una componente significativa della resistenza totale della moto. La riduzione di questa zona di alta pressione potrebbe quindi essere il principale meccanismo dietro il calo nella resistenza aerodinamica riscontrata. Tra le due configurazioni cambia anche la posizione del manichino rispetto al flusso d'aria. In assetto di frenata le spalle ed il casco risultano infatti più esposti, le gambe e le braccia sembrano invece più coperte dalle carene e meglio allineate alla direzione del flusso.

Questo ragionamento può essere ripetuto per l'assetto di massima accelerazione: l'estensione della sospensione anteriore aumenta la zona di alta pressione sulla paratia frontale mentre il manichino risulta avere braccia e gambe maggiormente esposte al flusso. Queste considerazioni sono coerenti con l'incremento di resistenza che è stato registrato.

Una ulteriore osservazione che può essere fatta sulla base di Figura 4.4 è come il coefficiente di resistenza tenda a variare con la velocità dell'aria. In particolare, il coefficiente di resistenza è massimo nelle prove effettuate a 15 m/s per poi calare alla velocità intermedia ed infine tornare leggermente a crescere alla massima velocità. Questa seconda crescita è accompagnata anche da un evidente aumento delle oscillazioni del modello e di alcune specifiche componenti come il parafango. Il movimento del modello sembra essere dovuto alla non sufficiente rigidità dell'accoppiamento al supporto posteriore, l'aumento delle vibrazioni potrebbe inoltre parzialmente spiegare l'incremento di  $C_{DA}$ . Un'altra possibile spiegazione è l'anticipo della transizione dello strato limite da laminare a turbolento che potrebbe causare un aumento della resistenza di attrito. Per quanto riguarda il comportamento alla velocità più bassa, gli effetti del numero di Reynolds potrebbero influenzare alcune separazioni del flusso sul manichino. Non va comunque escluso che questo comportamento possa essere legato ad effetti presenti in galleria del vento che non si è stati in grado di cogliere, oppure che sia in qualche modo dovuto alla procedura con viene calcolata la velocità del flusso o la densità dell'aria.

### 4.3 Prove sulla geometria delle carene

Delle prove di modifiche alle carene solo l'applicazione del nastro (Tape) e la prima geometria di generatore di vortici (ST1) sono state svolte con il manichino.

*Tabella 4.5 Risultati relativi alle prove con manichino, configurazione REST e applicazione del nastro metallico*

<b>Numero Prova</b>	<b>Velocità [m/s]</b>	<b>Densità [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>FX [kg]</b>	<b>C<sub>D</sub>A [m<sup>2</sup>]</b>
ID011	15.00	1.174	3.673	0.273
ID012	25.00	1.173	10.005	0.268

*Tabella 4.6 Risultati delle prove con manichino, configurazione REST e vortex generator ST1*

<b>Numero Prova</b>	<b>Velocità [m/s]</b>	<b>Densità [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>FX [kg]</b>	<b>C<sub>D</sub>A [m<sup>2</sup>]</b>
ID013	15.00	1.177	3.682	0.273
ID014	25.00	1.174	9.965	0.266
ID015	35.00	1.166	19.490	0.268



*Figura 4.5 Dettaglio del vortex generator a tre denti (ST1)*

Confrontando questi risultati con la prova dell'aeromappa in configurazione Rest risulta evidente come l'introduzione del nastro abbia portato ad una riduzione tra due e tre millesimi di C<sub>D</sub>A. Rispetto al solo nastro, l'aggiunta del generatore di vortici ha ridotto ulteriormente la resistenza nella prova a 25 m/s mentre nessun guadagno è stato evidenziato alla velocità più bassa. Con questa configurazione la differenza rispetto all'assetto di riferimento si è mantenuta costante per tutte le velocità provate.

Tabella 4.7 Differenza di coefficiente di resistenza aerodinamica per le prove con nastro e vortex generator ST1, i valori della configurazione REST sono stati usati come riferimento

ADD-ON		15 m/s	25 m/s	35 m/s
Nastro	$\Delta C_{DA}$	-0.003	-0.002	/
	Differenza %	-1.0%	-0.7%	/
ST1	$\Delta C_{DA}$	-0.003	-0.003	-0.003
	Differenza %	-1.0%	-1.1%	-1.0%

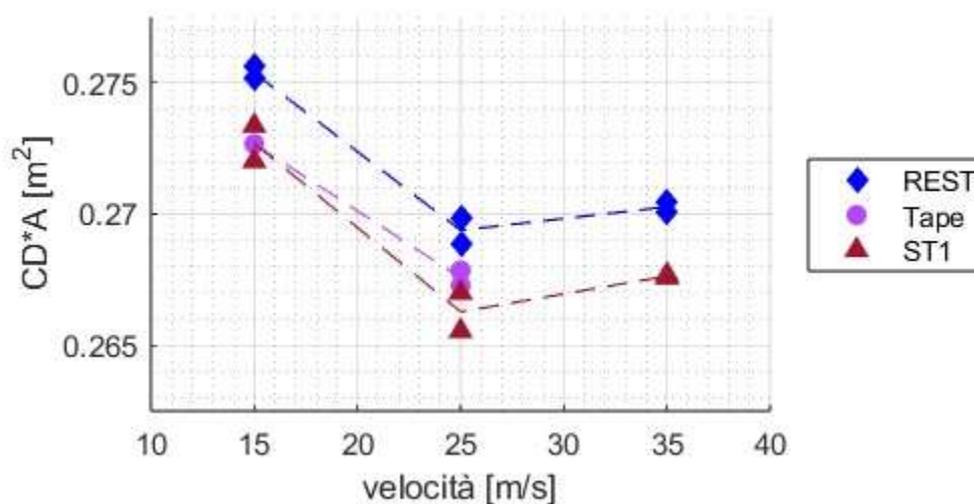


Figura 4.6 Coefficienti di resistenza in funzione della velocità in camera di prova e della geometria della carena

Le rimanenti geometrie di vortex generators sono state invece provate con in sella alla moto il reale pilota della squadra. In questo caso il confronto è stato effettuato con i risultati della prova con il pilota nella posizione di minima resistenza.

Tabella 4.8 Risultati relativi alle prove con pilota, configurazione REST e vortex generator ST2

Numero Prova	Velocità [m/s]	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	FX [kg]	C <sub>D</sub> A [m <sup>2</sup> ]
ID031	15.00	1.169	3.433	0.256
ID032	25.00	1.169	9.615	0.258

Tabella 4.9 Risultati relativi alle prove con pilota, configurazione REST e vortex generator ST3

<b>Numero</b>	<b>Velocità</b>	<b>Densità</b>	<b>FX</b>	<b>C<sub>D</sub>A</b>
<b>Prova</b>	<b>[m/s]</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>[kg]</b>	<b>[m<sup>2</sup>]</b>
ID033	15.00	1.171	3.588	0.267
ID034	25.00	1.169	9.806	0.263

Tabella 4.10 Differenza di coefficiente di resistenza aerodinamica per vortex generator ST2 e ST3, i valori di riferimento sono relativi alla posizione di minor resistenza del pilota

<b>ADD-ON</b>		<b>15 m/s</b>	<b>25 m/s</b>
ST2	$\Delta C_{DA}$	-0.012	-0.003
	Differenza %	-4.3%	-1.2%
ST3	$\Delta C_{DA}$	-0.001	+0.002
	Differenza %	-0.2%	+0.8%

I risultati delle prove effettuate con il pilota sono inconcludenti. La versione ST3 non sembra offrire miglioramenti significativi rispetto alla prova senza generatore di vortici, la misura effettuata con add-on ST2 e velocità 15 m/s risulta invece essere troppo differente dalle altre per poterla considerare affidabile. È evidente che prove comparative di questo genere non possono essere effettuate con il pilota reale. Modifiche involontarie della sua posizione possono infatti facilmente coprire gli effetti dell'aggiunta di questi componenti.

## 4.4 Ottimizzazione postura pilota

Tabella 4.11 Risultati delle prove relative alla prima posizione provata dal pilota

Numero Prova	Velocità [m/s]	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	FX [kg]	C <sub>D</sub> A [m <sup>2</sup> ]
ID018	15.00	1.174	3.801	0.282
ID019	25.00	1.173	10.435	0.279

Nella prima posizione provata, la configurazione della moto con il pilota reale ha fatto registrare un incremento significativo di resistenza rispetto al manichino. Questo aumento, dell'ordine di un centesimo di C<sub>D</sub>A, equivale al quattro per cento della resistenza totale. Questa differenza può essere spiegata da un effetto combinato delle diverse dimensioni e proporzioni tra manichino e pilota reale, oltre che dalle posizioni assunte in moto. A partire dalle immagini di Figura 4.7 è possibile effettuare un confronto tra le due posture:

- La posizione della testa è simile tra le due configurazioni, con quella del pilota leggermente più bassa. La forma del casco presenta invece delle differenze significative: il casco del pilota è più arrotondato mentre quello del manichino presenta degli spigoli più definiti che favoriscono una separazione più netta. Il casco in dotazione al manichino presenta anche un prolungamento nella parte superiore che, insieme alla gobba sulla tuta, contribuisce a generare una forma continua con la schiena del pilota.
- Il pilota è in grado di appoggiarsi correttamente alla sella e questo gli permette di occupare una posizione più bassa rispetto al manichino.
- Nonostante la posizione più bassa del corpo, le spalle del pilota risultano essere contemporaneamente più larghe e alte rispetto al manichino. Questo fa sì che, nonostante la posizione più stretta delle mani e degli avambracci, le braccia del pilota siano maggiormente esposte al flusso d'aria.
- Le ginocchia del pilota sono più strette mentre le gambe e soprattutto gli stivali sono più esterni ed esposti al vento.

