

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale



**Tesi di Laurea Magistrale**

## **Caratterizzazione della scia di una Motocicletta in galleria del vento con l'uso del Tubo di Pitot**

**Relatori:**

Prof. Castellani Francesco

Prof. Iuso Gaetano

**Candidato:**

Dorillo Nicolò

Anno Accademico 2022/2023

In una società in cui si dà valore al successo

e si demonizza il fallimento,

riconosco che i miei fallimenti

hanno avuto un grosso valore.

Nicolò

## **Abstract**

Il seguente lavoro di Tesi si prefigge come obiettivo di studiare e caratterizzare la scia che si genera a valle di una moto Aprilia RSV 1000 R Factory investita da un flusso d'aria in Galleria del Vento, a diverse condizioni di velocità e diverse configurazioni aerodinamiche. I test sono stati effettuati in collaborazione con la Galleria del Vento "R.Balli" del dipartimento di Ingegneria dell'Università degli studi di Perugia, il cui team mi ha cordialmente ospitato e guidato nella realizzazione di questo lavoro. Si è dapprima partiti con l'impostare un corretto e adatto set up sperimentale, volto a permettere il posizionamento della sonda lungo vari punti degli assi a valle della moto. L'approccio sperimentale è stato successivamente validato mediante test di base. A valle della sperimentazione è seguita la fase di processing dei dati di galleria. In particolare, il mio lavoro si è improntato sull'elaborazione dei dati riguardanti la scia, in modo da crearne una mappatura qualitativa di pressione, velocità, turbolenza e visualizzazione mediante la tecnica dei fili di lana.

I Risultati ottenuti hanno mostrato coerenza con quanto studiato in letteratura e hanno consentito di programmare lo sviluppo successivo dello studio della scia. Più nel dettaglio, si è visto come l'aerodinamica interna impatti in maniera importante sull'ampiezza della scia e quindi sulla resistenza che si oppone all'avanzamento del moto. Il confronto tra varie configurazioni aerodinamiche della moto in esame ha portato a dimostrare quanto appena detto, dando una visione di ciò che potrebbe essere il futuro prossimo degli sviluppi motociclistici.

# Sommario

<b>Abstract</b> .....	<b>2</b>
<b>1 Introduzione</b> .....	<b>5</b>
<b>2 Background</b> .....	<b>7</b>
2.1 Gli albori dell'aerodinamica della moto .....	7
2.2 La storia più recente .....	11
<b>3 Aerodinamica del motociclo</b> .....	<b>14</b>
3.1 Nozioni introduttive.....	14
3.2 Vorticità e strato limite .....	17
3.2.1 Strato limite laminare e turbolento .....	19
3.2.2 La separazione dello strato limite .....	21
3.3 La scia.....	23
3.3.1 Qualità del flusso e Turbolenza .....	24
3.4 Le forze aerodinamiche .....	28
3.5 Drag Area .....	33
<b>4 Prove in galleria del vento</b> .....	<b>34</b>
4.1 Tipologie di Gallerie del vento.....	35
4.1.1 Camera di prova .....	36
4.1.2 Divergente .....	37
4.1.3 Corners .....	37
4.1.4 Camera di Tranquillizzazione (“Settling chamber”).....	38
4.1.5 Convergente (“Nozzle”) .....	39
4.1.6 Motore elettrico .....	40
4.1.7 Bloccaggio e interferenza .....	40
4.1.8 Visualizzazione del flusso .....	41
4.2 Galleria del vento “R. Balli”.....	43
4.3 Set up sperimentale.....	51
4.3.1 Traversing per le misurazioni in scia.....	52
4.3.2 Tubo di Pitot.....	55



4.3.3	Modello in galleria del vento.....	58
<b>5</b>	<b>Post-processing dei dati e risultati .....</b>	<b>61</b>
5.1	Galleria con camera di prova vuota.....	61
5.2	Moto+RC (radiatore chiuso).....	65
5.3	Moto+Ma+RC (manichino+radiatore chiuso).....	72
5.4	Moto+Ma+RA (radiatore aperto).....	79
5.5	Moto+Ma+RA+DC (deflettore chiuso).....	86
5.6	Mappe di TKE.....	93
5.7	Mappe di pressione, velocità media e velocità fluttuanti associate alla turbolenza.....	95
5.8	Profili di velocità media adimensionale .....	100
5.9	Forze aerodinamiche misurate con bilancia.....	104
5.9.1	Distribuzione di portanza.....	105
5.9.2	Influenza del traversing sulle misure.....	107
5.10	Tufting.....	109
<b>6</b>	<b>Conclusioni.....</b>	<b>111</b>
<b>7</b>	<b>Bibliografia .....</b>	<b>113</b>
<b>8</b>	<b>Ringraziamenti .....</b>	<b>117</b>

# 1 Introduzione

Le principali problematiche aerodinamiche della moto sono legate alla guidabilità, alla resistenza all'avanzamento e al comfort del pilota. I vortici che si formano nella scia, conseguenti al distacco della vena fluida che investe la moto, sono una causa rilevante della resistenza all'avanzamento e sono inoltre responsabili di pressioni sul corpo del pilota e quindi di stati di tensione che influenzano il comfort. L'aerodinamica della moto da competizione è basata principalmente sul raggiungimento di un basso coefficiente di drag che spesso viene sacrificato al coefficiente di lift. Si ritiene infatti che il pilota della moto sportiva possa sopperire, sulla base della propria sensibilità e con spostamenti opportuni del corpo, a contrastare eventuali alleggerimenti dell'anteriore. Come è noto, lo studio del distacco della vena fluida dal corpo in movimento e la conseguente formazione della scia è estremamente complesso. Gli attuali strumenti di calcolo numerico talvolta possono essere di aiuto, ma quando c'è l'esigenza di cogliere aspetti tridimensionali e operare su sistemi reali complessi, tutt'oggi i procedimenti più adeguati per ottenere una “buona aerodinamica” sono quelli sperimentali. [1] D'altra parte per molte valutazioni utili ai fini del miglioramento delle prestazioni, non è necessario entrare nel dettaglio della forma dei vortici di scia, ma piuttosto cogliere delle macro informazioni utili a individuare possibili soluzioni migliorative.

È per questo che, agevolata dalle dimensioni del sistema, la progettazione aerodinamica e la messa a punto ottimale del sistema moto-pilota viene sempre più spesso condotta con sistematico ricorso alla galleria del vento. Il pilota costituisce di per sé una “appendice mobile dotata di controllo attivo soggettivo” [2] che,

integrata nel sistema, ne può condizionare profondamente il comportamento. Allo studio dell'aerodinamica della moto da competizione è sempre associato lo studio aerodinamico del sistema moto-pilota. Data la crescente richiesta in termini di prestazioni e, in parte, di riduzione del consumo di carburante, gli studi aerodinamici delle moto hanno assunto un'importanza sempre maggiore. Ciò nonostante, la letteratura in materia è scarsa e sicuramente alcune questioni attendono ancora di essere esplorate.

Quindi, nel corso del presente lavoro svolto in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia, sono state effettuate le misurazioni in Galleria del vento ed è stato sviluppato uno studio sperimentale di una sezione trasversale della scia della moto Aprilia RSV 1000 in dotazione allo stesso laboratorio del Dipartimento. L'obiettivo del presente lavoro è quello di sviluppare un sistema che garantisca replicabilità di configurazione, facilità e velocità nel montaggio della strumentazione e nell'effettuare le misurazioni stesse.

## 2 Background

### 2.1 Gli albori dell'aerodinamica della moto

L'evoluzione nel tempo delle moto da competizione ha subito un'importante svolta quando ci si è focalizzati sull'aerodinamica come elemento fondamentale per la riduzione di resistenza all'avanzamento e l'aumento conseguente di velocità. In questo senso la figura dell'aerodinamico ha acquisito sempre più importanza in tutte le fasi di ideazione, progettazione e sviluppo della motocicletta, a tal punto da rendere necessaria una sua collaborazione con tutti i vari settori in cui si struttura un moderno reparto corse. Le prime motociclette rappresentavano un corpo con caratteristiche aerodinamiche sicuramente ascrivibili alla categoria dei corpi tozzi, caratterizzati da una scia di dimensioni considerevoli. Inoltre, presentavano uno sbilanciamento di pressione tra monte e valle del motoveicolo capace di dar luogo ad una componente della resistenza aerodinamica, nota come resistenza di pressione o di forma, molto più importante rispetto a quella generata dall'azione dell'attrito. Per tale motivo, fin dall'inizio degli anni '20 cominciarono i primi studi sulle carenature, rivestimenti rigidi di forma opportuna, applicati alla motocicletta o a parte di essa, con lo scopo di ridurre la resistenza aerodinamica di forma.

Verso la fine del XIX secolo, i veicoli a motore cominciarono ad emergere, migliorando drasticamente la velocità di trasporto dell'uomo (e prima di allora la corsa o l'equitazione erano i modi di trasporto più veloci dell'uomo)[3]. Nel 1885 il tedesco Daimler realizzò il primo velocipede con motore a scoppio, noto anche come *Reitwagen*. Per garantire la stabilità laterale, il velocipede a motore era dotato di due piccole ruote, ben visibili in *figura 2.1*.



Figura 2.1 Reitwagen di Daimler (1885)

Del veicolo di *Daimler* è nota, sicuramente grazie a test effettuati molti anni dopo la sua costruzione, la cosiddetta *drag area*, definita dal prodotto tra l'area  $A$  della superficie frontale del motociclo, ed il coefficiente di resistenza  $C_D$ ; in altri termini, essa corrisponde al rapporto tra la forza di resistenza  $D$  e la pressione dinamica  $q$  definita tramite l'equazione seguente:

$$Drag\ Area = AC_D = \frac{D}{q} [m^2]$$

Il solo coefficiente di resistenza  $C_D$ , anche se importante, non fornisce una informazione altrettanto significativa, data la variabilità dell'area della sezione frontale, fondamentale nella determinazione della resistenza aerodinamica, tra diversi motocicli e per lo stesso motociclo al variare della configurazione. Quindi la *drag area*, che nel *Reitwagen* era pari a  $0.67\ m^2$  per pilota seduto, fornisce una prima fondamentale indicazione sulla qualità aerodinamica del veicolo ed è stata il parametro fondamentale dello sviluppo in termini aerodinamici del motociclo fino ai giorni nostri.

Il primo risultato dello studio aerodinamico del motociclo si ebbe nel 1929, anno in cui Ernst Henne fissò il primo record mondiale di velocità attribuibile ad un tedesco: egli raggiunse, a Monaco, i 215 km/h guidando una BMW equipaggiata con motore 750cc, mostrata in *figura 2.2*. Il veicolo era solo leggermente carenato sui lati, mentre maggiore attenzione era stata posta sull'aerodinamica del pilota ed in particolare sul flusso che lo lasciava. Era dotato di caschetto affusolato con la parte posteriore a forma di becco e di un'appendice conica posizionata nella zona sacrale. Gli sforzi si concentravano principalmente sui fianchi e sul posteriore del veicolo, trascurando quasi completamente l'anteriore.

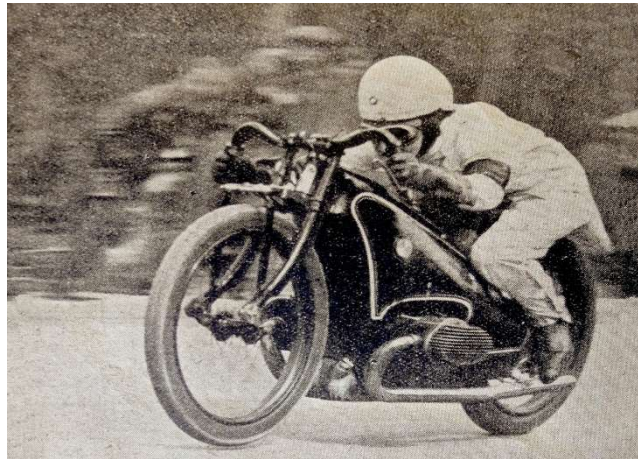


Figura 2.2 BMW 750cc di Ernst Henne (1929)

Nella seconda metà degli anni '30 cominciarono a prendere piede i cosiddetti motocicli "*full-bodied*" con carenatura in alluminio. Dalla *figura 2.3* seguente, è evidente la cosiddetta "pinna" posteriore, adottata per la stabilità del vento laterale.

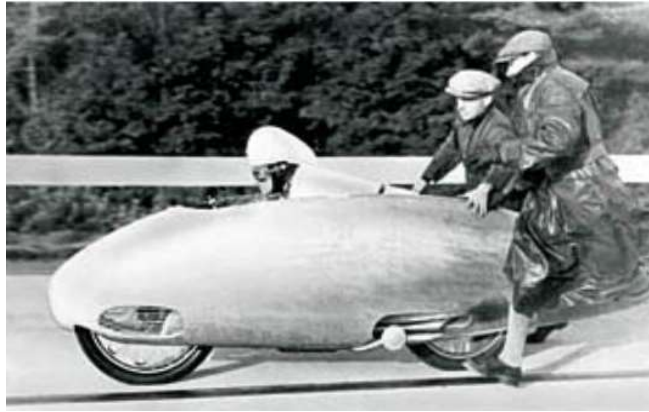


Figura 2.3 BMW R5 "full-bodied" di Ernst Henne (1937)

Negli anni '50 alcuni concetti aerodinamici sviluppati per i veicoli progettati per battere i record di velocità, in particolare legati al disegno delle carenature, trovarono applicazione anche sui "normali" motocicli da Gran Premio. Nei primi anni del decennio i motocicli erano equipaggiati unicamente con un piccolo cupolino o al massimo con un parziale carenatura.

La presa di coscienza dei vantaggi che un disegno aerodinamico della carenatura potesse portare, spinse i progettisti a disegnare motocicli con carene che, oltre a coprire l'intera moto, si spingevano fino a rivestire la ruota anteriore. La possibilità di integrare la ruota anteriore fu poi abbandonata per questioni di sicurezza (bloccaggio della ruota in caso di deformazioni della lamiera, basso raggio di sterzata e sensibilità al vento laterale).

## 2.2 La storia più recente

Tra la fine degli anni '50 e l'inizio degli anni '60, i motocicli da competizione iniziarono ad assumere forme e configurazioni che non si discostano molto da quelle attuali, come la MV Agusta 500 in *figura 2.4*.



Figura 2.4 MV Agusta di John Surtees (1960)

La prima motocicletta completamente carenata destinata alla produzione in serie sarà poi nel 1976 la BMW R 100 RS in *figura 2.5*, con una carena che doveva proteggere il pilota dalle intemperie e deflettere il flusso in modo da rendere la guida più confortevole.



Figura 2.5 BMW R 100 RS (1976)



Le appendici aerodinamiche sui lati della carena avevano lo scopo di migliorare le caratteristiche dinamiche aumentando il carico sull'avantreno alle alte velocità.

Nell'era più recente, quando le moto hanno iniziato a sviluppare motori di notevole potenza, si è portata sempre più l'attenzione sullo sviluppo aerodinamico volto a compensare l'importante riduzione di carico anteriore. I fenomeni che influenzano la stabilità verticale della motocicletta sono il lift e il momento di beccheggio provocato dall'azione della forza di *Drag*, di cui si parlerà nei capitoli successivi. L'azione combinata del *Lift* e della coppia di beccheggio generata, riduce il carico totale sulla gomma anteriore, carica la sospensione posteriore e riduce il *grip* massimo della gomma anteriore sulla strada. L'entità della riduzione di carico può essere valutata grazie ad una figura riportata da A. Weidele [1], in *figura 2.6*, in cui è rappresentata l'impronta dell'anteriore di una moto a 80 Km/h e 200 Km/h.

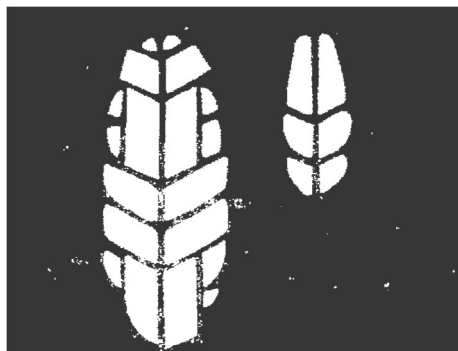


Figura 2.6 Impronta ruota anteriore per velocità di percorrenza pari a 80 km/h (a sx) e 200 km/h (a dx) [1]

E' evidente l'impossibilità di annullare l'instabilità verticale esclusivamente utilizzando una carena che non dia lift poiché la sola presenza del *drag* è responsabile del momento di beccheggio. Talvolta anche lo stesso pilota è causa di *lift* [4]. Per intervenire sul problema si può: ridurre il drag, abbassare l'altezza del

punto di applicazione oppure creare una “downforce” all’anteriore e un *lift* al posteriore che bilanci l’effetto del beccheggio.

È proprio in questa direzione che si sono mossi gli aerodinamici degli ultimi 40 anni, che hanno osservato i vantaggi offerti dagli alettoni deportanti utilizzati nelle auto da corsa e hanno pensato di apportarli sull’anteriore delle moto. La prima in assoluto ad adottarla è stata la MV Agusta 500 nel 1974, in *figura 2.7*.



Figura 2.7 Ali deportanti MV Agusta 500 (1974)

La soluzione si è rivelata efficace al punto tale da ritrovare, ormai da qualche anno, in MotoGP e nelle rispettive moto stradali, carene equipaggiate con importanti strutture deportanti (*figura 2.8*) che permettono di contrastare l’alleggerimento dell’anteriore, a scapito di un leggero aumento di *Drag* ma pur sempre accettabile.



Figura 2.8 Ducati Desmosedici GP23 (2023)

## **3 Aerodinamica del motociclo**

Per affrontare in modo proficuo i temi legati all'aerodinamica del motociclo, è necessario sottolineare alcuni aspetti della vasta teoria dell'aerodinamica, in particolare quelli legati ai corpi tozzi. Risulta infatti evidente come il motociclo non possa essere considerato un corpo aerodinamico.

In questo capitolo verranno introdotti alcuni concetti e definizioni di carattere generale, riguardanti la fluidodinamica classica, le definizioni di vorticità, strato limite, turbolenza, per poi approfondire gli aspetti fondamentali dell'aerodinamica dei corpi tozzi.

### **3.1 Nozioni introduttive**

Si supponga di immergere un solido in un fluido. La superficie di mutuo contatto tra solido e fluido è luogo di scambio di forza elementari. Se il fluido è un gas, come l'aria, si considera unicamente il caso in cui il corpo è totalmente immerso e si esclude a priori la possibilità di avere cavitazioni, cioè spazi vuoti di fluido. Ne consegue che la superficie di mutuo contatto tra gas e corpo coincide con la superficie esterna di quest'ultimo. Attraverso tale superficie il fluido trasmette al corpo azioni elementari e, per il principio di azione-reazione, il corpo trasmette al fluido azioni di verso opposto.

Le azioni fluidodinamiche dipendono, fissate le caratteristiche del fluido, la forma del corpo e il suo orientamento rispetto alla velocità di moto, dal moto relativo tra corpo e fluido e quindi dalle velocità e dalle accelerazioni. La fluidodinamica classica si basa sull'ipotesi fondamentale di poter considerare il fluido come

continuo e quindi di poter prescindere dalle singole molecole del fluido nella scrittura del modello matematico. La validità di questa ipotesi può essere verificata con il parametro adimensionale chiamato numero di *Knudsen*, definito come il rapporto tra il libero cammino medio delle molecole del fluido  $\Lambda$  e la dimensione caratteristica del corpo in esame  $L$  [3]:

$$Kn = \frac{\Lambda}{L} \quad (3.1)$$

Assumendo come valida l'ipotesi di fluido continuo, il modello matematico del moto dei fluidi è costituito dal sistema che si ottiene esplicitando le leggi fondamentali della meccanica dei mezzi continui (conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia) e caratterizzando il comportamento del particolare fluido tramite le sue equazioni costitutive.

Per la rappresentazione delle azioni aerodinamiche, e in generale fluidodinamiche, è necessario scegliere un punto come centro di applicazione delle forze in cui si può considerare applicata la risultante delle azioni aerodinamiche  $F$  rispetto al quale si calcola il momento  $M$ . Queste due grandezze possono essere scomposte secondo tre assi ortogonali  $x$ ,  $y$ ,  $z$  opportunamente scelti. Il sistema di riferimento più frequentemente adottato in campo aeronautico e automobilistico è quello degli assi vento. In campo motociclistico il sistema assi vento, definito in accordo con le convenzioni SAE (*Society of Automotive Engineering*) e riportato in *figura 3.1* [5], è analogo a quello aeronautico salvo che per l'origine, che normalmente si fa coincidere con il punto ideale di contatto tra suolo e ruota posteriore. Normalmente gli assi del sistema di riferimento assi vento sono indicati semplicemente con  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , omettendo per brevità il pedice "w".

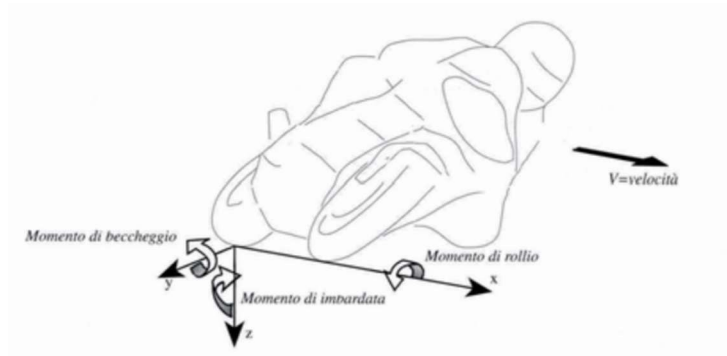


Figura 3.1 Sistema di riferimento SAE [6]

I coefficienti di forza e momento possono ritenersi dipendenti unicamente dalla forma del corpo, dalla sua posizione rispetto alla corrente e dai parametri adimensionali *Reynolds* ( $Re$ ) e *Mach* ( $Ma$ ), definiti come:

$$Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu} \quad (3.2)$$

che esprime il rapporto tra le azioni inerziali e quelle viscosi, ovvero tra il termine convettivo e quello diffusivo della dinamica della vorticità. I termini stanno ad indicare la velocità di infinito a monte ( $V_{\infty}$ ), la lunghezza caratteristica del corpo ( $L$ ) e la viscosità cinematica del fluido ( $\nu$ ).

$$Ma = \frac{V}{a} \quad (3.3)$$

Il numero di Mach indica gli effetti della comprimibilità, ovvero un  $Ma$  sufficientemente piccolo comporta effetti della comprimibilità trascurabili. In questo caso i termini indicano invece la velocità di un oggetto in moto in un fluido ( $V$ ) e la velocità del suono ( $a$ ), ovvero la velocità con cui il suono si propaga in un certo mezzo ( $a = 343 \text{ m/s}$ , in aria e a  $T=20^{\circ}\text{C}$ ).

Di conseguenza vengono definiti, rispettivamente, i coefficienti di portanza  $C_L$  e di resistenza  $C_D$ , che in ambito automotive assumono, per convenzione, le sigle  $C_Z$  e  $C_X$ :

$$C_L = \frac{L}{qS} = C_Z \quad 1 \quad (3.4)$$

$$C_D = \frac{D}{qS} = C_X \quad 2 \quad (3.5)$$

Per indicare la pressione puntuale, o la sua distribuzione su di una superficie, è comodo usare un coefficiente di pressione  $C_p$  definito nel seguente modo:

$$C_p = \frac{p-p_\infty}{q} \quad (3.6)$$

dove  $p_\infty$  indica la pressione nella corrente indisturbata all'infinito a monte.

## 3.2 Vorticità e strato limite

Il vettore vorticità  $\omega$  è definito come rotore della velocità  $V$ :

$$\omega = \nabla \times V \quad (3.7)$$

Al vettore velocità è legata in modo direttamente proporzionale la deformazione di rotazione rigida di un volume elementare di fluido. Se il moto è caratterizzato dall'assenza di rotazione degli elementi fluidi (moto irrotazionale),  $\omega$  è nullo.

---

<sup>1</sup> “L” indica la portanza (Lift), ovvero la componente verticale della forza aerodinamica globale generata per differenza di pressione tra ventre e dorso del corpo considerato.

<sup>2</sup> “D” indica, invece, la resistenza (Drag), ovvero la componente orizzontale della forza aerodinamica globale che si oppone al moto del corpo.

La condizione di rotore della velocità identicamente nullo comporta che il campo di velocità ammette un potenziale  $\varphi$ :

$$V = \nabla\varphi \quad (3.8)$$

In un fluido reale, la vorticità ha origine proprio a causa della viscosità che determina la condizione di velocità nulla sulla superficie solida ed in particolare della sua componente tangenziale. Di conseguenza, non è ipotizzabile il moto completamente irrotazionale di un fluido viscoso in presenza di contorni solidi. Da notare che la vorticità globale all'interno del campo si conserva. Quindi, nel caso in cui il campo sia inizialmente irrotazionale, esso mantiene questa caratteristica a livello globale. Se il fluido fosse ideale (non viscoso) la condizione al contorno imporrebbe l'annullarsi della sola componente normale della velocità relativa fluido-parete e quindi il moto completamente irrotazionale in queste condizioni sarebbe possibile anche in presenza di contorni solidi.

Nel caso in cui il corpo a cui la superficie appartiene sia di forma opportuna e sia opportunamente orientato rispetto al flusso, si può pensare che la vorticità generata sulla superficie si mantenga con buona approssimazione all'interno di uno strato aderente alla superficie stessa, di spessore tanto minore quanto maggiore è il numero di Reynolds. All'interno di tale strato, quindi, si può considerare concentrata la vorticità. All'esterno, invece, la vorticità è con buona approssimazione nulla ed è quindi possibile definire un potenziale  $\varphi$ . Lo strato in cui si considera racchiusa la vorticità viene definito strato limite ed è legato al concetto introdotto da Prandtl, per cui il fluido si comporta come non viscoso salvo che in zone ristrette, di spessore tendente a zero all'aumentare del numero di

Reynolds, poste a contatto con le superfici del corpo (strato limite) e a valle di esso (scia). Proprio lo strato limite e la scia coincidono sostanzialmente con le zone in cui si può considerare racchiusa la vorticità.

All'interno dello strato limite la velocità relativa fluido-parete passa dal valore nullo ad un valore prossimo a quello del flusso potenziale. Nel caso in cui il fluido abbia bassa viscosità, come nel caso di aria e acqua, il passaggio da velocità nulla a velocità pari a quella del flusso potenziale si esaurisce in uno piccolo spessore rispetto alle dimensioni trasversali del corpo. Lo spessore  $\delta$  dello strato limite è inversamente proporzionale al numero di Reynolds ed è piccolo per  $Re$  sufficientemente elevati. Il risultato fondamentale per flussi a  $Re \gg 1$  è che la pressione è all'incirca costante attraverso lo strato limite:  $\frac{dp}{dy} = 0$ . Ciò consente di affermare che la pressione agente su un punto generico della parete è uguale, in prima approssimazione, alla pressione agente in un punto al bordo esterno dello strato limite avente la stessa coordinata  $x$ :

$$p(x, 0) = p(x, \delta). \quad (3.9)$$

È fondamentale conoscere lo spessore dello strato limite, che aumenta con l'aumentare della coordinata  $x$  con origine al bordo d'attacco della superficie solida e dipende dalle condizioni di moto del fluido all'interno dello strato limite.

### 3.2.1 Strato limite laminare e turbolento

Lo strato limite precedentemente definito può essere di tipo laminare o turbolento, mentre le condizioni intermedie sono considerate nella zona di transizione. Quando comincia a svilupparsi al bordo d'attacco della superficie solida, lo strato limite è



laminare, cioè le particelle fluide si muovono parallelamente tra loro e di conseguenza parallelamente alla superficie. Si definisce il numero di Reynolds lungo la coordinata  $x$  allo stesso modo dell'equazione 3.2, con l'unica differenza che come lunghezza caratteristica viene considerata la coordinata curvilinea “ $x$ ” con origine nel punto in cui si genera lo strato limite:

$$Re_x = \frac{\rho x \infty}{\mu} \quad (3.10)$$

All'aumentare di  $Re_x$ , il flusso laminare si destabilizza finché avviene gradualmente la transizione a strato limite turbolento. Quest'ultimo è caratterizzato da moti caotici non stazionari e tridimensionali delle particelle fluide che determinano un rimescolamento dei vari strati di fluido.

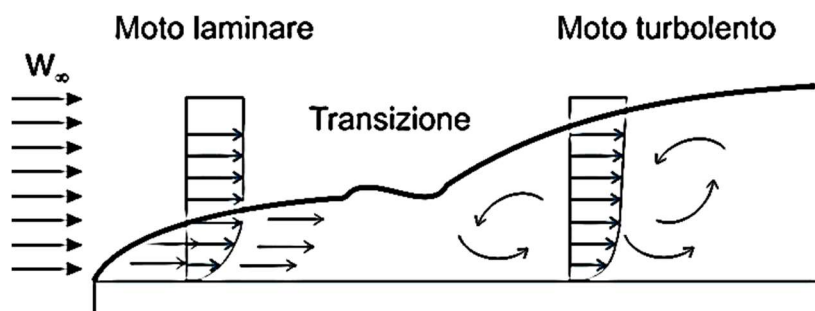


Figura 3.2 Profili di velocità media in strato limite laminare e turbolento

Come si vede dalla *figura 3.2*, il profilo di velocità dello strato limite turbolento risulta “appiattito”, con pendenza maggiore nelle strette vicinanze della superficie, il che sta a significare la presenza di un gradiente di pressione maggiore.

Va precisato che quando si parla di velocità in uno strato limite turbolento, non si parla della velocità della singola particella fluida ma in termini statistici della componente mediata nel tempo della velocità stessa.

### 3.2.2 La separazione dello strato limite

Nel caso bidimensionale, quando in un punto, detto punto di separazione dello strato limite, la derivata del profilo di velocità a parete si annulla ( $\frac{du}{dy}|_{y=0} = 0$ ), si ha il fenomeno della separazione. Essa si verifica quando l'aria non può più seguire il contorno dell'oggetto che sta attraversando e quindi si separa fisicamente dalla superficie. Questo a volte può accadere se c'è un brusco cambiamento nella geometria della parte. Abbastanza spesso, però, è causato da un gradiente pressorio avverso che si verifica quando l'aria è costretta a spostarsi da una zona di bassa pressione a una zona di alta pressione. Ciò richiede energia e di conseguenza rallenta il flusso vicino alla superficie, al punto tale da invertirne la direzione. A valle del punto di separazione, infatti, come si nota dalla *figura 3.3*, si ha un flusso di verso opposto vicino alla superficie e, inoltre, il campo di velocità esterno allo strato limite diverge fortemente dalla parete. Ne consegue che la zona dove è confinata la vorticità non è più aderente alla parete stessa.

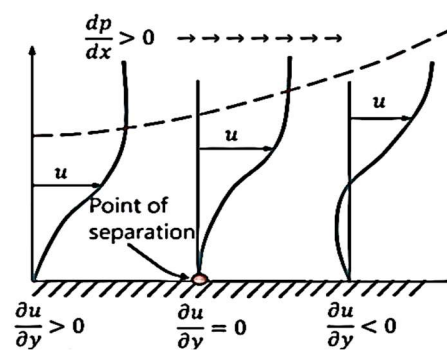


Figura 3.3 Profilo di velocità in strato limite separato [1]

Se  $\frac{dp}{dx} > 0$ , si dice che il flusso è soggetto ad un gradiente di pressione avverso e lo strato limite può tendere alla separazione. La presenza di uno strato limite turbolento rende il flusso in prossimità della parete più ricco di quantità di moto e di conseguenza in grado di opporsi e ritardare la separazione.

Un flusso separato cambia drasticamente le caratteristiche aerodinamiche di un corpo. Questo fenomeno dipende innanzitutto dalla forma del corpo lambito dal flusso. Si può classificare un corpo come *aerodinamico* o *tozzo*. Il primo, in *figura 3.4*, genera una scia sottile a valle grazie a uno strato limite che separa solo a valle del corpo, come per esempio un profilo alare. Condizioni necessarie affinché un corpo sia aerodinamico sono una geometria e un orientamento rispetto al flusso asintotico opportuni: un corpo che geometricamente potrebbe essere aerodinamico, può non esserlo se non propriamente orientato rispetto al fluido. Un esempio è il profilo alare che a una certa incidenza va in stallo e assume le caratteristiche di un corpo tozzo. Quest'ultimo, invece, che è quello analizzato in questo progetto di tesi, ha un'elevata resistenza di forma e genera una scia a valle dello stesso ordine di grandezza della dimensione trasversale del corpo stesso (*figura 3.5*). In generale, si può approssimare la resistenza di un corpo tozzo pari a uno o due ordini di grandezza maggiore rispetto a quella di un corpo aerodinamico. È possibile definire quanto un corpo sia tozzo calcolando il rapporto tra la dimensione trasversale della scia e quella del corpo stesso: più è elevato tale rapporto, tanto più il corpo è tozzo.

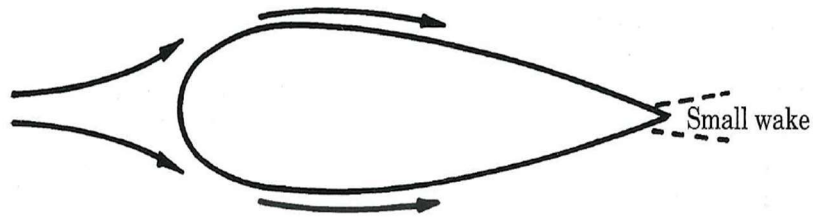


Figura 3.4 Corpo aerodinamico



Figura 3.5 Corpo tozzo

### 3.3 La scia

Oltre allo strato limite, come si è visto in precedenza, un'altra zona in cui si concentra la vorticità è la scia a valle del corpo. Le sue dimensioni trasversali e longitudinali determinano l'entità della resistenza aerodinamica e, quindi, l'efficienza del corpo stesso.

Eccetto che a velocità molto basse, su un veicolo in movimento si avrà un misto di flusso turbolento e laminare. In generale, l'aspetto frontale di un veicolo è tale che l'aria ha poca scelta se non quella di seguirne la forma. Nell'istante in cui, però, l'aria supera la sezione trasversale più ampia, lo strato limite diventa più spesso e se la forma del corpo si discosta troppo da quella ideale, l'aria non può più seguirne la forma e lo strato limite si stacca dal corpo stesso. L'oggetto che si muove nell'aria

lascia quindi dietro di sé una scia turbolenta in cui sono presenti, medio temporalmente, una depressione con valori inferiori alla normale pressione atmosferica e velocità di flusso molto basse. Nella regione di separazione periodica, i vortici si diffondono da entrambi i lati del corpo alternandosi in sequenza come si vede in *figura 3.6*.