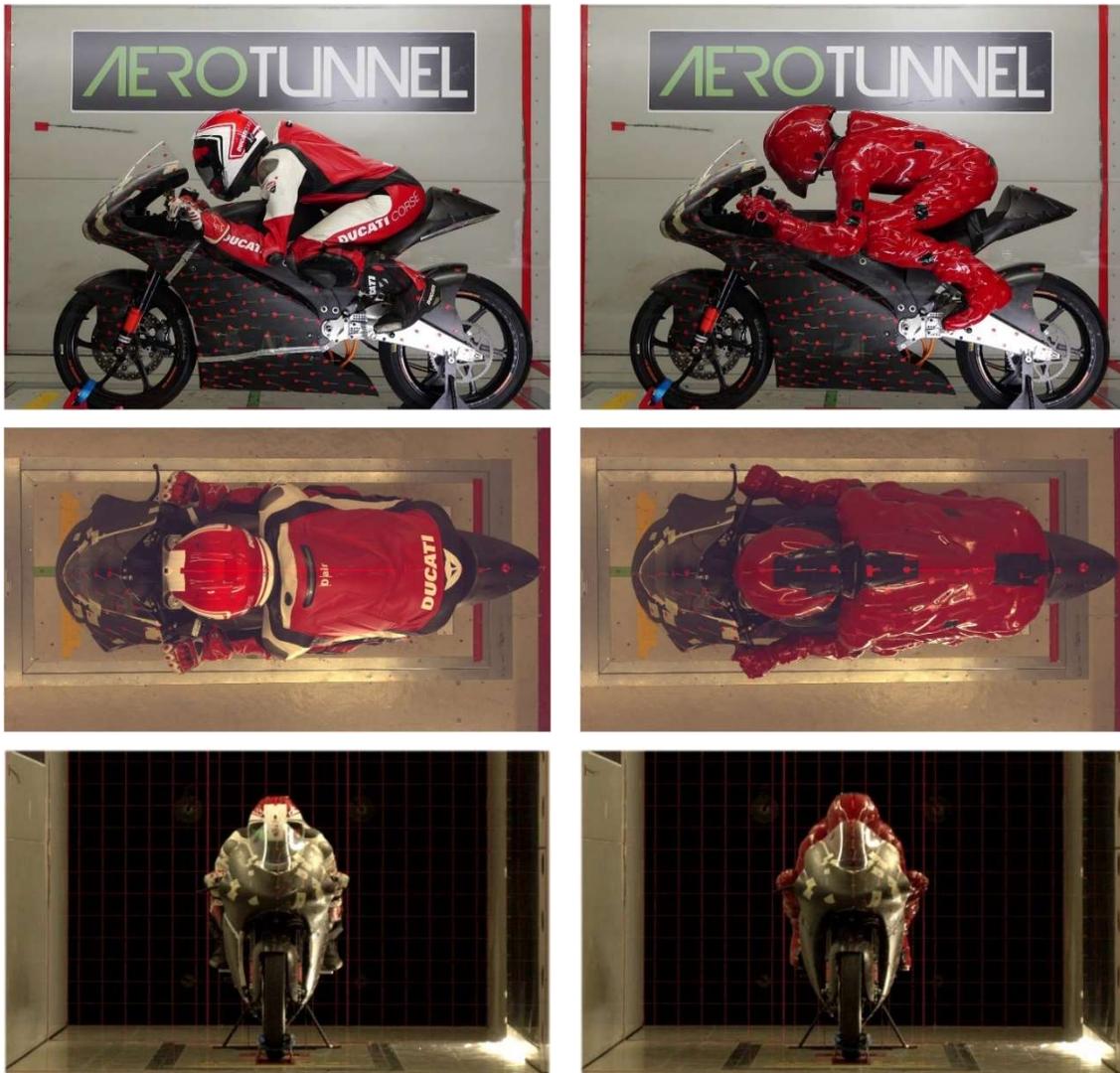


Figura 4.7 Confronto tra le posizioni in sella del pilota reale (TEST\_ID018) e del manichino, moto in configurazione REST

Sulla base delle considerazioni sopra riportate, si può ipotizzare che l'aumento di resistenza sia principalmente dovuto alla posizione più esposta di gambe e spalle del pilota, oltre a possibili effetti legati alla geometria del casco.

Tabella 4.12 Risultati delle prove relative alla seconda posizione provata dal pilota

Numero Prova	Velocità [m/s]	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	FX [kg]	CdA [m <sup>2</sup> ]
ID021	15.00	1.169	3.589	0.268
ID022	25.00	1.169	9.732	0.261

Tabella 4.13 Risultati delle prove relative alla terza posizione provata dal pilota

Numero Prova	Velocità [m/s]	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	FX [kg]	C <sub>D</sub> A [m <sup>2</sup> ]
ID023	15.00	1.173	3.600	0.268
ID024	25.00	1.171	9.895	0.265

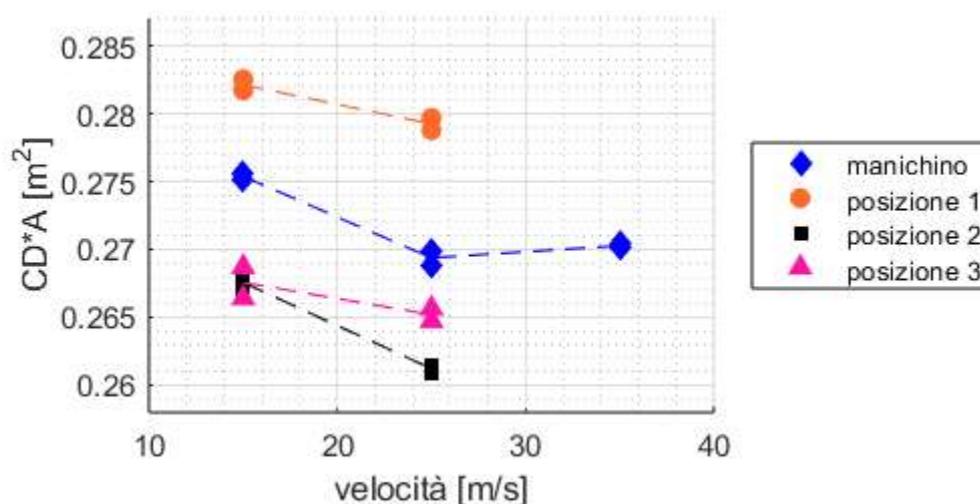


Figura 4.8 Coefficienti di resistenza in funzione della velocità in camera di prova e della posizione del pilota

Tra le posizioni provate, quella di minima resistenza risulta essere la seconda, con una riduzione media di  $-0.016 C_{DA}$  (-5.8%) rispetto alla posizione iniziale. I risultati della terza posizione sono inizialmente in linea con quanto ottenuto per posizione 2, nella prova a velocità maggiore però i risultati delle due posizioni si allontanano tra loro. Questo comportamento potrebbe essere dovuto ad un movimento involontario del pilota che lo ha allontanato dalla posizione di minima resistenza.

I risultati di queste prove sembrano confermare l'ipotesi fatta in precedenza del legame tra resistenza e posizione delle gambe del pilota. Un secondo vantaggio di questa postura potrebbe essere legato alla posizione degli avambracci che, trovandosi a contatto con la superficie delle carene, sono più protetti dal flusso d'aria. Questa posizione fa anche sì che pilota e moto vadano a formare una superficie continua, potenzialmente contribuendo a migliorare la qualità del flusso in quella zona.