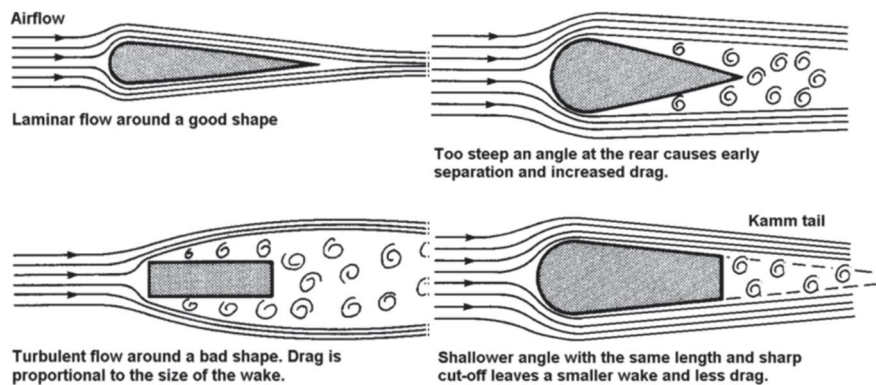


Figura 3.6 Scia turbolenta a valle del corpo al variare della forma e dell'angolo del bordo d'attacco

Si nota l'importanza sia del bordo di fuga che del bordo di attacco del modello nelle dimensioni e nelle caratteristiche della scia. Con un angolo troppo grande di inclinazione al bordo di fuga, si anticipa di netto la separazione, così come un profilo non smussato anteriormente genera un immediato distacco del flusso già al bordo di attacco.

### 3.3.1 Qualità del flusso e Turbolenza

Un veicolo ad una certa velocità si muove in seno all'aria ferma dove la turbolenza è assente ( $u'=v'=w'=0$ ). In Galleria del Vento, invece, è il corpo tenuto fermo mentre l'aria si muove rispetto al modello. Per il principio di reciprocità, le azioni aerodinamiche scambiate tra corpo e corrente, quali pressione e attrito, nei due casi

sono le stesse. La differenza sta nel fatto che, nel caso della Galleria del Vento, la corrente d'aria è caratterizzata da fluttuazioni turbolente insite nella generazione stessa della corrente e al suo moto lungo l'intero condotto di galleria prima di giungere in camera di prova. In uscita dal convergente, il flusso deve risultare il più possibile stazionario, uniforme, allineato con l'asse della camera di prova e con un basso livello di turbolenza: queste caratteristiche costituiscono le qualità del flusso in camera di prova.

Le cause principali di tali fluttuazioni sono da ricercare nelle vibrazioni di pareti e elica, nella scia dell'elica, nelle separazioni lungo il condotto tra corner, divergenti e carenatura motore, e nella scia dei modelli in camera di prova. La turbolenza presente nella corrente in camera di prova prende il nome di *Free Stream Turbulence (FST)*. L'intensità della turbolenza in camera di prova influenza notevolmente i risultati della sperimentazione poiché impatta sulla transizione, lo sviluppo dello strato limite e la separazione della corrente attorno ad un corpo. La presenza della fluttuazioni turbolente nella corrente di monte, quindi, rappresenta un elemento di disturbo per la stabilità dello strato limite laminare che in queste condizioni anticipa la transizione da laminare a turbolento.

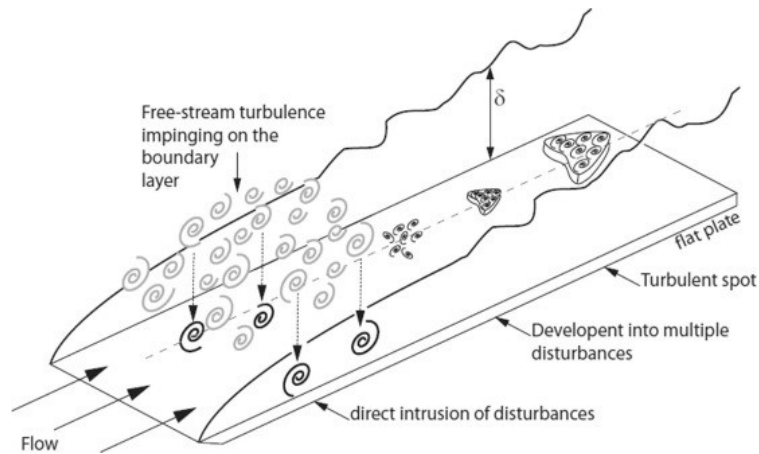


Figura 3.7 Rappresentazione schematica dell'ipotetico processo di transizione con presenza di FST [7]

Per sua natura, la turbolenza appare come un fenomeno randomico e, di conseguenza, è impossibile trovare un'equazione analitica capace di descrivere un flusso turbolento in spazio e tempo in modo deterministico. L'unico modo quantitativo per descrivere la turbolenza è attraverso un approccio statistico. Il primo passo è separare la componente randomica della velocità dalla sua media, attraverso la “decomposizione alla Reynolds”:

$$U = \bar{u} + u' \quad (3.11)$$

Dove  $U$  è la grandezza della velocità istantanea dipendente dal tempo,  $\bar{u}$  è la sua media e  $u'$  l'oscillazione casuale intorno a tale media. In ogni caso, il concetto non è così banale, e ci sono due possibili medie che vengono calcolate nelle reti turbolente. La più elementare che si può concepire è la media temporale, definita come l'integrale della velocità in funzione del tempo rispetto ad uno spazio temporale molto piccolo:

$$\bar{u} = \lim_{t_0 \rightarrow 0} \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} U(t) dt \quad (3.12)$$

La turbolenza risultante è quindi un segnale fluttuante casuale  $u'(t)$  con media nulla, da cui è possibile ricavare un'intensità di turbolenza sulla base di ulteriori statistiche. Una delle statistiche più significative, che fornisce una misura dell'ampiezza delle oscillazioni intorno alla media, e quindi della sua aleatorietà, è la varianza del segnale  $u'(t)$ , o in alternativa la sua deviazione standard, detta anche *root mean square* (RMS). Questa viene definita come:

$$U_{variance} = (u')^2 \quad (3.13)$$

con  $u'$  che in questa equazione sta ad indicare le componenti delle fluttuazioni di velocità lungo i tre assi x,y,z;

$$U_{RMS} = \sqrt{U_{variance}} = \sqrt{(u')^2} \quad (3.14)$$

Sulla base di questo concetto, l'intensità della turbolenza verrà definita normalizzata rispetto alla velocità dell'onda in ingresso, e di solito indicata in percentuale:

$$I\% = \frac{U_{RMS}}{U_0} \times 100 \quad (3.15)$$

dove  $U_0$  indica la velocità media di infinito a monte.

Un altro parametro utilizzabile per quantificare il disturbo in scia generato da un corpo in galleria è la *Turbulent Kinetic Energy* (TKE). È definita come l'energia cinetica media per unità di massa associata ai vortici nel flusso turbolento. Fisicamente, è caratterizzata da fluttuazioni misurate della velocità quadratica media. In generale, la TKE è definita come la metà della somma delle varianze (quadrato delle deviazioni standard) delle componenti di velocità:



$$k = \frac{1}{2} \left( \overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right) \quad (3.16)$$

Altrimenti, è possibile utilizzare una regola empirica per stimare l'intensità della k:

$$k = \frac{3}{2} (I * U)^2 \quad (3.17)$$

Dove I è l'intensità di turbolenza [%], mentre U è la velocità di riferimento alle condizioni iniziali.

### 3.4 Le forze aerodinamiche

Un corpo e un fluido in moto relativo si scambiano attraverso la superficie di mutuo contatto delle azioni elementari che hanno una componente normale alla superficie stessa, la pressione, ed una tangenziale, l'attrito superficiale.

Il sistema di forze può essere ridotto ad una forza F e un momento M, scomposti poi secondo tre assi ortogonali x, y, z opportunamente scelti. Il sistema di riferimento normalmente adottato in campo aeronautico e automobilistico/motociclistico è quello degli assi vento con origine in un punto opportuno. La configurazione di riferimento in campo automobilistico è considerata simmetrica rispetto al piano x,z sia in termini geometrici che di flusso. Le eventuali asimmetrie sono dovute ad asimmetrie dei flussi interni del veicolo o a fenomeni non stazionari, come i vortici.

La componente nella direzione parallela alla velocità del flusso viene definita *Resistenza (o Drag)* mentre quella perpendicolare ad essa *Portanza (o Lift)*. Nello studio aerodinamico dei corpi tozzi, a differenza del caso di corpi aerodinamici, la portanza ha rilevanza limitata al possibile uso di appendici alari. Lo studio della

resistenza e i fenomeni fisici che la generano, invece, hanno fondamentale importanza.

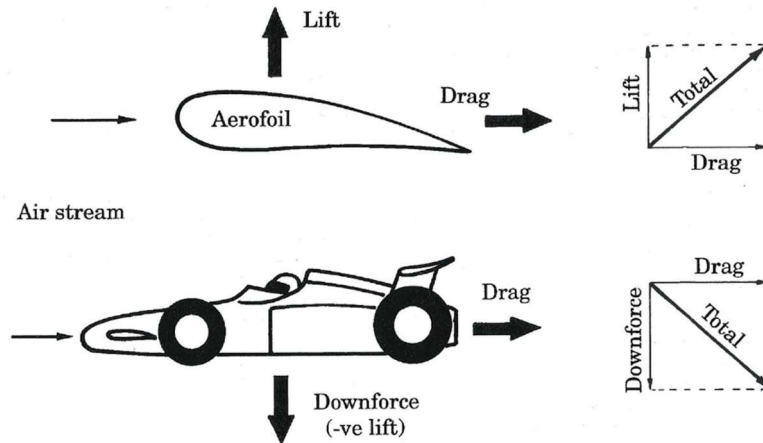


Figura 3.8 Componenti aerodinamiche

Il concetto di *Drag*, accennato nel *paragrafo 3.2*, è esprimibile sotto la seguente relazione numerica:

$$D = \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 S C_D \quad (3.18)$$

le cui grandezze fisiche indicano rispettivamente la densità del flusso, la velocità di freestream, la superficie caratteristica considerata (nel caso delle motociclette si considera la superficie frontale di impatto) e il coefficiente di *Drag* precedentemente definito.

Il significato fisico del coefficiente di *Drag* è di definire la “qualità aerodinamica” di un profilo e rendere possibile il confronto tra profili aventi differente distribuzione di massa. Esistono diverse forme di *Drag* che differiscono tra di loro

in base a come viene generata. Analizziamo quelle che più hanno interessato questo lavoro di tesi, ovvero la resistenza di attrito e la resistenza di forma.

- **Resistenza di attrito** : le azioni tangenziali  $\tau_0$  di attrito su una superficie solida che si muove di moto relativo rispetto al flusso sono la causa dell'esistenza della resistenza di attrito e sono date dal prodotto tra la viscosità dinamica e il gradiente di velocità a parete:

$$\tau_0 = \mu \frac{du}{dy} \Big|_{y=0} \quad (3.19)$$

che, integrata sulla superficie del corpo, fornisce la resistenza d'attrito. Questo tipo di forza è una quota importante della resistenza totale di un corpo aerodinamico, mentre si riduce il suo contributo nel caso di un corpo tozzo. Dalla relazione 3.19 si nota come un maggiore gradiente spaziale di velocità determini maggiori azioni tangenziali. Nel *paragrafo 3.2.1*, si è visto che il gradiente di velocità a ridosso della parete è maggiore nel caso di strato limite turbolento, quindi un modo per ridurre le azioni tangenziali, e di conseguenza la resistenza di attrito, consiste nel ritardare la transizione da laminare a turbolento dello strato limite. Una tecnica possibile è quella dell'aspirazione tramite fessure di quegli strati di fluido che sono prossimi all'instabilità.

- **Resistenza di forma**: è una resistenza di pressione legata all'esistenza della viscosità. La presenza dello strato limite fa sì che le azioni di pressione agenti sulla superficie del corpo siano differenti rispetto a quelle che agirebbero se il flusso fosse ideale. Il noto "*Paradosso di D'Alembert*" dimostra come in un fluido non viscoso, l'integrale delle pressioni avrebbe

componente nulla nella direzione della velocità del corpo. Nei corpi aerodinamici, per definizione, lo strato limite è sottile e attaccato su tutta la superficie. Quindi è piccola la differenza tra le pressioni che agiscono nel caso reale e quelle che agirebbero nel caso ideale e di conseguenza è piccola la resistenza di forma. Nel caso di corpo tozzo questa condizione non vale più e il contributo della resistenza di forma è prevalente.

La motocicletta, per quanto si sia evoluta la sua aerodinamica negli anni, rappresenta un esempio di corpo tozzo, caratterizzata da una scia considerevole e da una componente di resistenza di forma molto più importante di quella di attrito, che infatti è considerata trascurabile.

Il concetto di *Lift* è, invece, descritto dalla seguente formula:

$$L = \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 S C_L \quad (3.20)$$

È una forza generata dalla differenza di velocità, e quindi di pressione, tra il flusso che scorre sulla superficie superiore del modello e quello che scorre sulla superficie inferiore. Nella moto ha una rilevanza inferiore dovuta al fatto che il suo modulo è piccolo rispetto al *Drag*. Si studia l'effetto che ha globalmente ma soprattutto quale impatto ha nelle due ruote anteriore e posteriore, dimostrando nella prima un verso positivo di tale forza che si direziona a  $z^+$ ; nella seconda, invece, si concentra il maggior carico aerodinamico con un *Lift* che si direziona a  $z^-$ , definendo quella che viene chiamata "*Deportanza*".

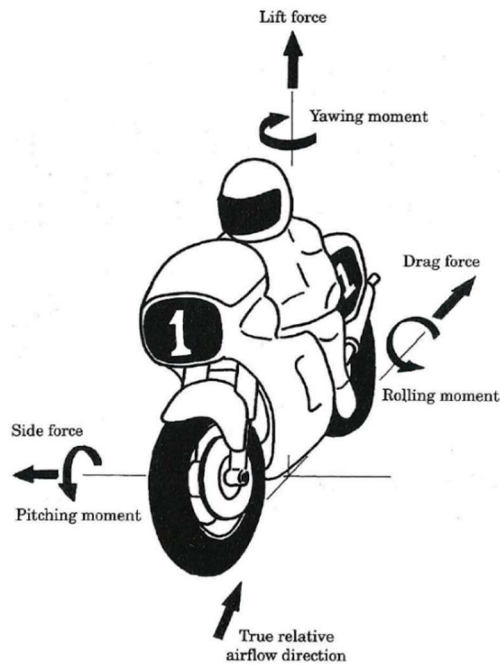


Figura 3.9 Forze agenti sulla moto investita da un flusso d'aria

Nelle motociclette, la configurazione aerodinamica in rettilineo differisce completamente da quella in curva: in questa seconda fase, infatti, il pilota si sporge fuori dalla carena e la moto si piega, generando effetti portanti che generano conseguenze negative, in quanto diminuiscono il carico sulle gomme e quindi l'aderenza. Si ha inoltre una variazione di assetto che fa cambiare l'angolo di incidenza della moto sul flusso d'aria.

Pertanto, una carena portante risulterà più efficace in rettilineo, in quanto la forza di *Lift* farà "diminuire" il peso della moto, incrementando la velocità di punta; mentre si rivelerà controproducente in curva, poiché farà diminuire l'aderenza, costringendo il pilota ad una velocità di percorrenza di curva minore.

### 3.5 Drag Area

Non essendo possibile stimare il coefficiente di *Drag* in modo diretto attraverso metodi di misura, si ricorre ad un altro parametro stimabile sperimentalmente: l'area di *Drag*,  $C_D \cdot A$ . Essa ha le dimensioni fisiche di un'area poiché data dal prodotto tra il coefficiente di drag e l'area della superficie aerodinamica  $A$  misurata in  $m^2$ . È possibile stimare questa grandezza direttamente dal valore della forza in Kg, misurata in galleria del vento, secondo la relazione:

$$C_D \cdot A = \frac{D}{\frac{\rho}{2} V_\infty^2} \quad (3.21)$$

Il vantaggio in termini d'incertezza sulla misura è notevole: infatti, la stima prescinde dal valore della misura dell'area aerodinamica che è influenzata da una notevole incertezza soprattutto per corpi molto complessi. Lo svantaggio, invece, è dovuto all'impossibilità di usare  $C_D \cdot A$  per fare confronti sulla qualità aerodinamica di corpi differenti perché è differente la misura di  $A$ .

## 4 Prove in galleria del vento

Negli ultimi decenni le gallerie del vento sono diventate lo strumento principale nei programmi di progettazione dei veicoli terrestri, soprattutto per la misurazione delle forze e dei momenti aerodinamici che agiscono sul veicolo di prova in un ambiente controllato e ripetibile. L'indagine sperimentale avviene senza particolari problemi per numeri di Reynolds dell'ordine di  $10^6$ , molto più elevati di quelli raggiungibili con la simulazione numerica. Risulta invece più complesso variare i parametri dell'esperimento in termini di geometria, di condizioni al contorno (interferenza pareti) e di condizioni iniziali (turbolenza della corrente a monte).

Lo studio in Galleria del Vento può avere diversi obiettivi. In generale, l'indagine può essere finalizzata per:

- Sviluppare un progetto aerodinamico
- Sperimentare a posteriori per verifiche e correzioni
- Studiare un fenomeno di base
- Validare codici di calcolo

I settori in cui viene impiegato il suo utilizzo sono vari, tra cui quello aeronautico, civile, automobilistico/motociclistico, ambientale, sportivo, aeroacustico.

## 4.1 Tipologie di Gallerie del vento

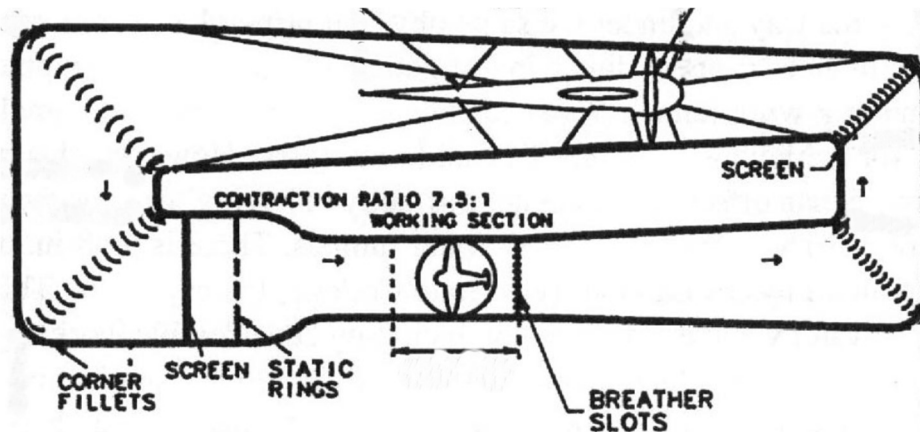


Figura 4.1 Esempio di Galleria del Vento aeronautica a circuito chiuso

Sono presenti diverse tipologie di Gallerie del Vento a seconda delle finalità di impiego. In generale, però, l'architettura nelle sue parti essenziali è dello stesso tipo e si può riassumere in due diverse configurazioni a seconda delle caratteristiche del circuito e della camera di prova.

- Circuito chiuso:
  - la massa d'aria circolante è sempre la stessa a meno di eventuali ricambi, quindi l'energia da fornire è minore a parità di dimensioni di camera di prova e velocità;
  - minore inquinamento da rumore dell'ambiente;
  - maggiore controllo della qualità di flusso attraverso angoli, reti, honeycomb;
  - costo iniziale elevato per il condotto di ritorno;



- necessità di raffreddamento per contrastare l'innalzamento della temperatura dovuto alla dissipazione dell'energia cinetica in calore, derivante dalle sorgenti dissipative quali strato limite e separazioni.
- Circuito aperto:
  - costo di produzione ridotto;
  - facile visualizzazione dei flussi senza problemi di residui circolanti nel condotto;
  - risente di variazioni di temperatura dell'ambiente;
  - maggiore rumore;
  - maggior dispendio di energia a parità di camera di prova e velocità a causa della dispersione della corrente nell'ambiente.

Le gallerie del vento si classificano anche in base al numero di Mach che si riesce a raggiungere in camera di prova:

- subsoniche incompressibili (Ma 0.4)
- subsoniche compressibili (0.4 Ma 0.8)
- transoniche (0.8 Ma 1.4)
- supersoniche (1.4 Ma 4)
- ipersoniche (Ma 4)

#### **4.1.1 Camera di prova**

La camera di prova è il tratto della galleria in cui viene effettuata la sperimentazione. Segue il tratto convergente e può essere chiusa (vena guidata) e aperta (getto libero). Per le prime, è importante che la sezione abbia qualche grado di divergenza per compensare la presenza dello strato limite sulle pareti.

Esso comporterebbe, infatti, un restringimento della sezione e il conseguente flusso accelerato genererebbe un gradiente di pressione negativo, ovvero alleviante. Questo problema non è considerabile, per ovvi motivi, nelle camere di prova aperte.

### 4.1.2 Divergente

La funzione del divergente (o diffusore) è quella di decelerare gradualmente la corrente, consentendo il recupero della pressione statica senza che si producano separazioni della corrente. A tal fine l'angolo di divergenza deve mantenersi sotto un certo valore per evitare che si generi un gradiente di pressione positivo (avverso) e, di conseguenza, una separazione anticipata del flusso interno.

### 4.1.3 Corners



Figura 4.2 Corners della Galleria del Vento "R.Balli"

Il circolo del flusso in una galleria a circuito chiuso avviene tramite quattro cambi di direzione di  $90^\circ$ , chiamati *corners*. Sono condotti a sezione costante che guidano la corrente attraverso delle guide dette “raddrizzatori”, che evitano grosse perdite di pressione limitando le separazioni. Vengono utilizzate delle forme diverse di

*turning vane* in base alle perdite di pressione che causano. Da precedenti studi, si è visto che la forma migliore è quella di un profilo alare che permette di mantenere la corrente più “attaccata” al dorso ed avere quindi un coefficiente di perdita inferiore come si vede in *figura 4.3*. [8]

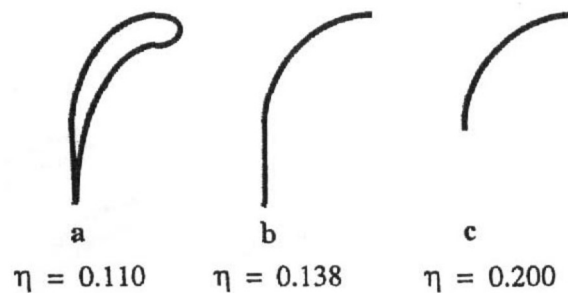


Figura 4.3 Tre tipi di turning vane a diverso coefficiente di perdita

#### 4.1.4 Camera di Tranquillizzazione (“Settling chamber”)

Si posiziona tra l’uscita dell’ultimo angolo e l’ingresso del convergente. È una parte fondamentale della Galleria perché è dove la corrente è maggiormente irregolare in termini di direzione del vettore velocità e di fluttuazioni turbolente. Infatti, si porta dietro tutte le separazioni locali a partire dall’incidenza del modello in camera di prova, oltre anche alle vibrazioni delle pareti. Serve, quindi, a “tranquillizzare” la corrente e a ridurre la sua velocità al valore più basso di tutto il circuito, avendo questo tratto una sezione trasversale maggiore. Le perdite di pressione sono proporzionali alla velocità come

$$\Sigma(\Delta p_{o_i}) \propto V^2 \quad (4.1)$$

Quindi diminuzioni di velocità portano a minori perdite in camera: è la condizione migliore per abbattere le turbolenze. Gli strumenti utilizzati sono:

- nido d'ape (“*honeycomb*”) per l’allineamento della corrente e la rottura delle strutture più grandi;
- reti (“*damping screen*”) per l’abbattimento delle strutture turbolente.

Come si nota in *figura 4.4*, la forma del nido d’ape può essere di diversi tipi, anche se la più utilizzata è quella ottagonale perché dotata di maggior efficienza e quindi di minori perdite di pressione.

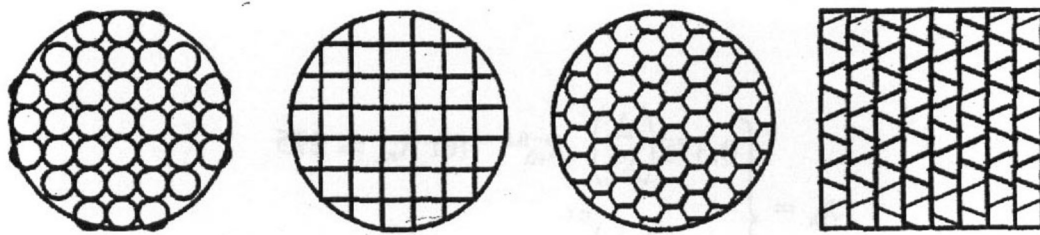


Figura 4.4 Quattro tipi di honeycomb [8]

#### 4.1.5 Convergente (“Nozzle”)

Il convergente serve per accelerare la corrente dalla velocità in uscita dalla camera di tranquillizzazione a quella in camera di prova, fino a raggiungere la velocità definita da progetto. In uscita dal convergente, la corrente deve risultare uniforme, allineata con l’asse della camera di prova e con basso livello di turbolenza.

Si è, infatti, notato e poi dimostrato che oltre ad accelerare, in questa sezione il flusso subisce la riduzione delle fluttuazioni longitudinali  $u'$  e trasversali  $v'$ .

#### 4.1.6 Motore elettrico

La struttura del motore si divide in una parte rotorica, il fan, e una parte statorica, le pale fisse. La prima ha funzione di fornire l'energia persa dal fluido nella galleria per effetto delle perdite di carico, sotto forma di incremento di pressione totale attraverso l'elica.

$$\Delta p_{elica} = \Sigma \Delta p_{0i} \quad (4.2)$$

Le pale fisse, invece, hanno funzione strutturale di sostegno del gruppo motore tramite ancoraggio alle pareti della galleria, oltre che di contenimento del fenomeno di swirling del flusso causato dall'energia cinetica rotatoria del fan.

La collocazione migliore del gruppo motore è quella a valle del secondo corner, dove il flusso ha ancora sufficiente velocità da non abbassare di troppo il rendimento dell'elica, la sezione non è troppo grande da appesantire i costi di produzione e, per ultimo, il rumore è molto attenuato.

#### 4.1.7 Bloccaggio e interferenza

Le dimensioni del modello e le dimensioni trasversali della camera di prova vincolano i test effettuabili a causa dell'insorgere di fenomeni come il bloccaggio e l'interferenza. Il primo è definito come il rapporto tra ingombro frontale del modello e la sezione trasversale della camera di prova:

$$B = \frac{S_{mo}}{S_{ts}} \quad (4.3)$$

Non deve essere superiore al 10:15% per non influenzare la corrente di monte che ne verrebbe rallentata e per limitare le interferenze tra parete e modello. Il modello

con dimensioni troppo grandi, infatti, genererebbe una deflessione anomala delle linee di corrente che, come conseguenza, porterebbe a una distribuzione diversa di velocità e pressione attorno al modello stesso.

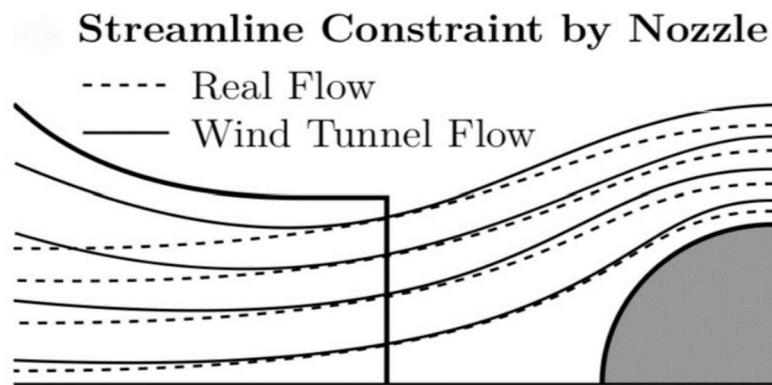


Figura 4.5 Bloccaggio e interferenza del modello in Galleria del Vento [9]

#### 4.1.8 Visualizzazione del flusso

Il metodo più semplice e più frequentemente utilizzato per la visualizzazione del flusso superficiale è quello dei “fili di lana” (“*Tufting*”) che consiste nel fissare dei ciuffi di lana sulla superficie di interesse o, meno comunemente, in scia. I ciuffi devono essere di un materiale leggero e flessibile che si allineino al flusso superficiale locale come risultato della forza aerodinamica diretta. Il materiale più comunemente usato è un monofilamento molto piccolo in poliestere e cotone, come ad esempio il Clark's O.N.T. mercerizzato n. 60. I ciuffi influiscono in qualche misura sulle forze aerodinamiche, ma ci sono molte situazioni in cui il metodo è così facile ed economico da essere la prima scelta.

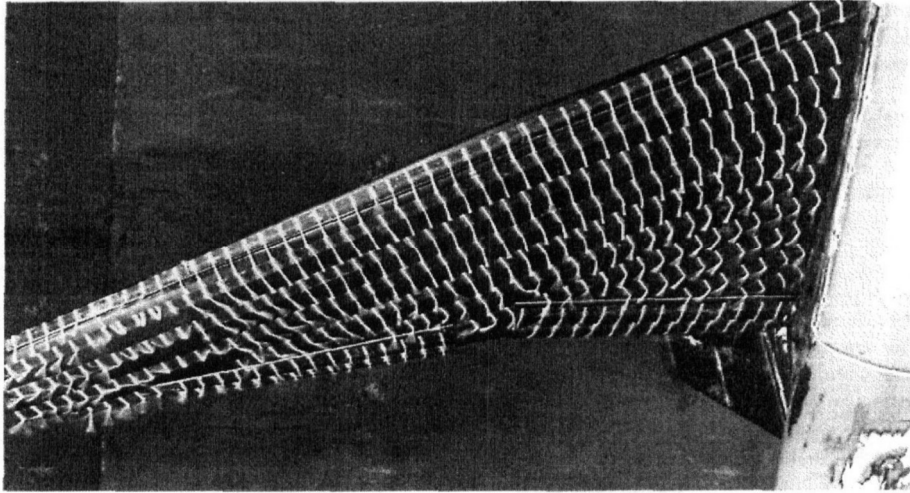


Figura 4.6 Fili di lana posizionati sulla superficie con nastro adesivo. [10]

Oltre all'utilizzo dei fili incollati alla superficie, come si vede in *figura 4.6*, un'altra tecnica meno utilizzata ma comunque presente in bibliografia, è quella dei fili incollati a dei monofilamenti che si estendono dalla superficie inferiore a quella superiore della camera di prova. In questo caso, invece di ottenere una visualizzazione sull'andamento del flusso intorno al modello, viene mostrato quando il flusso è in zone a regime laminare o turbolento.

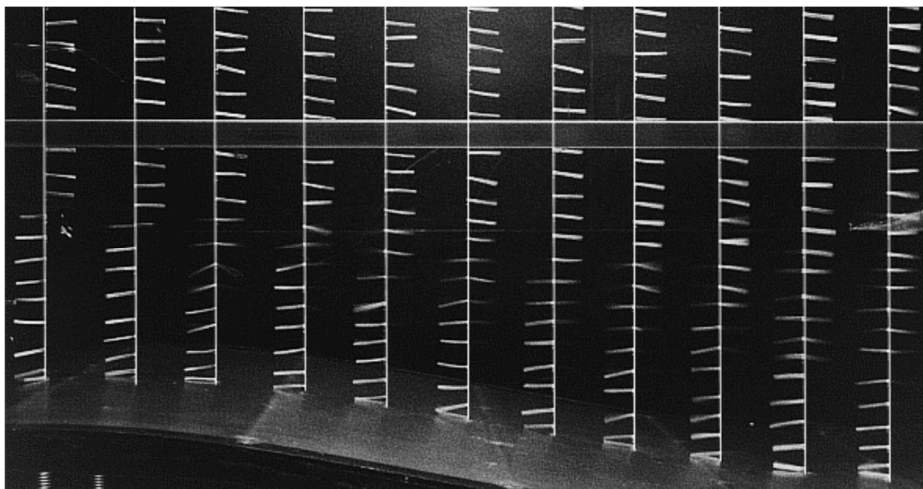


Figura 4.7 Fili di lana fissati su un monofilamento collegato dalla superficie al soffitto della camera. [10]

## 4.2 Galleria del vento “R. Balli”

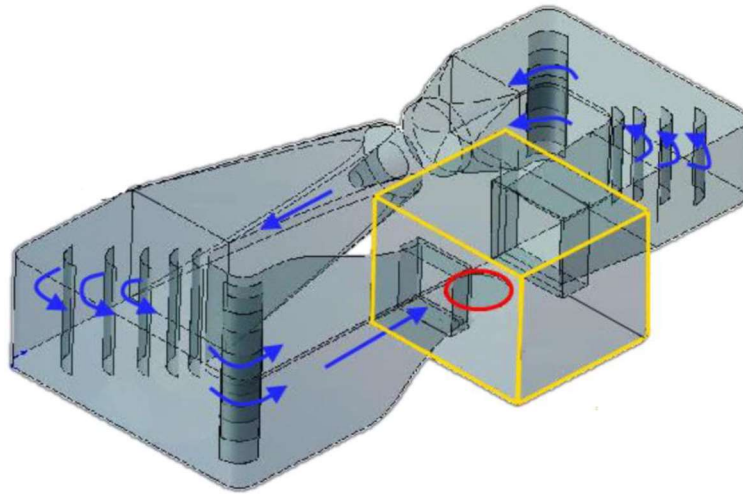


Figura 4.8 Modello Galleria del Vento "R.Balli"

L'Università di Perugia è fornita di una galleria del vento in configurazione a circuito chiuso con una sezione di test aperta mostrata in figura 4.1.1. L'aria entra nella sezione di test attraverso un ugello di 2200 mm x 2200 mm, mentre la lunghezza totale dell'area di test è di 3.95 m. A valle della sezione di test segue un diffusore con un incremento di sezione di 1.5:1 rispetto alla sezione d'ingresso che permette di frenare il flusso prima che raggiunga le due curve che lo portano al motore. Il condotto convergente a monte della sezione di test serve ad accelerare il flusso riducendo lo strato limite sulle pareti del condotto.