## 4.5 Posizione di frenata

Tabella 4.14 Risultati delle prove con pilota in posizione di frenata e moto in assetto REST

Numero Prova	Velocità [m/s]	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	FX [kg]	C <sub>D</sub> A [m <sup>2</sup> ]
ID025	15.00	1.173	6.382	0.474
ID026	25.00	1.171	17.889	0.480
ID027	35.00	1.165	36.036	0.495

Tabella 4.15 Risultati delle prove con pilota in posizione di frenata e moto in assetto MAX BRAKING

Numero Prova	Velocità [m/s]	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	FX [kg]	C <sub>D</sub> A [m <sup>2</sup> ]
ID028	15.00	1.168	6.19	0.462
ID029	25.00	1.168	17.477	0.469
ID030	35.00	1.162	35.477	0.489

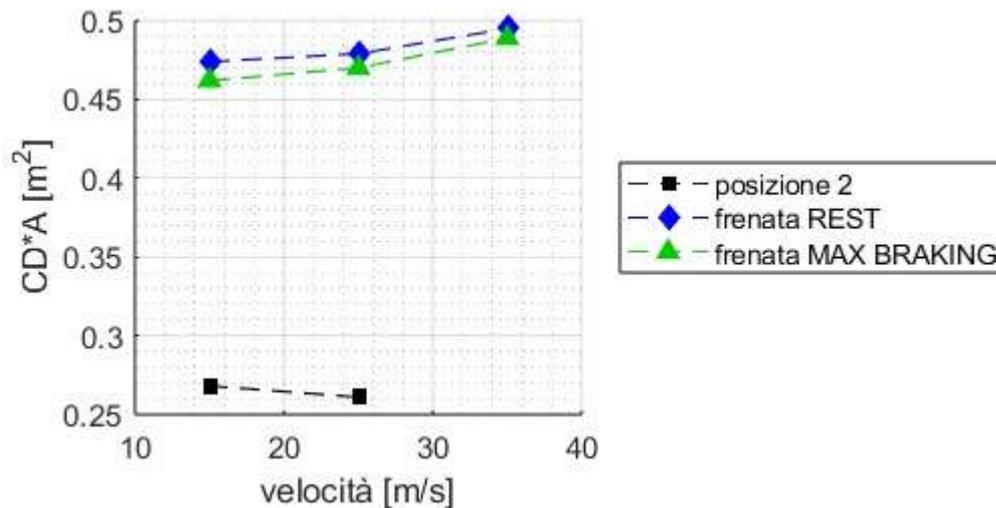


Figura 4.9 Coefficiente di resistenza per le prove con il pilota in posizione di frenata

A pari assetto della moto, il passaggio dalla posizione di minima resistenza a quella di frenata fa registrare un aumento di resistenza pari a +0.212 C<sub>D</sub>A (+80%). L'introduzione del corretto assetto della moto riduce leggermente la resistenza (-0.011 C<sub>D</sub>A), un comportamento in linea con quanto presentato nel capitolo 4.2. I risultati ottenuti sono

coerenti con quanto riportato da Wiński e Piechna [6] che, nello studio di un prototipo MotoStudent tramite analisi CFD, hanno ottenuto un incremento del  $C_{DA}$  pari a +89.3% per effetto della posizione del pilota.

## 4.6 Confronto con simulazioni numeriche

Questo ultimo capitolo è dedicato all'analisi dei risultati delle simulazioni numeriche ed al confronto di questi con i dati ottenuti nella sessione di test in galleria del vento. Nella tabella che segue sono indicati i risultati delle quattro simulazioni svolte. La prima (Open Road) è rappresentativa delle condizioni in pista, le rimanenti tre simulazioni sono state invece svolte nel dominio con le dimensioni della camera di prova della galleria del vento.

*Tabella 4.16 Risultati delle simulazioni numeriche effettuate con il dominio delle dimensioni della camera di prova*

<b>Assetto Moto</b>	<b>Velocità</b> [m/s]	<b>Densità</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>FX</b> [N]	<b>C<sub>DA</sub></b> [m <sup>2</sup> ]	<b>FZ</b> [N]	<b>C<sub>LA</sub></b> [m <sup>2</sup> ]
Rest (Open Road)	25.00	1.225	76.1	0.198	6.6	0.017
Rest	25.00	1.225	90.3	0.236	23.2	0.061
Max Braking	25.00	1.225	85.5	0.223	12.0	0.031
Max Acceleration	25.00	1.225	92.2	0.241	29.3	0.077

*Tabella 4.17 Differenza tra il coefficiente di resistenza ottenuto tramite simulazioni numeriche e quello in galleria del vento per i tre assetti della moto.*

<b>Assetto Moto</b>	<b>C<sub>DA</sub> WT</b> [m <sup>2</sup> ]	<b>C<sub>DA</sub> CFD</b> [m <sup>2</sup> ]	<b>ΔC<sub>DA</sub></b> [m <sup>2</sup> ]	<b>ΔC<sub>DA</sub></b> [%]
Rest	0.269	0.236	-0.034	-12.5%
Max Braking	0.255	0.223	-0.031	-12.4%
Max Acceleration	0.279	0.241	-0.038	-13.7%

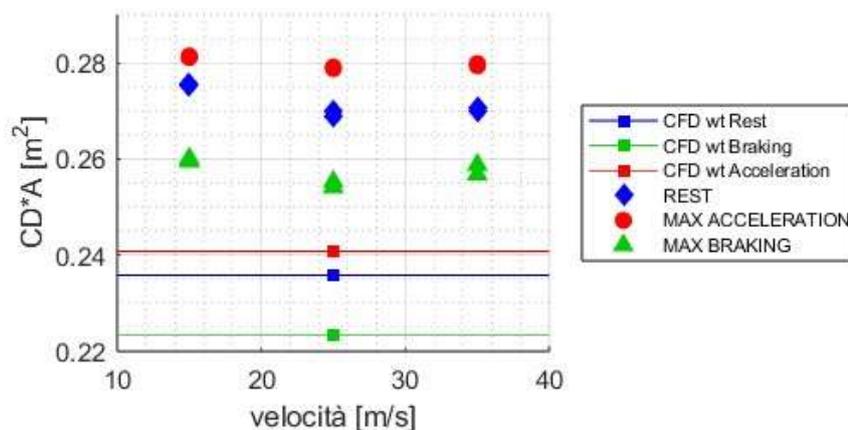


Figura 4.10 Confronto tra i coefficienti di resistenza ottenuti in galleria del vento e tramite simulazioni numeriche

La

Tabella 4.17 evidenzia le differenze tra i risultati sperimentali (prove a 25 m/s) e quelli ottenuti tramite simulazione numerica. Le analisi CFD svolte sottostimano la resistenza in tutti gli assetti della moto. Tuttavia, questa differenza è abbastanza stabile tra le tre configurazioni simulate, intorno a poco più di tre centesimi di  $C_{DA}$ . Per quanto riguarda l'assetto di massima frenata sia la galleria del vento che le simulazioni numeriche stimano una simile riduzione di coefficiente di resistenza, nell'assetto di massima accelerazione invece l'analisi CFD stima un incremento minore di quanto riscontrato in galleria del vento.

Tabella 4.18 Differenze tra l'assetto di riferimento (REST) e quelli di massima accelerazione e frenata, confronto tra CFD e galleria del vento

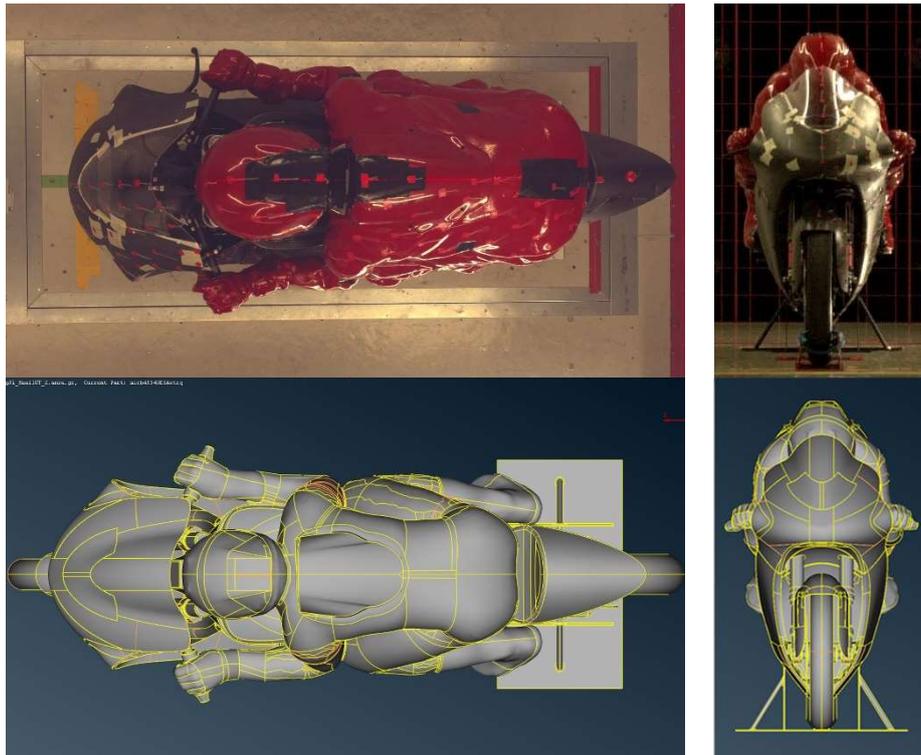
ASSETTO		CFD	Wind Tunnel
Frenata	$\Delta C_{DA}$	-0.013	-0.015
	Differenza %	-5.3%	-5.5%
Accelerazione	$\Delta C_{DA}$	+0.005	+0.010
	Differenza %	+2.1%	+3.6%