La galleria è formata da 4 curve con un angolo di 90°, necessarie per indirizzare il flusso dal motore alla sezione di test e viceversa; ogni curva dà un fattore di perdita di circa 0.15 e in ogni curva sono presenti dei deviatori che facilitano il flusso nel compiere la curva. Il condotto che ospita il motore è rastremato in modo da fornire un graduale passaggio dalla sezione rettangolare a una sezione circolare, dove sono



poste le pale del motore. A valle del motore è presente un diffusore lungo 11.76 m che può essere diviso in due parti: la prima è a sezione circolare e contiene una porzione del rotore, la seconda a sezione rettangolare e lunga 10 m, serve per frenare il flusso verso la seconda coppia di curve a 90° che portano alla zona di test. La perdita di carico totale del tunnel, vuoto alla massima velocità, è di circa 1000 KPa.

La massima velocità raggiunta dal flusso è di 200 Km/h grazie all'utilizzo di un rotore di 11 pale ognuna con guscio in fibra di carbonio, mosso da un motore elettrico di 375 kW il cui controllo è effettuato tramite inverter. Per attenuare le componenti turbolente e il valore medio della componente trasversale del flusso è installata una fitta struttura a nido d'ape prima del tratto convergente a monte della sezione di test. Alla velocità del flusso di 160 Km/h e con la sezione di test vuota, la distribuzione di velocità del flusso a 50 mm dall'ugello, ha un valore medio di 43,6 m/s con una deviazione del 3% dal valore medio e una componente di turbolenza longitudinale e laterale media sotto lo 0.8%.

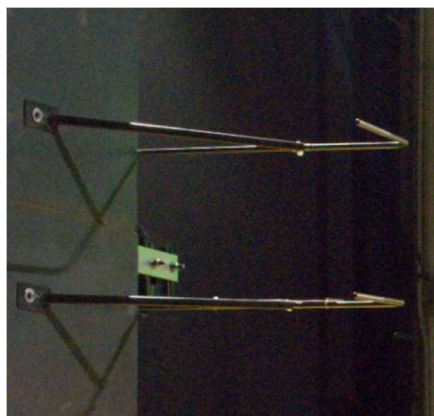


Figura 4.9 Tubi di Pitot a monte della sezione di prova

La pressione statica e dinamica nella sezione di test sono misurate attraverso due Tubi di Pitot posti in prossimità della sezione minima del tratto convergente, a monte della sezione di test.

Le prese di pressione dinamica e statica dei tubi di Pitot hanno un diametro di 1,5 mm. Dato che le componenti trasversali del flusso ostacolano la formazione di un vero punto di ristagno nella zona della presa di pressione totale, i tubi di Pitot sono stati progettati per avere un'insensibilità alle componenti disallineate generando un errore dell'1% per un valore del disallineamento di  $10^\circ$ . Il disallineamento dei vettori di velocità genera un errore anche nella misura della pressione statica perché le prese di pressione sono esposte alle stesse componenti di velocità. La pressione statica è misurata da otto prese di pressione equamente spaziate sulla circonferenza: considerando che il vettore di velocità è lo stesso in queste quattro posizioni, gli errori dovuti al disallineamento sono compensati. Per i fenomeni descritti si può stimare un errore totale di 1.5% con un disallineamento di  $10^\circ$ . Se le prese di pressione statica sono troppo vicine ai supporti, l'influenza del ristagno causa un incremento di pressione statica a monte: il rapporto tra il diametro dei tubi di Pitot e la distanza tra le prese di pressione statica e i supporti è 13, producendo un errore di circa 0.5%.

L'errore tende ad essere cancellato dall'effetto della presenza del tubo di Pitot nel flusso; infatti, dato che le linee di flusso vicine al tubo devono essere lunghe come quelle nel flusso indisturbato, avrà luogo un aumento di velocità e una diminuzione di pressione statica. Nei tubi di Pitot usati, la distanza tra le prese di pressione totali e statiche è di 25 mm così da produrre un errore più piccolo dell'1%. Per misurare la pressione interna al Pitot con un range di misura da 0 Pa a 1750 Pa, si usa un

trasduttore di pressione ad alta accuratezza: in tale range il sensore è molto lineare con un'incertezza combinata sotto a 0.25%.

Per misurare i parametri ambientali della prova si utilizza una stazione di controllo collocata nella sezione di test, al riparo del flusso diretto. La stazione fornisce il valore della pressione ambientale statica, della temperatura e dell'umidità relativa necessarie per calcolare la densità del flusso d'aria circolante nella galleria. La temperatura è misurata attraverso un rilevatore a resistenza con un'incertezza di 0.2°C; mentre la pressione ambientale è misurata dal trasduttore di pressione DRUCK PTX 1400 operante nel range da 800 a 1400 mbar con un'incertezza approssimativa di 0.15%.

La misura dei carichi aerodinamici è effettuata da una bilancia che utilizza celle di carico a 6 componenti che permettono di scomporre forze e momenti nelle tre direzioni principali del sistema di riferimento. Per costruire una bilancia per gallerie del vento, è necessario scendere a un compromesso tra massima capacità di carico, per ogni componente, e accuratezza richiesta per i carichi minimi. Le celle di carico sono montate sotto il telaio che regge il veicolo, composto di una struttura di base, un piatto superiore e un triangolo flottante come mostrato in figura 4.10. [4]

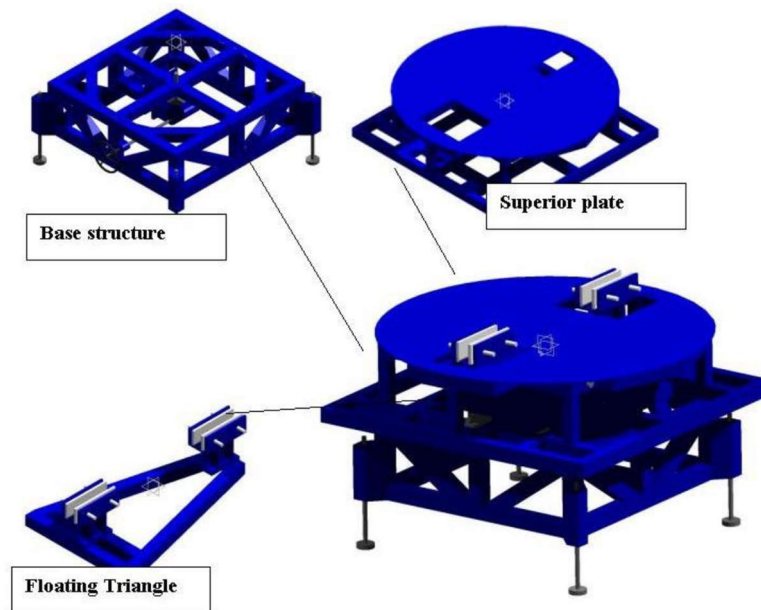


Figura 4.10 Bilancia nella sezione di prova della Galleria "R.Balli"

Il veicolo, posto sul piatto superiore, è perfettamente ortogonale al piano e allineato con la direzione del flusso, sfruttando una linea longitudinale di riferimento posta sul piatto. Ogni ruota del veicolo giace su supporti differenti connessi al triangolo flottante, che emergono da due fori posti sul piatto. Il triangolo flottante, mostrato in dettaglio in *figura 4.11*, permette il trasferimento delle forze e momenti alle celle di carico montate sulla struttura che supporta il piatto.

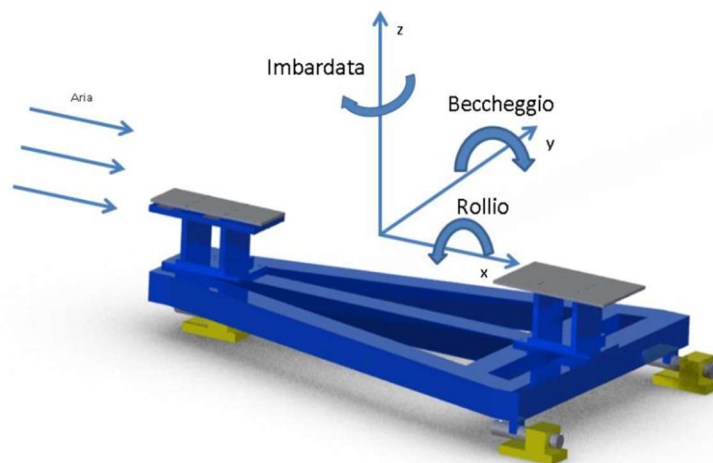


Figura 4.11 Triangolo flottante e celle di carico

Nella *figura 4.11*, con il colore giallo, vengono rappresentate le tre celle di carico bidimensionali che, con i loro alberi, supportano il triangolo flottante in corrispondenza dei vertici: esse rappresentano l'elemento sensibile della bilancia.

Le celle di carico hanno una sezione prismatica sulla quale sono collocati degli estensimetri che misurano le deformazioni che agiscono sul piano ortogonale all'albero della cella. Per ottenere da essi un segnale analogico, proporzionale a uno dei due carichi nelle due direzioni e insensibile al carico nell'altra direzione, si collega ogni estensimetro a un ramo di un ponte a 4 resistenze. Le celle di carico soddisfano i requisiti di accuratezza ottimale, stabilità a lungo termine, basso attrito, alta risoluzione, alta ripetibilità e possibilità di misurare forze di trazione e compressione. I parametri operativi sono schematizzati in *tabella 5.1*.

	<i>Carico Verticale</i>	<i>Carico Orizzontale</i>
<i>Massimo carico (Kg)</i>	500	200
<i>Sensitività nominale (mV/V)</i>	1.00	1.00
<i>Tensione fornita (Vcc)</i>	5÷10	5÷10
<i>Isteresi</i>	<0.03%	<0.03%
<i>Ripetibilità</i>	<0.03%	<0.03%
<i>Non linearità</i>	<0.03%	<0.03%
<i>Deriva dello zero (g)</i>	100	100

Tabella 4.1 Parametri operativi delle celle di carico della bilancia

Ogni cella ha un massimo carico verticale di 500 Kg e un massimo carico orizzontale di 200 Kg. Il segnale in uscita dalle celle è opportunamente condizionato e amplificato: la calibrazione del sistema cella di carico e amplificatore è eseguito da 0 a 100 Kg per ridurre l'incertezza. Considerando che l'allineamento degli alberi delle celle di carico sia corretto nelle direzioni del sistema di riferimento delle forze aerodinamiche e che il sistema bilancia sia assolutamente rigido, si può facilmente determinare la correlazione tra le sei componenti aerodinamiche e il segnale proveniente dalle celle di carico. In pratica si è osservato che il comportamento della bilancia è molto lineare con minime interazioni tra bilancia e componenti. Le celle di carico danno una correlazione ai minimi quadrati superiore al 99% e la bilancia è capace di misurare componenti di forze e momenti aerodinamici tridimensionali con un'incertezza dell'1%; l'incertezza di ripetibilità della misura è minore dello 0.2%. Le incertezze combinate del sistema di misura sono riportate in tabella 4.2. [4]

<i>Incertezza combinata</i>	
<i>Singola cella</i>	Da 0.1% a 0.8%
<i>Drag</i>	0.2%
<i>Lift</i>	1%
<i>Forza laterale</i>	0.2%
<i>Lunghezza</i>	0.1 mm
<i>Rollio</i>	0.5°

Tabella 4.2 Incertezze del sistema di misura

Il sistema di acquisizione dati è costituito da un PC che monitora in continuo le misure fatte durante i test. I segnali prodotti dai trasduttori di forza, pressione e temperatura sono acquisiti da una scheda National Instruments BNC-2090. Il programma che gestisce l'acquisizione di dati esegue il salvataggio e fornisce un'interfaccia utente; è realizzato con il software LABVIEW della National Instruments. Nell'interfaccia utente l'operatore inserisce le condizioni della prova (la frequenza di campionamento, il numero di campionamenti, la durata della prova, ecc.) e monitora in tempo reale i parametri acquisiti grazie alla presenza di grafici e indicatori. La presentazione dei dati raccolti è affidata a fogli di calcolo sui quali sono riportati un riepilogo delle varie prove, i valori medi per ogni prova e i valori istantanei acquisiti per l'intera durata di ogni singola prova.

Il software presenta simultaneamente a video i parametri aerodinamici calcolati istantaneamente, la velocità istantanea dell'aria e la densità del flusso: in questo modo si può valutare la qualità di un determinato profilo, l'efficacia delle modifiche apportate al modello di partenza e la stabilità e ripetibilità della prova.

### 4.3 Set up sperimentale

Per poter procedere con la sperimentazione in Galleria del vento si è dovuto prima iniziare con la realizzazione dell'impianto di misurazione da porre a valle della moto per poterne studiare la scia. Il primo supporto che è stato necessario realizzare a tal fine è stato quello per l'alloggio del tubo di Pitot, in modo che potesse scorrere su una guida e permettere misurazioni lungo più coordinate dello stesso asse.

Una volta prese le misure affinché il pezzo da realizzare avesse il giusto fitting con l'asta su cui sarebbe dovuto scorrere, ho provveduto alla sua progettazione in *SOLIDWORKS 3D* mostrato in *figura 4.12*.

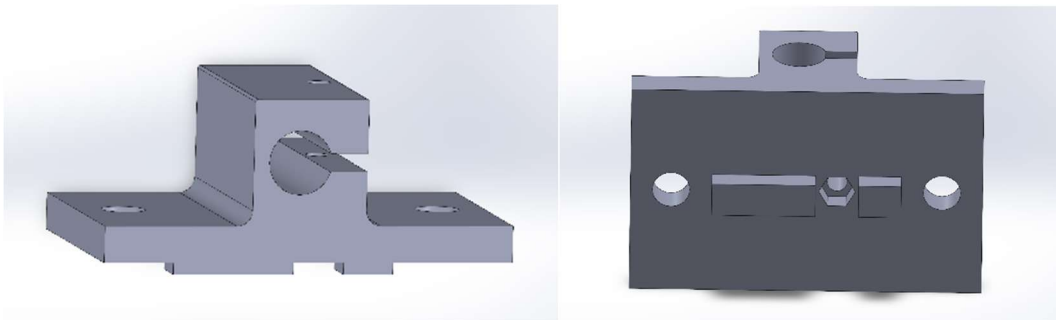


Figura 4.12 Raffigurazione 3D del sostegno del Tubo di Pitot in SolidWorks

Il passo successivo è stato quello di generare un G-code attraverso un programma di *Slicing*, utile per la lettura del file da parte della stampante. Si è utilizzato *UltiMaker Cura* per definire i dettagli della stampa 3D, tra i quali il 100% di densità di riempimento del materiale, una temperature del piatto di 220°C e del *nozzle* di 60°C, una velocità di stampa di 50 mm/s, una *dynamic quality* di 0.16 mm per ogni strato, un'adesione al piatto di tipo *Brim* e la generazione di supporti per quei punti che lo necessitano. A questo punto tramite *microSD* si è esportato il file *G-code*



nella stampante e si è proceduto all'esecuzione della stampa. La stampante è a filamento e di modello *Creality Ender 3 Pro*, con un *nozzle* di  $\varnothing 0.4$  mm e un materiale *PLA* di  $\varnothing 1.75$  mm.

### 4.3.1 Traversing per le misurazioni in scia

Una volta provato il suo effettivo fitting con la strumentazione già in dote al laboratorio del Dipartimento di Ingegneria, si è passati alla creazione dell'apposita struttura su cui far scorrere il sostegno stampato. L'obiettivo è far sì che si possa avere un range di misurabilità ampio in termini di larghezza di scia e al tempo stesso che la struttura rimanga entro certi limiti di vibrazione per rendere affidabili e accurate le misure fatte a 45 m/s. Per la sua realizzazione sono stati utilizzati profili "Bosh Rexroth" in alluminio a sezione quadrata 45x45 mm (*figura 4.13*), con scanalatura centrale che funge da guida per il profilo verticale a cui è fissato il Pitot.

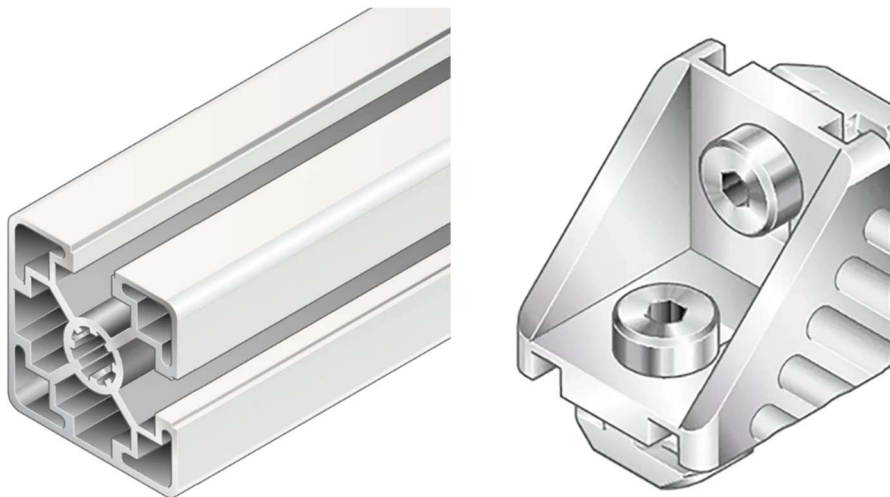


Figura 4.13 Profilo e staffa angolare Bosh Rexroth in alluminio

La guida verticale è movibile da 0-1000 mm lungo  $y$  e mentre il sostegno stampato del Pitot si muove da 270-870 mm lungo  $z$  (vedi *figura 4.14*). A seguito di verifiche sulla stabilità del traversing alla velocità massima di studio di 45 m/s, si è deciso di montare altri sostegni verticali che andassero a ridurre il più possibile il grado di libertà di torsione della struttura lungo l'asse  $y$ .