Questi risultati sembrano confermare la capacità delle simulazioni numeriche di stimare con buona precisione le differenze tra più configurazioni o assetti della moto, faticando però a fornire il valore esatto della resistenza (Tabella 4.18). È comunque necessario

chiarire che le simulazioni numeriche presentate in questa tesi sono relative ad una geometria che presenta alcune differenze rispetto a quanto provato in galleria del vento:

- Il dominio delle simulazioni è rappresentativo delle dimensioni della sola camera di prova, non è stato possibile ottenere informazioni dettagliate sulla forma del convergente e del divergente. Questa differenza nella geometria può influenzare lo spessore dello strato limite sulle pareti.
- Il manichino usato nella simulazione CFD non è una replica esatta di quello utilizzato nei test in galleria. Si tratta piuttosto del modello usato per le simulazioni di sviluppo delle carene con alcune modifiche alla posizione e al casco per avvicinarlo alla geometria reale.
- Il manichino usato in galleria ha una superficie dalla forma complessa e che ricrea il comportamento del tessuto di una tuta da pilota. Il manichino delle simulazioni CFD ha invece una superficie perfettamente liscia.
- Per abbassare il numero di elementi della griglia di calcolo e quindi ridurre il costo computazionale della simulazione, non tutti i componenti presenti sulla moto reale sono stati ricreati nel modello virtuale. Altri componenti sono stati invece semplificati ed alcuni dettagli rimossi.
- I componenti presenti nel modello CFD sono perfetti e hanno una superficie dalla rugosità nulla. I componenti in moto possono presentare dei difetti di produzione e di montaggio, la superficie delle carene è poi interrotta dalla presenza delle giunzioni e “sporcata” dai fili di lana.
- All’interno delle simulazioni è stato introdotto il supporto posteriore, per il supporto anteriore, di proprietà di AeroTunnel, non è stato possibile raccogliere informazioni sufficienti sulla forma e dimensioni ed è quindi assente nel modello virtuale. Nelle simulazioni CFD sono stati inoltre ignorati eventuali effetti della presenza della piattaforma della bilancia sotto la moto.

Queste differenze geometriche, visibili in Figura 4.11, possono in parte spiegare la differenza di  $C_{DA}$  che non sarebbe quindi interamente dovuta alle caratteristiche della simulazione numerica in sé.



*Figura 4.11 Confronto tra la moto portata in galleria del vento e il modello virtuale utilizzato per le simulazioni CFD*

Le registrazioni dei tufts sono state utilizzate per svolgere un ulteriore confronto con le simulazioni numeriche. La posizione dei fili può essere confrontata lo sforzo di taglio sulla parete, più correttamente il corrispettivo coefficiente adimensionale, ricavato dalle simulazioni numeriche. Nelle immagini che seguono, questo campo vettoriale è stato rappresentato grazie alla tecnica Line Integral Convolution (LIC) [31] che contemporaneamente mostra informazioni sull'intensità e la direzione del campo, mantenendone visibili tutte le strutture.

Figura 4.12 e Figura 4.13 mostrano come la simulazione sia in grado di modellare correttamente il comportamento del flusso sulla parte frontale della carena, e intorno al casco del pilota. Sia la simulazione che la galleria del vento sembrano indicare inoltre la presenza di un flusso turbolento dietro al pilota, questo è particolarmente evidente sul codino della moto che appare totalmente immerso in una zona di ricircolo del flusso. Maggiori differenze si notano sulla schiena del pilota, la simulazione sembra indicare una separazione del flusso dietro al rigonfiamento della tuta, comportamento che però il movimento dei fili in galleria non evidenzia. È differente anche il comportamento del flusso attorno alle spalle del pilota che in galleria appare più instabile e turbolento rispetto alla simulazione.



Figura 4.12 Fermo immagine di TEST\_ID003, moto in configurazione REST. Vista superiore

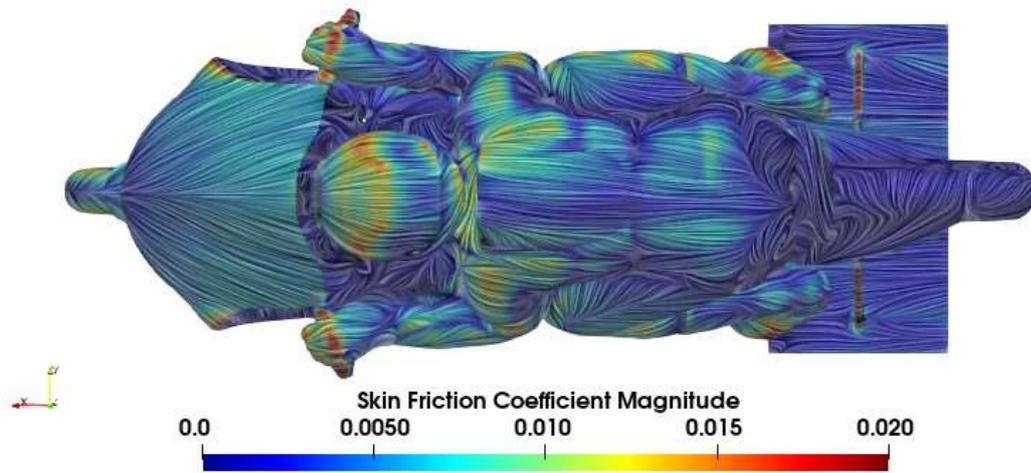


Figura 4.13 Contour + LIC di Skin Friction Coefficient ottenuto da simulazione CFD. Vista superiore

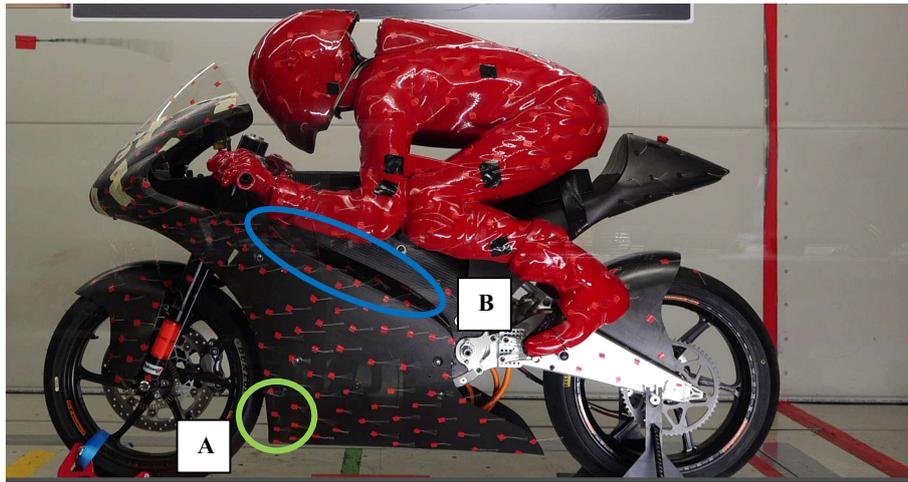


Figura 4.14 Fermo immagine della run a 25m/s con la moto in assetto rest. Vista laterale

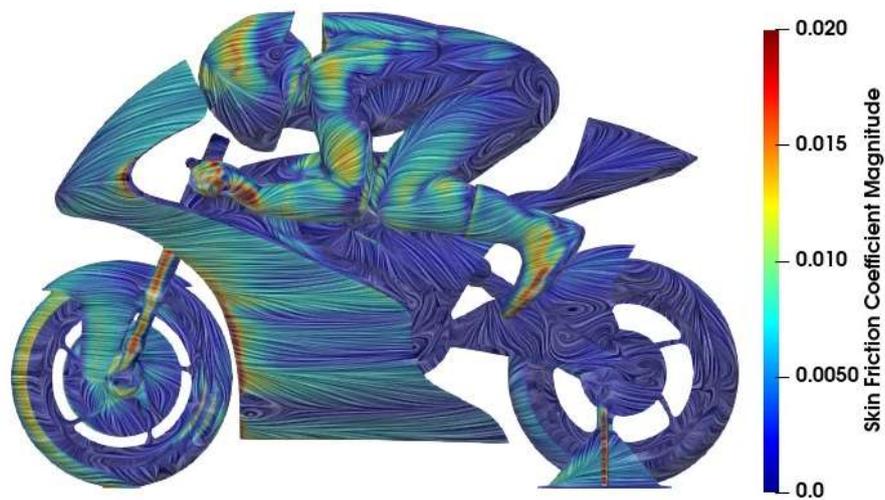


Figura 4.15 Contour + LIC di Skin Friction Coefficient ottenuto da simulazione CFD. Vista laterale

La vista laterale evidenzia un comportamento del flusso intorno alle carene e al parafango anteriore che è simile tra CFD e galleria del vento. Nella simulazione è possibile individuare una zona di flusso separato nella parte bassa della carena, questa stessa separazione è stata riscontrata anche in galleria del vento come mostrano i fili all'interno della zona A di Figura 4.14. Nella zona B il comportamento dei tufts si allontana dai risultati della simulazione, i fili risultano infatti ordinati e il flusso sembrerebbe seguire la superficie della moto, a differenza di quanto mostra Figura 4.15.

## 5 Conclusioni

Al termine di questa attività di studio delle caratteristiche aerodinamiche di un prototipo MotoStudent attraverso prove in galleria del vento, si può affermare che entrambi gli obiettivi che ci si era posti sono stati raggiunti.

Le prove con il pilota reale hanno dimostrato l'importanza della galleria del vento come strumento per l'ottimizzazione della postura. Attraverso una serie di modifiche alla posizione è stato infatti possibile ottenere una riduzione del 6,5% della resistenza aerodinamica di moto e pilota. Confrontando le immagini della posizione del pilota con quella del manichino, si è giunti alla conclusione che, per l'attuale geometria delle carene, il fattore più importante per la riduzione della resistenza è la posizione delle gambe e degli stivali del pilota, seguito dall'altezza e larghezza delle spalle del pilota. Una successiva prova con la moto in configurazione di frenata ha permesso di stimare l'incremento di resistenza dovuto alla posizione rialzata del pilota, questo è risultato essere un aumento pari all'80% del  $C_{DA}$  della configurazione con pilota in posizione di minima resistenza.

Le prove effettuate con il manichino e la moto nei tre assetti di riposo, frenata e accelerazione hanno dimostrato un legame tra la resistenza aerodinamica del prototipo e l'estensione della sospensione anteriore. La conclusione raggiunta è che questo comportamento sia dovuto a quella frazione del flusso d'aria che, passando in mezzo alle forcelle, è il principale responsabile della zona di alta pressione sulla paratia frontale delle carene. Il confronto di questi dati con i risultati di simulazioni numeriche ha dimostrato come le analisi CFD siano in grado di stimare con un soddisfacente livello di precisione le variazioni nella resistenza dovute ai differenti assetti della moto. Allo stesso tempo, in tutte le simulazioni è stata riscontrata una sottostima del valore assoluto di resistenza, con il valore di  $C_{DA}$  ottenuto dalle simulazioni numeriche inferiore del 12.5% rispetto a quanto indicato dai risultati sperimentali in galleria del vento. Questa differenza è costante nei tre assetti provati ed è quindi stata in parte attribuita al diverso livello di dettaglio tra il modello virtuale e il prototipo utilizzato in galleria del vento.

Sfruttando la maggiore ripetibilità delle prove offerta dal manichino, sono stati valutati gli effetti di piccole modifiche alla geometria delle carene. L'utilizzo del nastro per ridurre le discontinuità sulla superficie della moto ha permesso di ottenere una riduzione

della resistenza totale dell'1%. Non è invece possibile trarre conclusioni definitive sull'impatto dei generatori di vortici. La prima geometria, provata con il manichino, ha mostrato un leggero miglioramento, le restanti versioni di vortex generators sono state provate con il pilota ma dei suoi movimenti involontari tra le acquisizioni hanno reso i dati non adatti al confronto.

## 5.1 Sviluppi futuri

Uno dei limiti più grandi del presente studio è stato il ridotto tempo a disposizione in galleria del vento. Questo ha influenzato il numero di prove ed in particolare è stato necessario ridurre il numero di test sui generatori di vortici e l'attività di ottimizzazione della postura del pilota. Dimostrata l'abilità delle simulazioni numeriche di stimare correttamente gli effetti delle variazioni di assetto, si ritiene che futuri test in galleria del vento debbano concentrarsi sulle sopra descritte prove comparative. Lo studio della posizione del pilota merita ulteriore attenzione, i dati raccolti in questa attività sono relativi a sole tre posture, gli effetti della posizione di braccia e gambe andrebbero inoltre studiati separatamente e con un numero di posizioni intermedie maggiore. È necessario precisare però che tutte queste prove possono avere senso solamente dopo che verrà individuata una soluzione per minimizzare gli spostamenti involontari del pilota, che hanno rappresentato un grande problema durante questo studio.

Ulteriori sviluppi devono essere dedicati anche alle analisi numeriche. Si potrebbe ad esempio aumentare il livello di dettaglio del modello virtuale della moto oltre che introdurre la geometria dell'effettivo manichino utilizzato in galleria del vento. Così facendo si dovrebbe ridurre la differenza tra CFD e dati sperimentali che è stata riscontrata in questo studio. Una seconda direzione di sviluppo è rappresentata dalla modellazione della galleria, in questo elaborato ci si è limitati all'uso di un dominio di calcolo delle dimensioni della camera di prova quando l'approccio più corretto prevede l'introduzione anche del convergente e divergente. Risulterebbe a quel punto possibile effettuare uno studio più completo sugli effetti di interferenza delle pareti per la specifica geometria della struttura. Si potrebbe espandere quindi il lavoro di Yang et al. [32] applicando il metodo presentato non solo al galleggiamento orizzontale ma anche agli effetti di bloccaggio, la presenza dei supporti della moto e l'assenza di movimento di pavimento e ruote.



## 6 Bibliografía

- [1] B. González Arcos, «Estudio del diseño y análisis de los apéndices aerodinámicos en MotoGP,» 2020.
- [2] G. Peri e J. Capuana, «Motorcycle aerodynamics: a CFD study from airfoil selection to winglet design for downforce increase and lap time reduction,» 2022.
- [3] B. González-Arcos e P. Gamez-Montero, «Aerodynamic Study of MotoGP Motorcycle Flow Redirectors,» *Energies*, vol. 16, p. 4793, June 2023.
- [4] S. Alfaro Ezcurra, «Estudio aerodinámico de una motocicleta de competición,» 2017.
- [5] A. López Santiago, «Diseño y estudio aerodinámico del carenado de una motocicleta de competición,» 2021.
- [6] K. Wiński e A. Piechna, «Comprehensive CFD Aerodynamic Simulation of a Sport Motorcycle,» *Energies*, vol. 15, n. 16, p. 5920, 2022.
- [7] E. Ljungskog, S. Sebben e A. Broniewicz, «Inclusion of the physical wind tunnel in vehicle CFD simulations for improved prediction quality,» *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 197, p. 104055, 2020.
- [8] C. Feichtinger, *Racebike Dynamics*, Verlag der Technischen Universität Graz, 2022.
- [9] T. Foale, *Motorcycle Handling and Chassis Design*, Tony Foale, 2006, pp. 128-158.
- [10] C. Vittore, *Motorcycle Dynamics*, 2006, pp. 113-121.
- [11] J. Katz, «Aerodynamics in motorsports,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, vol. 235, p. 175433711989322, December 2019.
- [12] D. Fintelman, H. Hemida, M. Sterling e F.-X. Li, «A numerical investigation of the flow around a motorbike when subjected to crosswinds,» *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 9, pp. 528-542, January 2015.
- [13] V. Sedlak, «Motorcycle Cornering Improvement : An Aerodynamical Approach based on Flow Interference,» 2012.
- [14] P. Ekman, *Important Factors for Accurate Scale-Resolving Simulations of Automotive Aerodynamics*, 2020.
- [15] S. B. Pope, *Turbulent Flows*, Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

- [16] F. R. Menter, «Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications,» *AIAA Journal*, vol. 32, pp. 1598-1605, 1994.
- [17] ANSYS Inc., *Ansys Fluent Theory Guide*, 2023, pp. 65-69.
- [18] S. Sabbatini, «Simulazione numerica diretta del flusso turbolento in un canale piano con riblet,» 2020.
- [19] X. Zhang, W. Toet e J. Zerihan, «Ground Effect Aerodynamics of Race Cars,» *Applied Mechanics Reviews*, vol. 59, pp. 33-49, 2006.
- [20] T. Hobeika e S. Sebben, «CFD investigation on wheel rotation modelling,» *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 174, pp. 241-251, 2018.
- [21] J. B. Barlow, W. H. Rae and A. Pope, *Low-speed wind tunnel testing*, 3rd ed ed., New York: Wiley New York, 1999.
- [22] J. Katz, *Race car aerodynamics : designing for speed*, Cambridge, MA: R. Bentley Cambridge, MA, USA, 2006.
- [23] C. Tropea, A. L. Yarin and J. F. Foss, *Springer handbook of experimental fluid mechanics*, Berlin: Springer Science+Business Media Berlin, 2007.
- [24] S. Melber-Wilkending e G. Wichmann, «Application of Advanced CFD Tools for High Reynolds Number Testing,» 2008.
- [25] S. Allmaras, «On blockage corrections for two-dimensional wind tunnel tests using the wall-pressure signature method,» April 1986.
- [26] E. C. Maskell, *A Theory of the Blockage Effects on Bluff Bodies and Stalled Wings in a Closed Wind Tunnel*, H.M. Stationery Office, 1965.
- [27] A. Hyvärinen, «Investigation of blockage correction methods for full-scale wind tunnel testing of trucks,» 2015.
- [28] R. Garimella, S. MOENS, J. Vleugels, T. Huysmans, K. BEYERS e S. VERWULGEN, «Development of an Articulating Cycling Mannequin for Wind Tunnel Testing,» 2020.
- [29] Dorna, «KTM aero taking tips from Formula 1?,» *motogp.com*, 19 Febbraio 2020. [Online]. Available: <https://www.motogp.com/it/news/2020/02/19/ktm-aero-taking-tips-from-formula-1/158696>.
- [30] E. Josefsson, T. Hobeika e S. Sebben, «Evaluation of wind tunnel interference on numerical prediction of wheel aerodynamics,» *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 224, p. 104945, 2022.
- [31] B. Cabral e L. C. Leedom, «Imaging Vector Fields Using Line Integral Convolution,» in *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, New York, NY, USA, 1993.