Figura 4.14 Sistema di riferimento cartesiano nella galleria "R.Balli"

Il sostegno è stato montato lungo una sola direzione dell'asse  $y$  per una scelta fatta a priori, considerando simmetrico il flusso intorno e a valle della moto. Si tratta ovviamente di un'approssimazione, in quanto a fronte di una garanzia di simmetria di moto e manichino, la stessa cosa non si può dire dell'aerodinamica interna del modello stesso. Il flusso attraversa, infatti, componenti quali radiatore, motore, trasmissione, che non garantiscono condizioni di simmetria e di ottimizzazione aerodinamica.

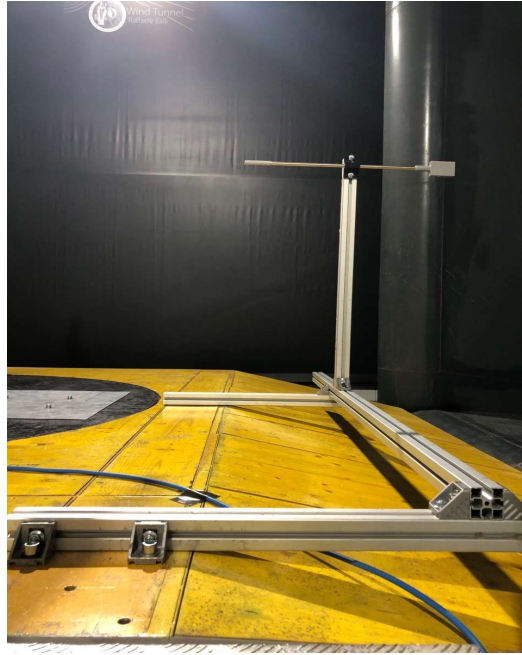


Figura 4.15 Struttura di sostegno del tubo di Pitot a valle della moto

La misura del Pitot sull'asse  $x$  rimane fissa a  $x=-690$  mm rispetto al punto di contatto della ruota posteriore con il suolo, considerato come origine del sistema di riferimento della moto (vedi *figura 4.16*).



Figura 4.16 Distanza del tubo di Pitot dal punto di coordinate  $(x,0,0)$

### 4.3.2 Tubo di Pitot

Il tubo di Pitot utilizzato per le misurazioni in scia è un modello Pitot-Static System PSS-8™ a 8 fori (in *figura 4.17*), e con dati di output completamente calibrati in funzione della temperatura. Il sensore di pressione è di tipo Honeywell con segnale seriale in uscita a interfaccia SPI, frequenza di campionamento di 1 kHz e pressione di lavoro massima pari a  $\pm 5$  inH<sub>2</sub>O che corrispondono a  $\pm 1250$  Pa. Ha un range di temperatura di lavoro nell'intervallo  $-45^{\circ}\text{C} < T < +85^{\circ}\text{C}$  e accuratezza pari a 0.1%FS. In più, ha integrato un trasduttore di pressione caratterizzato da una risposta in frequenza pari a 2 kHz che in primissima approssimazione consente di stimare le fluttuazioni di pressione della scia.

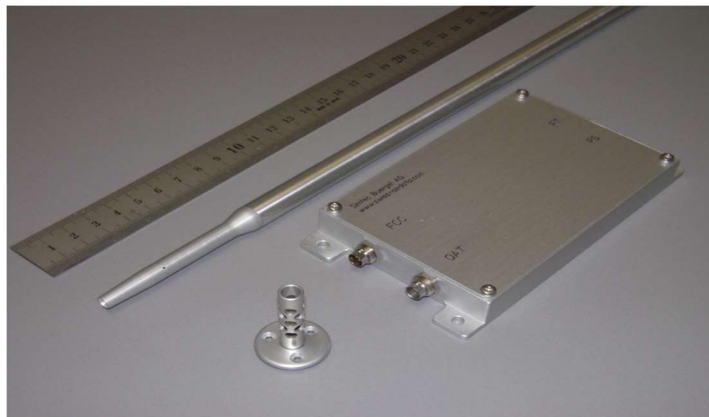


Figura 4.17 Tubo di Pitot PSS-8 utilizzato per le prove in Galleria del Vento

Dalle specifiche tecniche del Tubo di Pitot in esame (in *figura 4.18*), si vede come la percentuale di errore di misura al variare dell'angolo di attacco permetta di avere dati realistici ed affidabili di pressione totale (inferiori al 2%) fino a circa  $10^{\circ}$  di inclinazione. Questo garantisce, appunto, a fronte di vibrazioni dovute all'elevato grado di turbolenza, un'affidabilità nelle misure fatte.

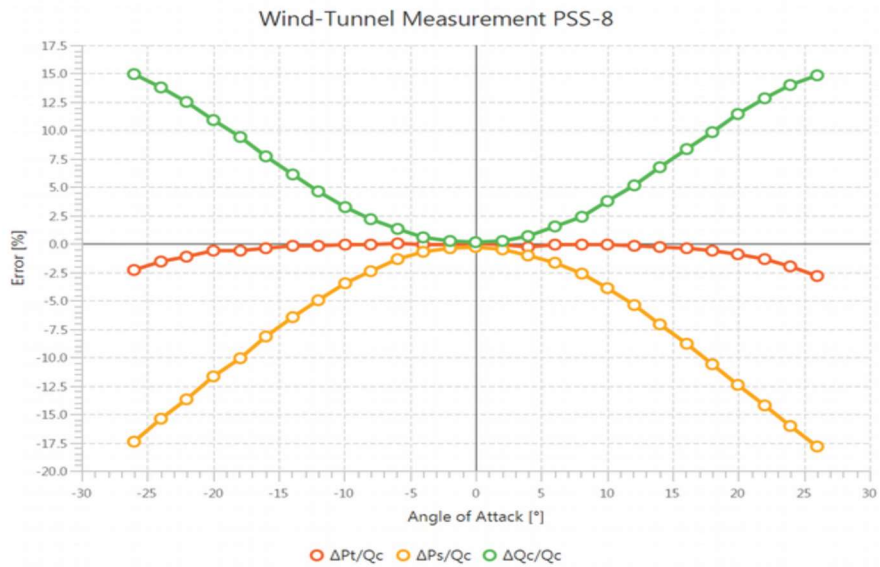


Figura 4.18 Grafico di sensibilità del Pitot PSS-8 al variare dell'angolo di attacco

Tramite “Serial Plotter” si sono acquisiti direttamente i dati di pressione dinamica in uscita dal Pitot come si vede in *figura 4.19*, per un periodo  $T= 20 s$  che corrispondono quindi, con campionamento a 1 kHz, a 20.000 acquisizioni.

Per un’analisi statistica è sufficiente anche una bassa frequenza di campionamento purché il tempo totale di acquisizione sia sufficientemente lungo. È importante infatti che i valori medi statistici abbiano raggiunto la cosiddetta “convergenza statistica”. In questo caso una frequenza di campionamento piuttosto elevata, ha permesso un tempo di acquisizione relativamente corto.

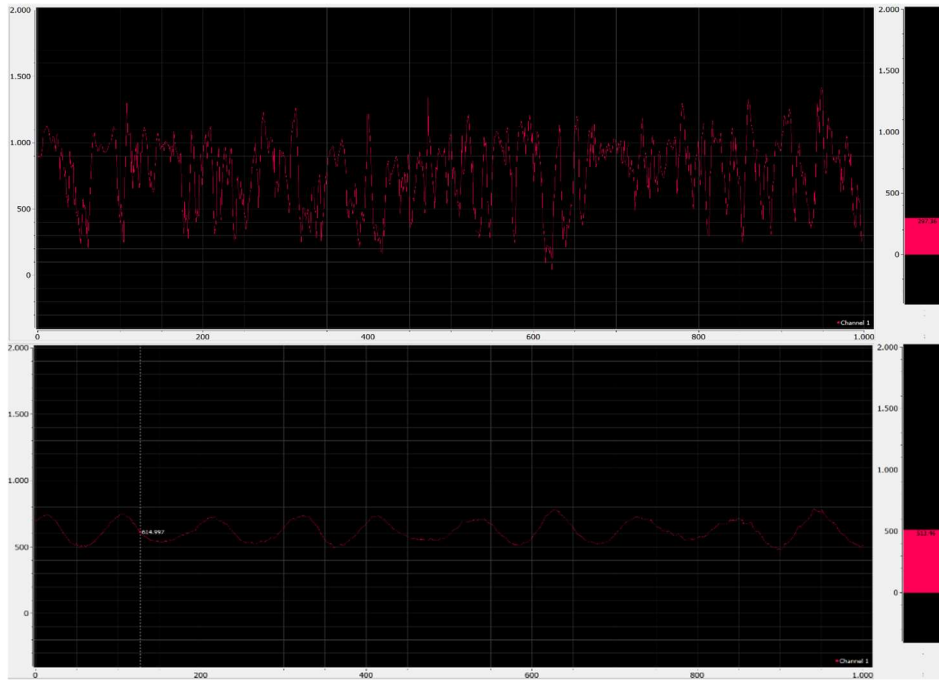


Figura 4.19 Acquisizione segnale Tubo di Pitot in seriale

I vari coefficienti aerodinamici quali Drag, Lift, Pitch, Roll, Yaw sono stati elaborati in automatico attraverso il sistema di acquisizione della galleria legato alla bilancia di carico prima descritta e poi visualizzato tramite un'interfaccia in ambiente Labview (vedi figura 4.20).



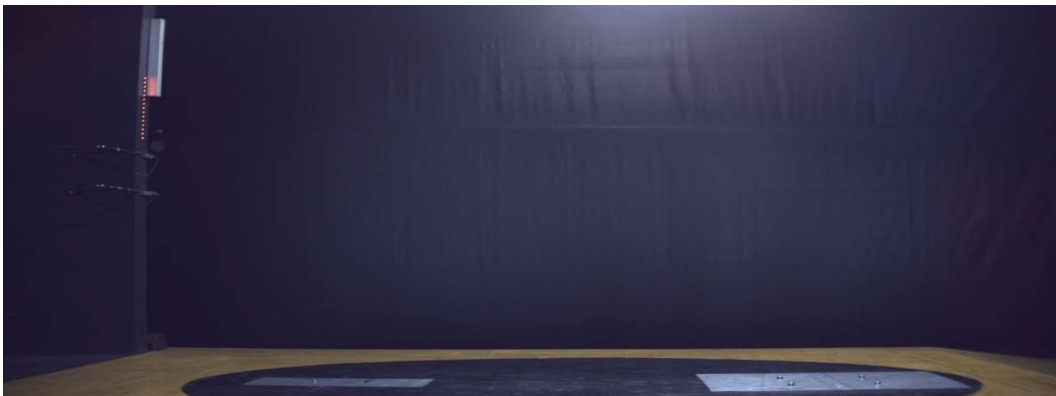
Figura 4.20 Software acquisizione dati in ambiente Labview

### 4.3.3 Modello in galleria del vento

Il modello su cui sono state effettuate le misurazioni in Galleria del Vento è una moto *Aprilia RSV 1000 R Factory* in dotazione al Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Perugia. Al fine di studiare le variazioni di fluttuazioni turbolente in scia, si sono adottate varie configurazioni e, poi, confrontate tra di loro per valutarne l'efficienza in termini di *Drag*, di profili di velocità media e di velocità fluttuanti associate alla turbolenza. Ad ogni configurazione sono state valutate tre velocità, ovvero 15m/s, 33m/s e 45m/s, così da ottenere un riscontro anche in base alla dipendenza dal numero di Reynolds.

Le configurazioni sono:

1. Camera di prova vuota

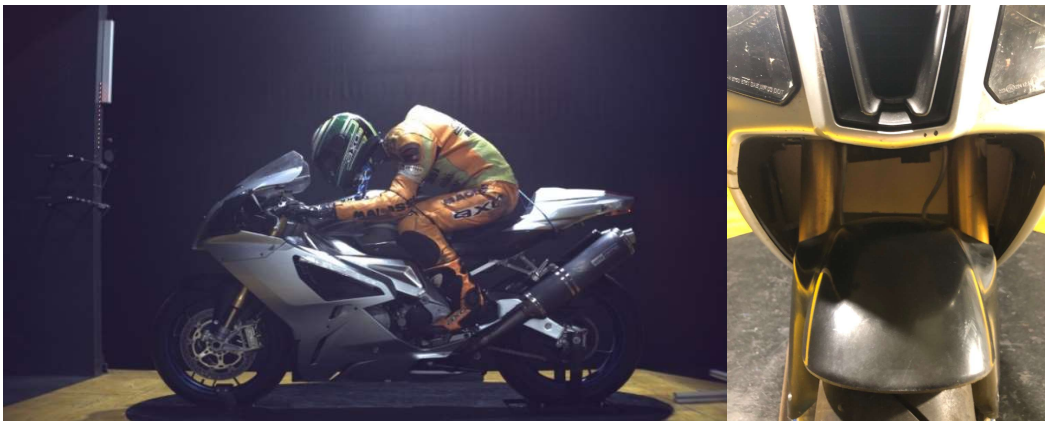




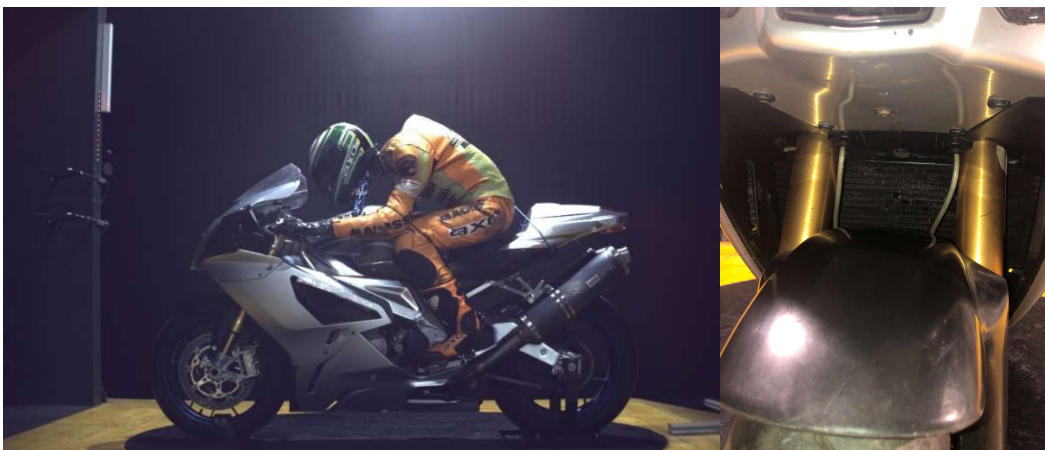
2. Moto Aprilia RSV 1000 in camera di prova + Radiatore chiuso (M+RC)



3. Moto + Manichino + Radiatore chiuso (M+MA+RC)



4. Moto + Manichino + Radiatore aperto (M+MA+RC)





5. Moto + Manichino + Radiatore aperto + Deflettore aria chiuso  
(M+MA+RC+DC)



La scelta nell'utilizzo del manichino piuttosto che di un pilota risiede nella necessità di garantire una ripetibilità duratura nelle varie giornate di test che si sono svolte durante un periodo di circa 20 giorni. Il concetto di "ripetibilità", infatti, viene definito come "il livello di accordo tra valori misurati con lo stesso strumento, lo stesso operatore, le stesse condizioni, misurati a distanza di tempo relativamente breve".

Nei test motociclistici, uno degli ostacoli per la ripetibilità delle prove è proprio la posizione del pilota. Tempi così lunghi di lavoro hanno quindi reso necessario un adattamento da questo punto di vista. Il manichino è dotato di equipaggiamento sportivo da competizione ed è stato legato alla stessa moto con tiranti di corda.

## 5 Post-processing dei dati e risultati

Mentre venivano acquisiti i dati, si sono da subito elaborati gli stessi, estrapolandone le principali caratteristiche del flusso. Ciò ha permesso di valutare, sin dall'inizio, le zone più critiche di variazioni di pressione legate alla turbolenza e si è proceduto ad adattare le misurazioni proprio in base a queste visualizzazioni.

### 5.1 Galleria con camera di prova vuota

Come primi test si è scelto di lavorare a camera di prova vuota, per avere un'idea generale sulle caratteristiche della stessa e su come, senza modelli che ne ostacolassero il flusso, si distribuisse la turbolenza. Sono state, quindi, fatte misure lungo tutta l'estensione del *traversing*, da coordinata  $y=0$  mm a  $y=1050$  mm. Lungo gli altri due assi, come detto nel *paragrafo 4.3.2*, il range rimarrà fisso per tutte le prove ( $270 \text{ mm} < z < 870 \text{ mm}$ ,  $x = -690 \text{ mm}$ ). La velocità considerata per questo primo test è stata 45 m/s, così da avere consapevolezza del minimo range di misure disponibile alla massima velocità raggiungibile.