[32] Z. Yang, M. Schenkel e G. Fadler, «Corrections for the Pressure Gradient Effect on Vehicle Aerodynamic Drag,» 2003.

[33] Moto Engineering Foundation, *Rules & Regulations Document of MotoStudent VII Edition (2023)*, 2022.

# Appendice A

## Fasi della competizione

Durante la fase MS1 è richiesto alla squadra di giustificare le scelte fatte durante la progettazione, lo sviluppo e la costruzione del prototipo. Il team deve presentarsi come un'ipotetica squadra corse ed è quindi richiesto che vengano considerati anche gli aspetti economici e gestionali del progetto. Per guidare la squadra nello sviluppo, la fase MS1 è a sua volta composta dai seguenti capitoli:

- A. Concept development
- B. Product design
- C. Prototyping and testing
- D. Innovation
- E. Management plan

<b>MS1 Deliveries</b>	<b>Score</b>
<b>A. Concept development</b>	50
<b>B. Product design</b>	90
<b>C. Prototyping and testing</b>	60
<b>D. Innovation</b>	100
<b>E. Management plan</b>	100
<b>Presentations</b>	<b>Score</b>
<b>MS1 InnoCall presentation</b>	35
<b>MotoStudent Pitch</b>	45
<b>Final Event Presentation</b>	<b>Score</b>
<b>MS1 Finals</b>	20
<b>TOTAL</b>	<b>500</b>

*Figura A1 Massimo punteggio assegnabile nei diversi capitoli della fase MS1  
(tabella da Regolamento MotoStudent [33])*

La fase MS2 consiste in una serie di prove aventi lo scopo di valutare il comportamento dinamico e le prestazioni del prototipo. Le prove sono le seguenti:

- **Brake Test:** al pilota è richiesto di portare la moto ad uno stop completo da una velocità iniziale minima di 80km/h, l'obiettivo è ottenere la minor distanza di frenata possibile.

- **Gymkhana:** al pilota è richiesto di percorrere un tracciato delimitato da coni nel minor tempo possibile. Durante la prova è messa alla prova la maneggevolezza della moto ed eventuali contatti con i coni sono oggetto di penalità.
- **Acceleration:** consiste in una prova di accelerazione da fermo su un rettilineo di lunghezza 150m, l'obiettivo è realizzare il minor tempo possibile.
- **$V_{max}$ :** durante le prove libere 1 viene registrata la velocità dei prototipi in un punto della pista (Speed Trap). Il punteggio della prova è assegnato sulla base della massima velocità fatta registrare.
- **Regularity:** durante le prove libere 2 viene valutata la regolarità negli intertempi del secondo settore del circuito. Dati i tre tempi più vicini tra loro, il punteggio della prova è basato sulla differenza tra il migliore ed il peggiore di questi tempi.
- **Pole Position:** il punteggio di questa prova è assegnato in base alla posizione ottenuta nella sessione di qualifica.
- **Best Race Lap:** il punteggio di questa prova è assegnato in base al miglior tempo fatto registrare durante la gara.
- **Race Result:** il punteggio di questa prova è assegnato in base ai risultati finali della gara. La distanza di gara è 7 giri per i prototipi Petrol e 5 giri per quelli Electric.

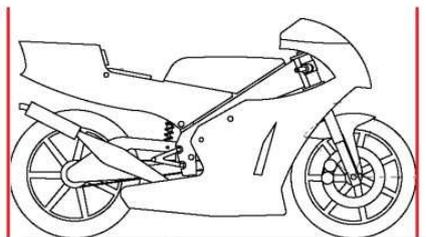
Session	Test	Scoring
<b>Round 1 / Round 2</b>	Test 1: Brake Test	80
	Test 2: Gymkhana	60
	Test 3: Acceleration	80
<b>Free Practice 1</b>	Test 4: $V_{max}$ in speed trap	30
<b>Free Practice 2</b>	Test 5: Regularity	30
<b>Qualifying</b>	Test 6: Pole Position	40
<b>Final Race &gt; Play-Off Race</b>	Test 7: Best Race Lap	30
	Test 8: Race Result	150
<b>Total</b>		<b>500</b>

*Figura A2 Massimo punteggio assegnabile nelle prove della fase MS2  
(tabella da Regolamento MotoStudent [33])*

## Regolamento Tecnico

Per poter partecipare alla fase MS2 è necessario che il prototipo realizzato dalla squadra rispetti una serie di norme contenute nel regolamento tecnico, la conformità al regolamento viene controllata durante le verifiche tecniche all'inizio dell'evento finale. Nel regolamento sono presenti norme atte a salvaguardare la sicurezza dei partecipanti, vengono poi introdotti alcuni componenti standard con lo scopo di bilanciare le prestazioni delle moto. Si presentano ora alcuni dei punti riguardanti l'aerodinamica del prototipo.

- 1) La minima larghezza tra le estremità dei semimanubri è 450mm.
- 2) La moto deve poter raggiungere un angolo di piega minimo di  $50^\circ$  senza che nessun elemento, fatta eccezione delle gomme, tocchi il terreno.
- 3) L'altezza da terra del prototipo deve essere almeno 100mm, misurata senza pilota.
- 4) Tutti i componenti della moto devono essere all'interno dello spazio definito da due piani verticali tangenti la superficie esterna delle ruote anteriore e posteriore.



*Figura A3 Limite frontale e posteriore per la posizione dei componenti in moto  
(immagine da Regolamento MotoStudent [33])*

- 5) Qualunque componente della moto deve mantenere una distanza minima dagli pneumatici di almeno 15mm in ogni posizione e per qualunque assetto.
- 6) La massima larghezza della coda della moto è 450mm, la massima differenza di altezza tra sella e coda è 150mm.
- 7) La massima larghezza della carenatura della moto è 600mm.
- 8) In vista laterale la carenatura non può coprire il pilota, fatta eccezione per gli avambracci nella sola posizione di minima resistenza aerodinamica.

L'uso di elementi aerodinamici, fissi e mobili, è permesso a patto che rispettino le dimensioni massime precedentemente indicate.



# Appendice C

TECHNICAL TIMETABLE - Wind Tunnel									
	Ora Inizio	Ora Fine	Attività	Test code	Priorità	Speed [m/s]	Rider	Config.	Fairings
	9:00	9:15	Preparation	Rest-Dummy-35	0	35	Dummy	Rest	
Aeromappa	9:15	9:20	Test Set-up		0	-	Dummy	Rest	
	9:20	9:25	Misura Forze	Rest-Dummy-15	0	15	Dummy	Rest	
	9:25	9:30	Misura Forze	Rest-Dummy-25	0	25	Dummy	Rest	
	9:30	9:35	Misura Forze	Rest-Dummy-35	0	35	Dummy	Rest	
	9:35	9:50	Set-Up change		1	-	Dummy	MA	
	9:50	9:55	Test Set-up		1	-	Dummy	MA	
	9:55	10:00	Misura Forze	MA-Dummy-15	1	15	Dummy	MA	
	10:00	10:05	Misura Forze	MA-Dummy-25	1	25	Dummy	MA	
	10:05	10:10	Misura Forze	MA-Dummy-35	1	35	Dummy	MA	
	10:10	10:25	Set-Up change		1	-	Dummy	MB	
	10:25	10:30	Test Set-up		1	-	Dummy	MB	
	10:30	10:35	Misura Forze	MB-Dummy-15	1	15	Dummy	MB	
	10:35	10:40	Misura Forze	MB-Dummy-25	1	25	Dummy	MB	
	10:40	10:45	Misura Forze	MB-Dummy-35	1	35	Dummy	MB	
10:45	11:00	Set-Up change		2	-	Dummy	Rest		
Add-ons Tests	11:00	11:10	Aero Change		2	-	Dummy	Rest	ST1
	11:10	11:15	Test Set-up		2	-	Dummy	Rest	ST1
	11:15	11:20	Misura Forze	Rest-Dummy-15 ST1	2	15	Dummy	Rest	ST1
	11:20	11:25	Misura Forze	Rest-Dummy-25 ST1	2	25	Dummy	Rest	ST1
	11:25	11:30	Misura Forze	Rest-Dummy-35 ST1	2	35	Dummy	Rest	ST1
	11:30	11:40	Aero Change		3	-	Dummy	Rest	ST2
	11:40	11:45	Test Set-up		3	-	Dummy	Rest	ST2
	11:45	11:50	Misura Forze	Rest-Dummy-15 ST2	3	15	Dummy	Rest	ST2
	11:50	11:55	Misura Forze	Rest-Dummy-25 ST2	3	25	Dummy	Rest	ST2
	11:55	12:00	Misura Forze	Rest-Dummy-35 ST2	3	35	Dummy	Rest	ST2
	12:00	12:10	Aero Change		3	-	Dummy	Rest	ST3
	12:10	12:15	Test Set-up		3	-	Dummy	Rest	ST3
	12:15	12:20	Misura Forze	Rest-Dummy-15 ST3	3	15	Dummy	Rest	ST3
	12:20	12:25	Misura Forze	Rest-Dummy-25 ST3	3	25	Dummy	Rest	ST3
12:25	12:30	Misura Forze	Rest-Dummy-35 ST3	3	35	Dummy	Rest	ST3	
Fumo	12:30	12:40	Aero Change		2	-	Dummy	Rest	
	12:40	12:50	Smoke Set-Up		2	-	Dummy	Rest	
	12:50	13:00	Smoke Vis	Rest-Dummy-15	2	15	Dummy	Rest	

	13:00	14:00	Lunch						
Rider Optimization	14:00	14:20	Dummy Disassembly		0	-	Marco	Rest	
	14:20	14:30	Rider Preparation		0	-	Marco	Rest	
	14:30	14:35	Test Set-up		0	-	Marco	Rest	
	14:35	14:40	Misura Forze	Rest-Marco-15	0	15	Marco	Rest	
	14:40	14:45	Misura Forze	Rest-Marco-25	0	25	Marco	Rest	
	14:45	14:50	Misura Forze	Rest-Marco-35	0	35	Marco	Rest	
	14:50	14:55	Test Set-up		1	-	Marco	Rest	
	14:55	15:40	Rider Optimization	Rest-Marco-25	1	25	Marco	Rest	
Braking	15:40	15:55	Set-Up change		2	-	Marco	MB	
	15:55	16:00	Test Set-up		2	-	Marco	MB	
	16:00	16:05	Misura Forze	MB-Marco-15	2	15	Marco	MB	
	16:05	16:10	Misura Forze	MB-Marco-25	2	25	Marco	MB	
	16:10	16:15	Misura Forze	MB-Marco-35	2	35	Marco	MB	
Add-ons Tests	16:15	16:30	Set-Up change		4	-	Marco	Rest	ST1
	16:30	16:40	Aero Change		4	-	Marco	Rest	ST1
	16:40	16:45	Test Set-up		4	-	Marco	Rest	ST1
	16:45	16:50	Misura Forze	Rest-Marco-15 ST1	4	15	Marco	Rest	ST1
	16:50	16:55	Misura Forze	Rest-Marco-25 ST1	4	25	Marco	Rest	ST1
	16:55	17:00	Misura Forze	Rest-Marco-35 ST1	4	35	Marco	Rest	ST1
Fumo	17:00	17:10	Aero Change		3	-	Marco	Rest	
	17:10	17:20	Smoke Set-Up		3	-	Marco	Rest	
	17:20	17:30	Smoke Vis	Rest-Marco-15	3	15	Marco	Rest	
END	17:30	17:45	Dismounting		0				
	17:45	18:00	Truck loading		0				

## Appendice D

Qui sono riportate le formule utilizzate per effettuare una stima della densità dell'aria in camera di prova (fonte AeroTunnel):

$$\rho = \left( \frac{p_d}{R_d T} \right) + \left( \frac{p_v}{R_v T} \right)$$

$\rho$ : densità [ $kg/m^3$ ]

$p_d$ : pressione dell'aria secca [ $Pa$ ]

$p_v$ : pressione di vapore [ $Pa$ ]

$R_d$ : costante dei gas per l'aria secca =  $287.052 J/kg K$

$R_v$ : costante dei gas per il vapore acqueo =  $461.495 J/kg K$

$T$ : Temperatura [ $K$ ]

### 1. Pressione di saturazione del vapore d'acqua

$$E_s = \frac{e_{s0}}{p^8}$$

$E_s$ : pressione di saturazione del vapore d'acqua

$e_{s0} = 6.1078$

$$p = c_0 + T \left( c_1 + T \left( c_2 + T \left( c_3 + T \left( c_4 + T \left( c_5 + T \left( c_6 + T \left( c_7 + T \left( c_8 + T \left( c_9 \right) \right)$$

$T$ : Temperatura [ $^{\circ}C$ ]

$c_0 = 0.99999683$

$c_1 = -0.0090826951$

$c_2 = 7.8736169 \cdot 10^{-5}$

$c_3 = -6.1117958 \cdot 10^{-7}$

$c_4 = 4.3884187 \cdot 10^{-9}$

$c_5 = -2.9883885 \cdot 10^{-11}$

$c_6 = 2.1874425 \cdot 10^{-13}$

$c_7 = -1.7892321 \cdot 10^{-15}$

$$c_8 = 0.11112018 \cdot 10^{-17}$$

$$c_9 = -0.30994571 \cdot 10^{-20}$$

## 2. Pressione di vapore

$$p_v = RH \cdot E_s$$

$p_v$ : pressione di vapore [Pa]

$RH$ : umidità relativa [%]

$E_s$ : pressione di saturazione del vapore d'acqua

## 3. Pressione dell'aria secca

$$p_d = p - p_v$$

$p_d$ : pressione dell'aria secca [Pa]

$p$ : pressione totale [Pa]

$p_v$ : pressione di vapore [Pa]

## Appendice E

Di seguito è riportato l'elenco di tutte le prove svolte e relative configurazioni di moto e galleria del vento. Sono poi riportati i dati relativi ad ogni singola acquisizione effettuata durante la giornata.

<b>TEST_ID</b>	<b>Configurazione Moto</b>	<b>Configurazione Pilota</b>	<b>Velocità [m/s]</b>	<b>Altro</b>
1	Rest	Dummy	39	PROVA
2	Rest	Dummy	15	
3	Rest	Dummy	25	
4	Rest	Dummy	35	
5	Acceleration	Dummy	15	
6	Acceleration	Dummy	25	
7	Acceleration	Dummy	35	
8	Braking	Dummy	15	
9	Braking	Dummy	25	
10	Braking	Dummy	35	
11	Rest	Dummy	15	TAPE
12	Rest	Dummy	25	TAPE
13	Rest	Dummy	15	ST1
14	Rest	Dummy	25	ST1
15	Rest	Dummy	35	ST1
18	Rest	Rider	15	
19	Rest	Rider	25	
20	Rest	Rider	39	
21	Rest	Rider	15	
22	Rest	Rider	25	
23	Rest	Rider	15	
24	Rest	Rider	25	
25	Rest	Rider	15	STANDING
26	Rest	Rider	25	STANDING
27	Rest	Rider	35	STANDING
28	Braking	Rider	15	STANDING
29	Braking	Rider	25	STANDING
30	Braking	Rider	35	STANDING
31	Rest	Rider	15	ST2
32	Rest	Rider	25	ST2
33	Rest	Rider	15	ST3
34	Rest	Rider	25	ST3