Nei successivi grafici, le ascisse indicano le coordinate  $y$  lungo cui si può muovere il tubo di Pitot, mentre le ordinate rappresentano i valori percentuali delle fluttuazioni di velocità calcolate algebricamente a partire dalle differenze di pressione in uscita dal Pitot (vedi *equazione 3.15*).

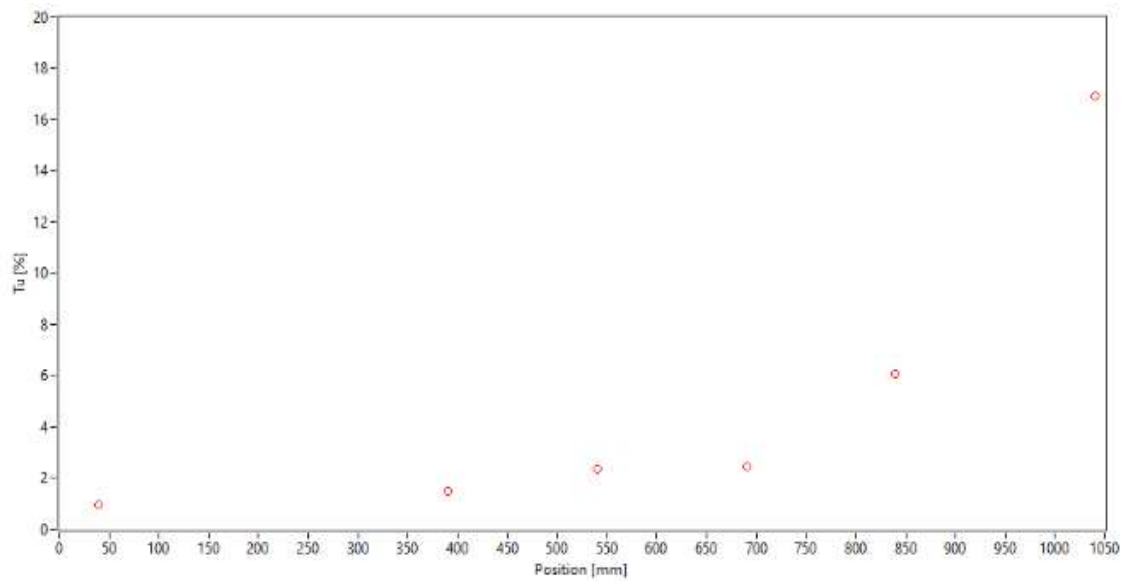


Figura 5.1 Entità delle fluttuazioni % ,  $V_{inf} = 45 \text{ m/s}$ ,  $z = 270 \text{ mm}$

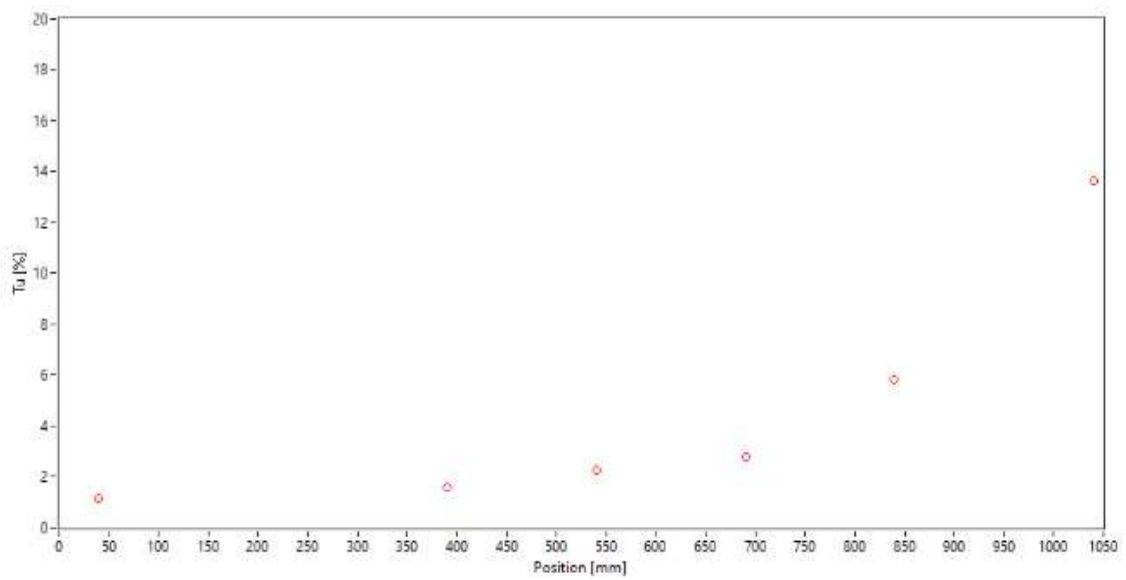


Figura 5.2 Entità delle fluttuazioni % ,  $V_{inf} = 45 \text{ m/s}$ ,  $z = 470 \text{ mm}$

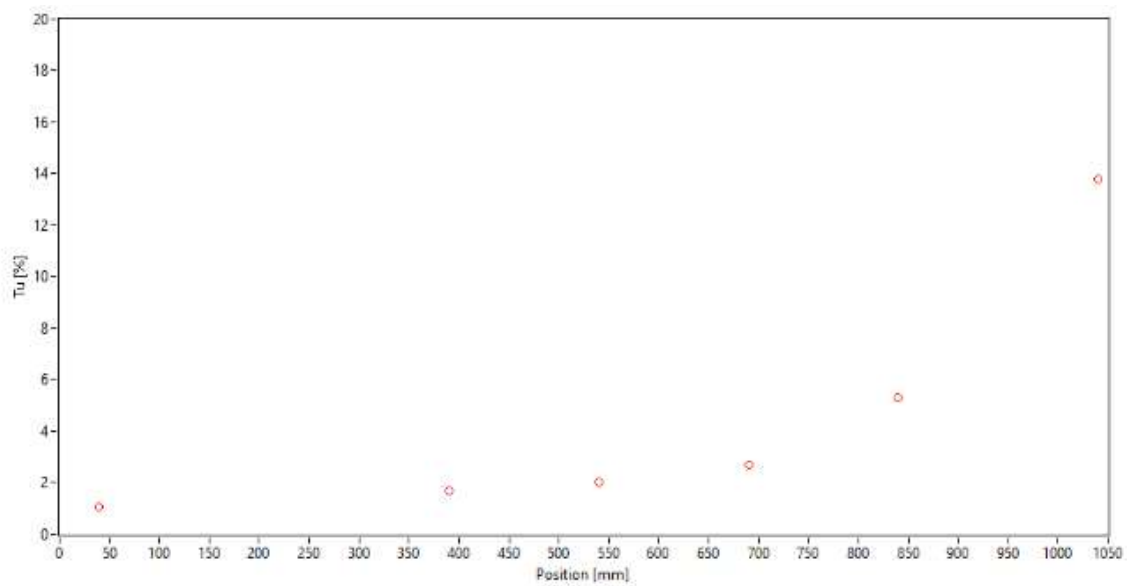


Figura 5.3 Entità delle fluttuazioni % ,  $V_{inf} = 45$  m/s,  $z=670$  mm

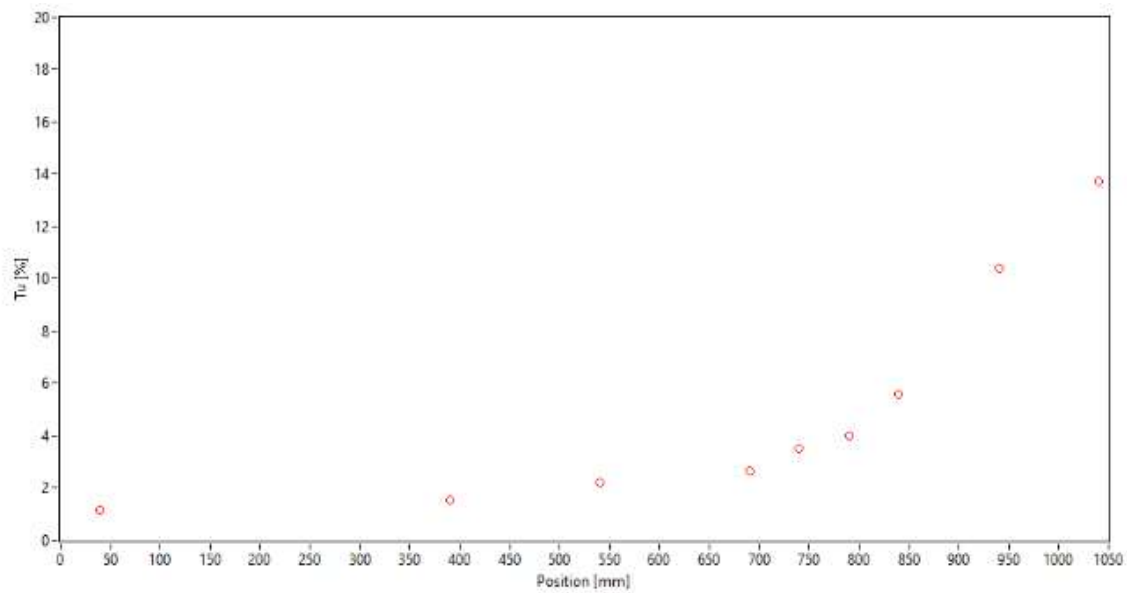


Figura 5.4 Entità delle fluttuazioni % ,  $V_{inf} = 45$  m/s,  $z=870$  mm

Come si nota dai grafici precedenti (*figure 5.1, 5.2, 5.3, 5.4*), a 45 m/s, la galleria vuota presenta una fluttuazione di velocità percentuale crescente all'aumentare della coordinata y, passando da I=1% in y=0 mm, a circa I=15% in y=1040 mm. In quest'ultima coordinata, l'interazione tra il flusso esterno approssimato a U=0 m/s e il getto in uscita dal convergente genera il fenomeno di shear layer e quindi una vorticosità dell'aria che spiega questo importante aumento di valore numerico. Lo stesso fenomeno lo notiamo in tutte le altezze z misurate.

In base a questi risultati, quindi, possiamo considerare le misure in camera di prova a 45 m/s affidabili fino a circa y=700 mm, dove il flusso che giunge in camera di prova riesce a mantenersi "pulito" con un range di turbolenza mediamente costante intorno al 2%. Questo ha portato nelle successive misurazioni e configurazioni ad escludere le y>700 mm.

A questo punto il passo successivo è stato inserire la moto in camera di prova e tarare la bilancia. La taratura avviene per far sì che vengano considerate già in partenza le influenze che le celle di carico posteriori hanno su quelle anteriori e viceversa e azzerarle.

BILANCIA 6 COMPONENTI : MATRICE DI TARATURA EFFETTIVA							
	Lift	Pitch	Drag	Side	Yaw	Roll	
Lift	1.426E+01	-4.468E-02	2.410E-02	4.011E-02	1.213E-02	9.875E-02	Kg / V
Pitch	0.000E+00	1.636E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.276E-03	1.044E-02	
Drag	1.806E-02	0.000E+00	4.182E+00	-3.492E-02	3.456E-02	7.895E-02	
Side	-6.796E-02	-2.429E-01	-3.596E-02	9.723E+00	-5.928E-03	-2.037E-02	Kg m / V
Yaw	0.000E+00	0.000E+00	-5.533E-03	3.036E-02	3.335E+00	0.000E+00	
Roll	-1.022E-02	-1.415E-02	-4.502E-03	0.000E+00	-6.637E-03	3.923E+00	

Figura 5.5 Esempio di matrice di taratura di una bilancia aerodinamica a 6 componenti

In *figura 5.5* si vede l'esempio di una matrice di taratura 6x6 che mostra sulla diagonale principale i valori dei coefficienti principali di taratura, mentre nelle altre posizioni i valori dei coefficienti di interferenza che, come si nota, devono essere il più possibile tendenti a valore nullo.

## 5.2 Moto+RC (radiatore chiuso)

Si è proceduto alle misure della sezione di scia in configurazione “Moto+Radiatore Chiuso”, escludendo quindi gli effetti dell'aerodinamica interna. Mantenere il radiatore chiuso nei test in galleria del vento è una prassi consolidata di quando si vogliono studiare solo modifiche alla carena esterna. Sono stati ottenuti i seguenti risultati alle 3 velocità precedentemente descritte: 15 m/s, 33 m/s, 45 m/s.

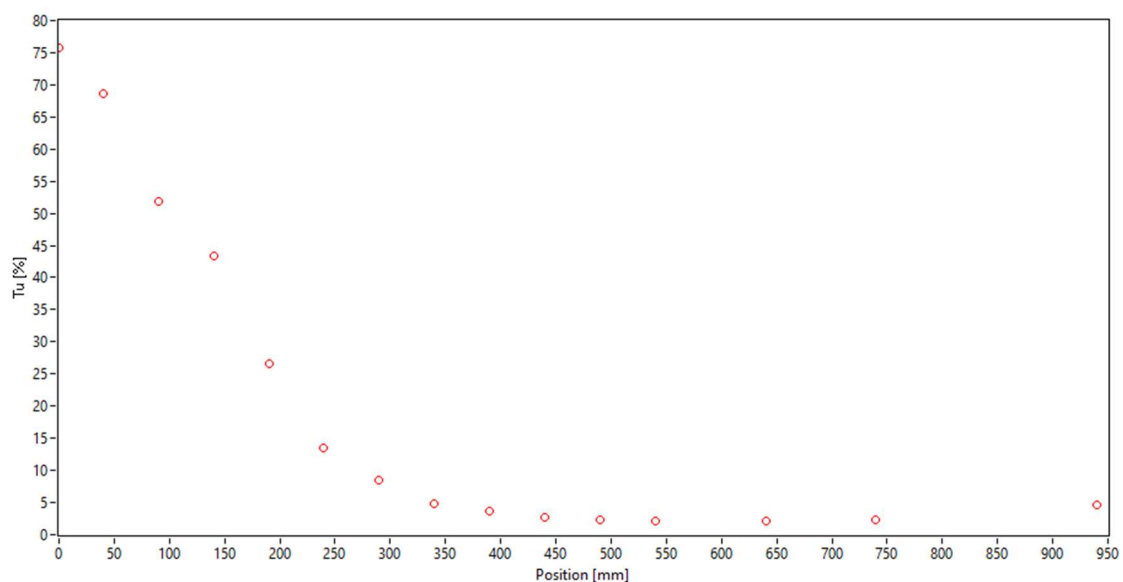


Figura 5.6 Entità delle fluttuazioni % ,  $V_{inf} = 15$  m/s,  $z=270$  mm

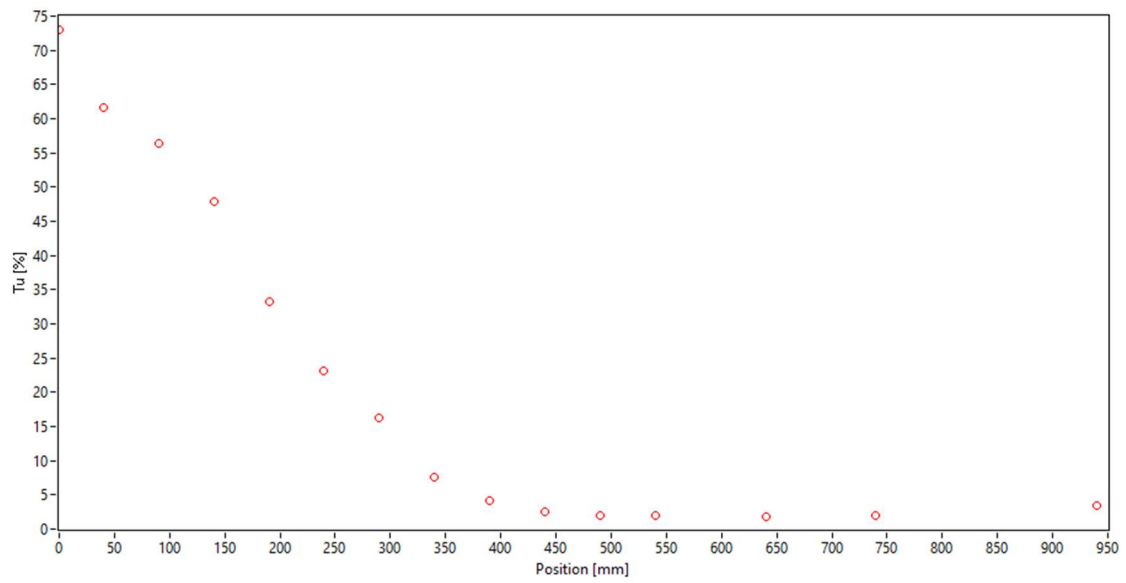


Figura 5.7 Entità delle fluttuazioni % ,  $V_{inf} = 15 \text{ m/s}$ ,  $z=470 \text{ mm}$