ID	Acq.	FX [Kg]	FY [Kg]	FXZ [Kg]	MX [Kg]	MY [Kg]	MXZ [Kg]	VEL [m/s]	Rho [Kg/m3]	RH [%]	Press [Pa]	Temp [°C]
1	0001	24.343	1.696	27.008	-0.416	2.082	-0.198	38.89	1.1714	53.2	100857	22.42
	0002	24.34	1.726	26.931	-0.371	2.082	-0.221	38.89	1.1698	53.2	100826	22.71
2	0003	3.731	0.31	3.884	-0.035	0.382	-0.039	15.00	1.1801	52.8	100855	22.52
	0004	3.728	0.291	3.87	-0.032	0.374	-0.046	15.00	1.1811	52.5	100858	22.30
3	0005	10.103	0.697	10.792	-0.071	0.949	-0.097	25.00	1.1792	52.3	100850	22.11
	0006	10.138	0.715	10.863	-0.057	0.953	-0.092	25.00	1.1789	52.5	100858	22.20
4	0007	19.801	1.409	21.772	-0.156	1.703	-0.215	35.00	1.1722	52.1	100850	22.56
	0008	19.729	1.215	21.842	-0.142	1.682	-0.203	35.00	1.1696	52.3	100849	23.13
5	0009	3.795	0.171	3.997	0.026	0.382	-0.085	15.00	1.1770	51.6	100837	23.23
	0010	3.805	0.234	3.974	0.027	0.385	-0.094	15.00	1.1787	51.3	100849	22.86
6	0011	10.466	0.617	11.201	0.071	0.948	-0.294	25.00	1.1769	51.4	100847	22.68
	0012	10.453	0.367	11.189	0.144	0.949	-0.261	25.00	1.1766	51.2	100845	22.74
7	0013	20.441	0.771	22.459	0.258	1.698	-0.555	35.00	1.1697	51.1	100829	23.13
	0014	20.373	0.67	22.572	0.287	1.687	-0.559	35.00	1.1676	51.0	100842	23.67
8	0015	3.512	0.23	3.843	0.004	0.107	-0.021	15.00	1.1771	50.2	100811	23.16
	0016	3.507	0.186	3.867	-0.005	0.108	-0.024	15.00	1.1781	50.2	100823	22.96
9	0017	9.521	0.581	10.919	-0.02	0.304	-0.097	25.00	1.1758	49.8	100807	22.83
	0018	9.559	0.635	10.935	-0.023	0.328	-0.11	25.00	1.1753	49.6	100810	22.95
10	0019	18.748	1.334	22.215	-0.068	0.761	-0.303	35.00	1.1690	50.2	100813	23.18
	0020	18.853	1.374	22.221	-0.069	0.826	-0.292	35.00	1.1665	50.1	100805	23.76
11	0021	3.669	0.282	3.9	-0.035	0.353	-0.031	15.00	1.1730	49.2	100786	24.08
	0022	3.676	0.293	3.908	-0.037	0.355	-0.031	15.00	1.1752	49.0	100787	23.57
12	0023	9.994	0.655	11.071	-0.086	0.919	-0.068	25.00	1.1734	48.6	100760	23.29
	0024	10.015	0.714	11.048	-0.072	0.921	-0.074	25.00	1.1734	48.7	100769	23.34
13	0025	3.689	0.293	3.921	-0.061	0.347	-0.017	15.00	1.1764	48.9	100766	23.24
	0026	3.674	0.29	3.891	-0.066	0.343	-0.013	15.00	1.1774	48.6	100779	23.06
14	0027	9.94	0.606	11.028	-0.097	0.902	-0.066	25.00	1.1747	48.4	100773	23.03
	0028	9.989	0.664	11.068	-0.089	0.894	-0.059	25.00	1.1741	48.6	100771	23.17
15	0029	19.507	1.217	22.145	-0.147	1.568	-0.15	35.00	1.1672	48.5	100758	23.56
	0030	19.472	1.185	22.001	-0.146	1.576	-0.157	35.00	1.1647	48.8	100745	24.09
18	0035	3.803	-0.094	3.842	0.289	0.182	-0.081	15.00	1.1734	49.4	100685	23.72
	0036	3.798	-0.156	3.83	0.279	0.133	-0.075	15.00	1.1752	49.4	100695	23.31
19	0037	10.453	-0.295	11.09	0.654	0.763	-0.242	25.00	1.1729	49.2	100669	23.16
	0038	10.416	-0.414	11.045	0.674	0.771	-0.24	25.00	1.1725	49.0	100668	23.26
20	0039	25.536	-1.183	28.763	1.621	1.985	-0.755	38.89	1.1649	48.9	100674	23.58
	0040	25.457	-1.122	28.139	1.543	1.964	-0.745	38.89	1.1616	48.8	100671	24.34
21	0041	3.578	-0.02	3.962	0.154	0.256	-0.065	15.00	1.1681	48.9	100630	24.81
	0042	3.599	-0.002	3.972	0.13	0.212	-0.073	15.00	1.1703	49.2	100642	24.30

ID	Acq.	FX [Kg]	FY [Kg]	FXZ [Kg]	MX [Kg]	MY [Kg]	MXZ [Kg]	VEL [m/s]	Rho [Kg/m3]	RH [%]	Press [Pa]	Temp [°C]
22	0043	9.721	-0.038	11.071	0.38	0.664	-0.164	25.00	1.1692	49.6	100632	23.90
	0044	9.743	-0.026	11.071	0.369	0.664	-0.177	25.00	1.1692	49.3	100643	23.94
23	0045	3.582	-0.032	3.929	0.192	0.459	-0.05	15.00	1.1721	49.4	100630	23.86
	0046	3.617	-0.065	3.956	0.163	0.361	-0.052	15.00	1.1734	49.2	100650	23.60
24	0047	9.88	-0.043	11.179	0.403	1.302	-0.162	25.00	1.1712	49.5	100634	23.43
	0048	9.909	-0.047	11.173	0.355	1.267	-0.131	25.00	1.1706	49.0	100634	23.61
25	0049	6.382	0.161	4.341	0.308	6.419	-0.031	15.00	1.1731	49.8	100622	23.60
26	0050	17.889	0.445	11.973	0.316	11.21	-0.138	25.00	1.1705	49.5	100611	23.53
27	0051	36.036	0.178	24.831	1.224	18.187	-0.517	35.00	1.1647	49.2	100609	23.76
28	0052	6.19	0.253	4.075	-0.189	1.846	-0.098	15.00	1.1675	50.2	100567	24.71
29	0053	17.477	0.203	11.926	-0.13	6.034	-0.42	25.00	1.1682	50.0	100558	23.91
30	0054	35.477	0.789	24.559	-0.503	13.386	-0.952	35.00	1.1621	50.1	100524	24.05
31	0055	3.418	0.143	3.838	0.117	0.304	-0.07	15.00	1.1672	50.3	100539	24.72
	0056	3.448	0.177	3.878	1.332	0.653	-0.037	15.00	1.1713	50.3	100555	23.80
32	0057	9.651	0.182	10.816	1.598	1.205	-0.152	25.00	1.1689	50.5	100548	23.72
	0058	9.579	0.347	10.718	1.521	1.151	-0.149	25.00	1.1683	50.6	100542	23.83
33	0059	3.612	0.195	3.729	0.202	0.09	-0.047	15.00	1.1710	50.5	100542	23.82
	0060	3.564	0.216	3.722	0.119	0.039	-0.035	15.00	1.1717	50.2	100552	23.71
34	0061	9.825	0.386	10.663	0.071	0.536	-0.146	25.00	1.1691	50.4	100543	23.65
	0062	9.787	0.535	10.551	0.022	0.472	-0.158	25.00	1.1684	50.5	100537	23.80

## Ringraziamenti

Se sono stato in grado di raggiungere questo punto dell'elaborato, nonostante i numerosi e ripetuti tentativi di autosabotaggio, lo devo a tutte quelle persone che negli anni mi hanno fornito il loro supporto. Devo in primo luogo ringraziare il mio relatore, il professore Gabriele Bellani, che mi ha aiutato per le attività di tirocinio e tesi e che è riuscito a sopravvivere ai miei innumerevoli ritardi. Ovviamente sono qua solamente grazie al supporto della mia famiglia, i miei genitori Maria Grazia e Tommaso, e mia sorella Maria Chiara. Supporto non solo pratico, in fin dei conti essere al secondo anno fuori corso ha un impatto non nullo sulle finanze di una persona che non ha un influsso stabile di denaro, ma anche e soprattutto mentale ed emotivo. Non solo loro ma tutta la famiglia Cavallaro e Spisni mi ha permesso di vivere esperienze uniche, motivo per cui sarò loro eternamente grato. Devo ringraziare gli amici che negli anni mi sono stati a fianco, quelli che lo sono ancora e quelli che ho trascurato malamente ma che ancora, qualche volta l'hanno mi sopportano. Infine devo ringraziare UniBo Motorsport, non come la struttura rigida e seria che spesso vuole sembrare, ma come gruppo di amici, di ragazze e ragazzi accomunati da una passione e dalla voglia di condividere il proprio tempo e le proprie capacità. In un mondo che è troppo spesso individualista e competitivo, in una società, un modo accademico e lavorativo in cui sempre più spesso viene spinta la necessità di una lotta tra singoli, per poter migliorare la propria vita alle spese di tutti gli altri, ecco, in questo mondo parte di UBM ha rappresentato per me un faro, una dimostrazione che effettivamente lavorare insieme verso un obiettivo comune è un modello vincente. Grazie Andrea (Bob), Marco, Andrea, Giorgio, Rosario, Michele. Grazie amici del gruppo Managers 2022: Rebecca, Marco, Luigi, Emanuele, Marco, Matteo, Emanuele (Fava), Andrea, Lorenzo e Giulia.

Grazie a tutti, e arrivederci al prossimo capitolo.

Gioba