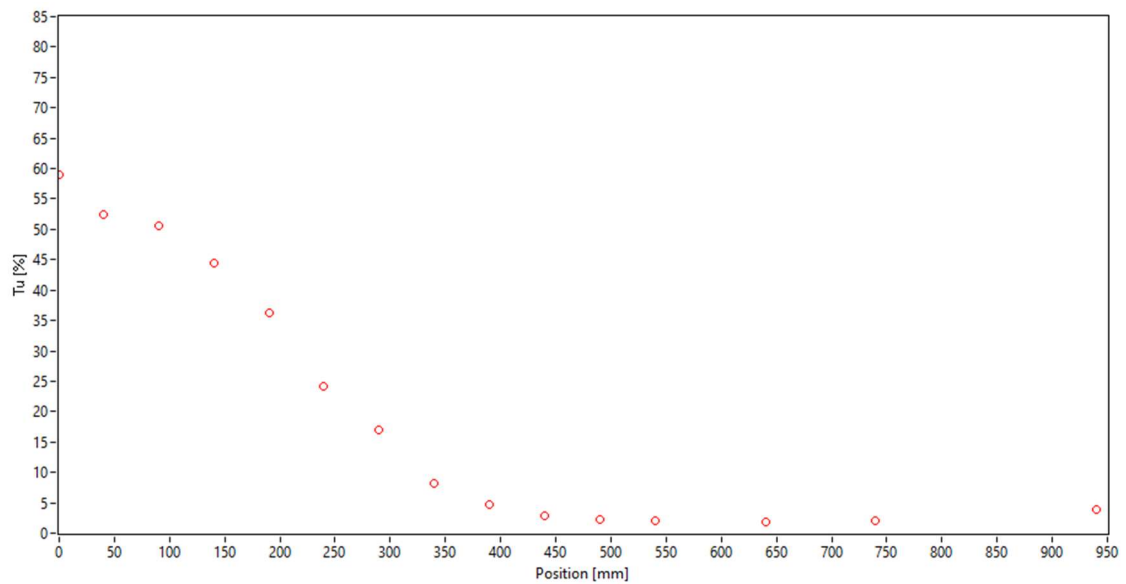


Figura 5.8 Entità delle fluttuazioni % ,  $V_{inf} = 15 \text{ m/s}$ ,  $z=670 \text{ mm}$

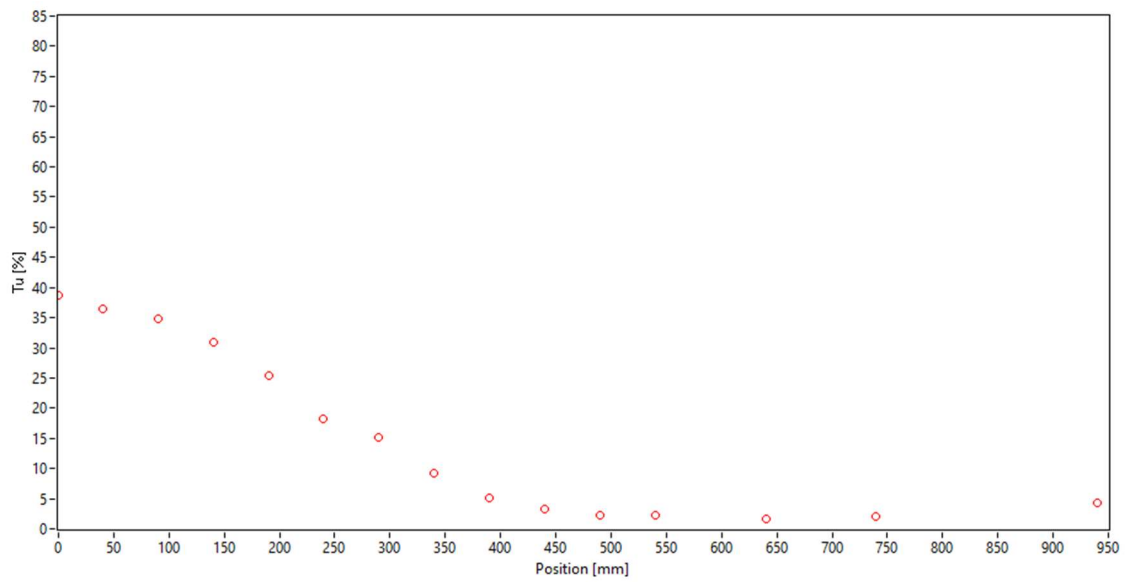


Figura 5.9 Entità delle fluttuazioni % ,  $V_{inf} = 15$  m/s,  $z=870$  mm

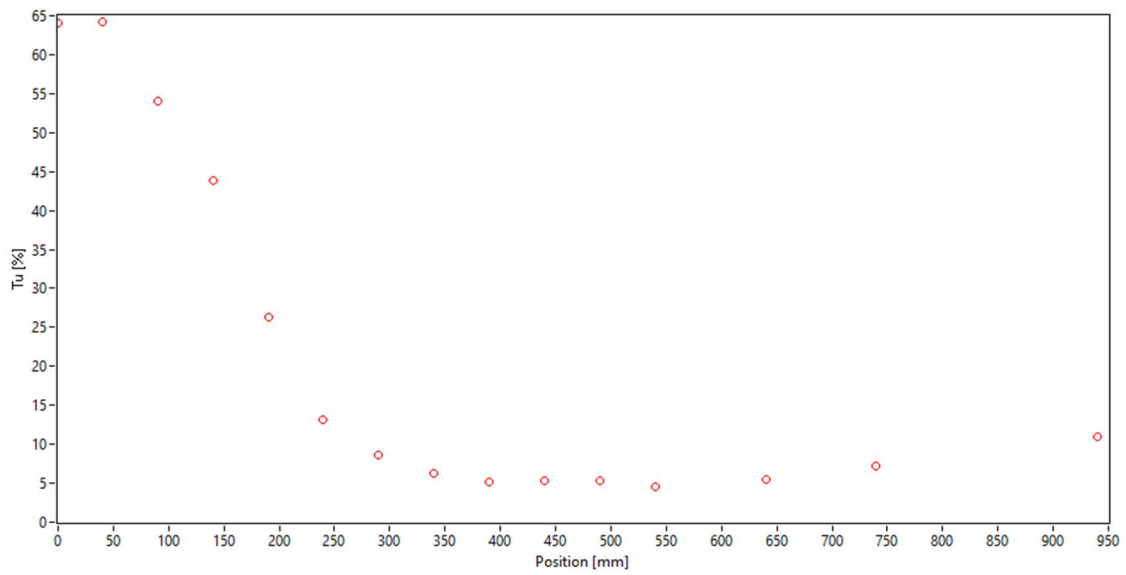


Figura 5.10 Entità delle fluttuazioni % ,  $V_{inf} = 33$  m/s,  $z=270$  mm



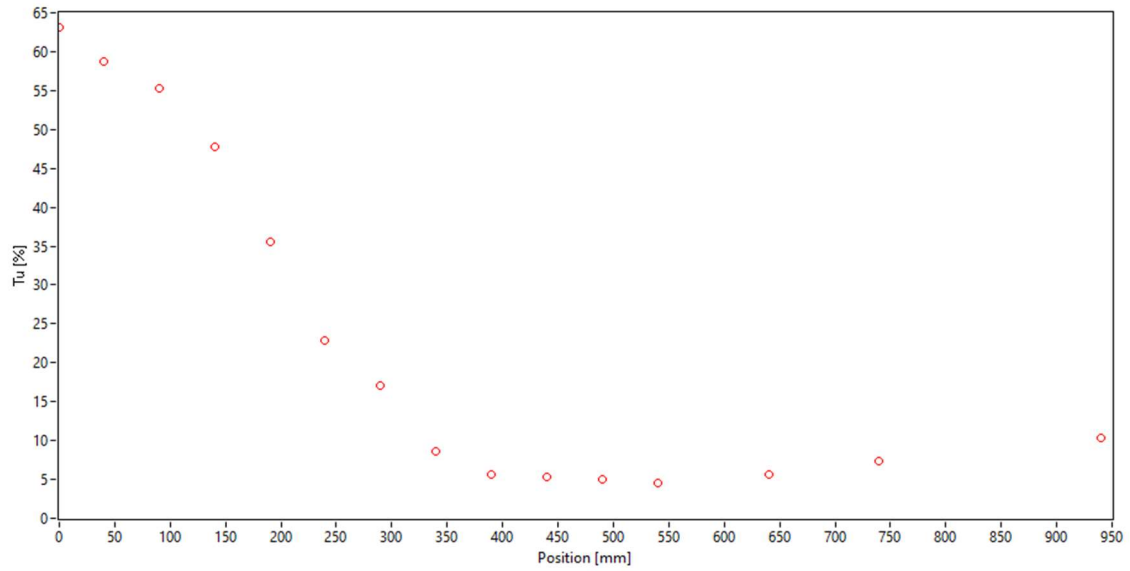


Figura 5.11 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf}= 33$  m/s,  $z=470$  mm

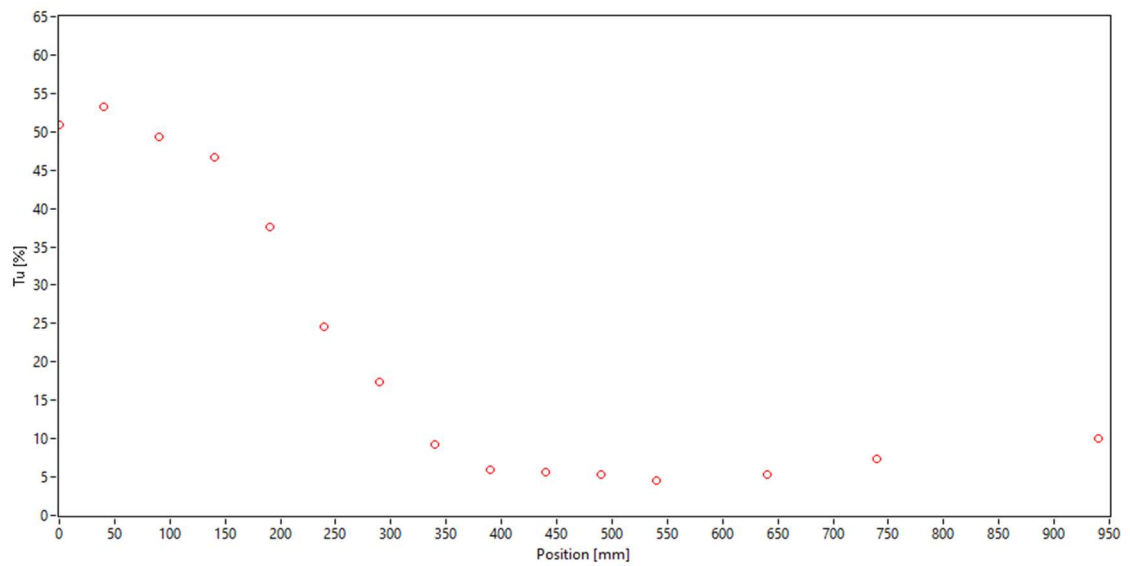


Figura 5.12 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf}= 33$  m/s,  $z=670$  mm

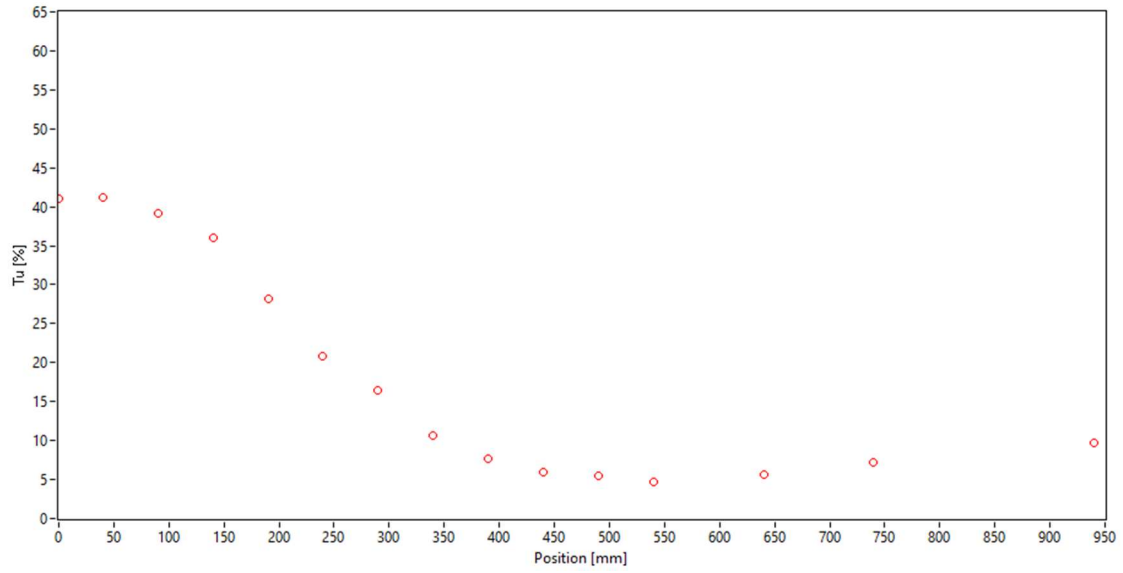


Figura 5.13 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf}= 33$  m/s,  $z=870$  mm

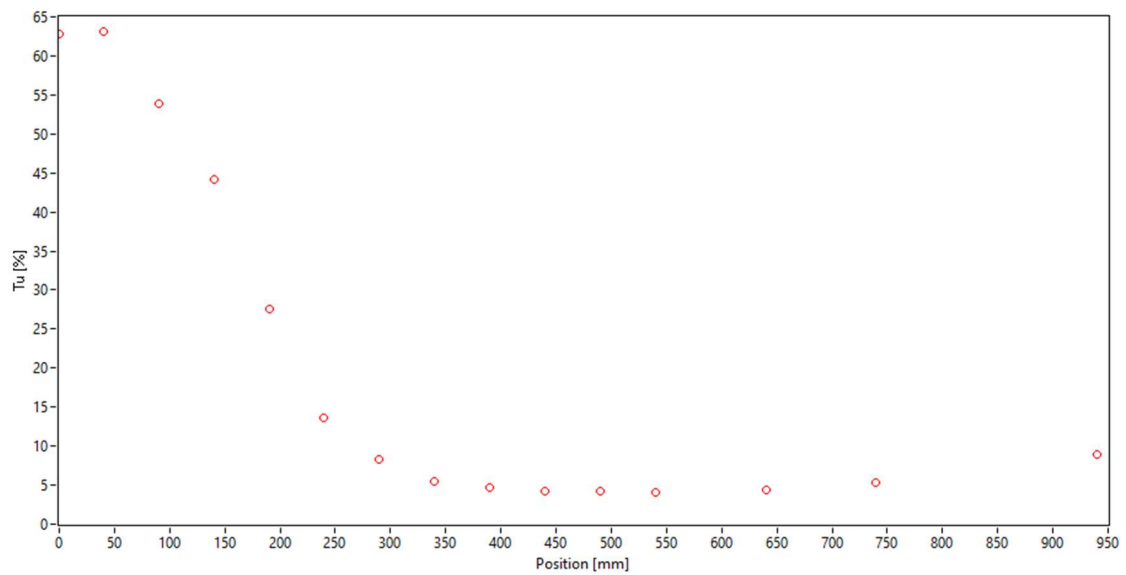


Figura 5.14 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf}= 45$  m/s,  $z=270$  mm

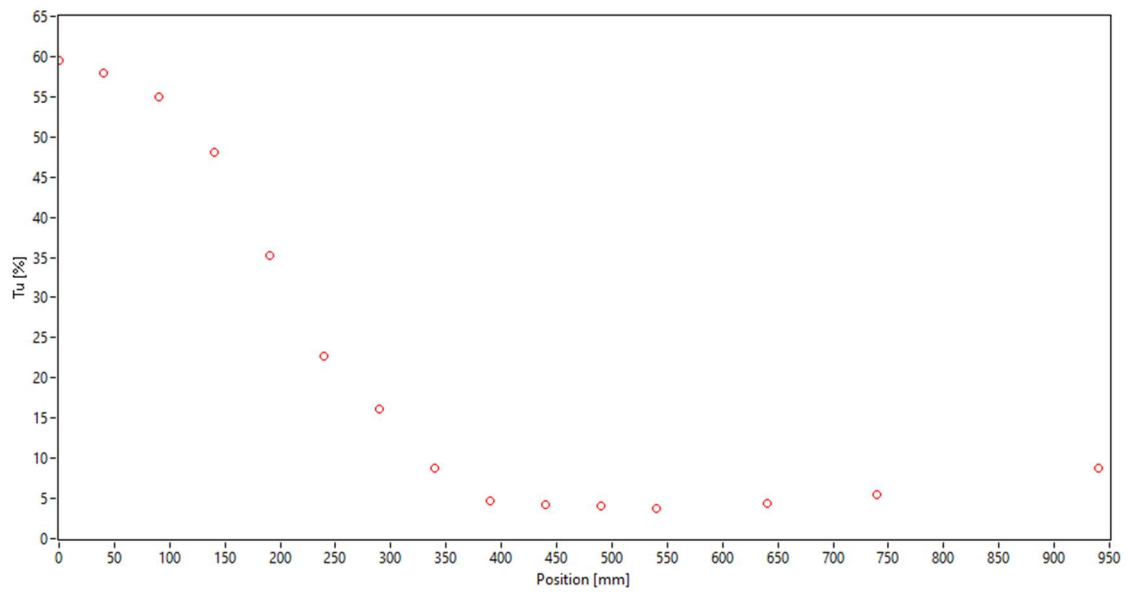


Figura 5.15 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf} = 45$  m/s,  $z = 470$  mm

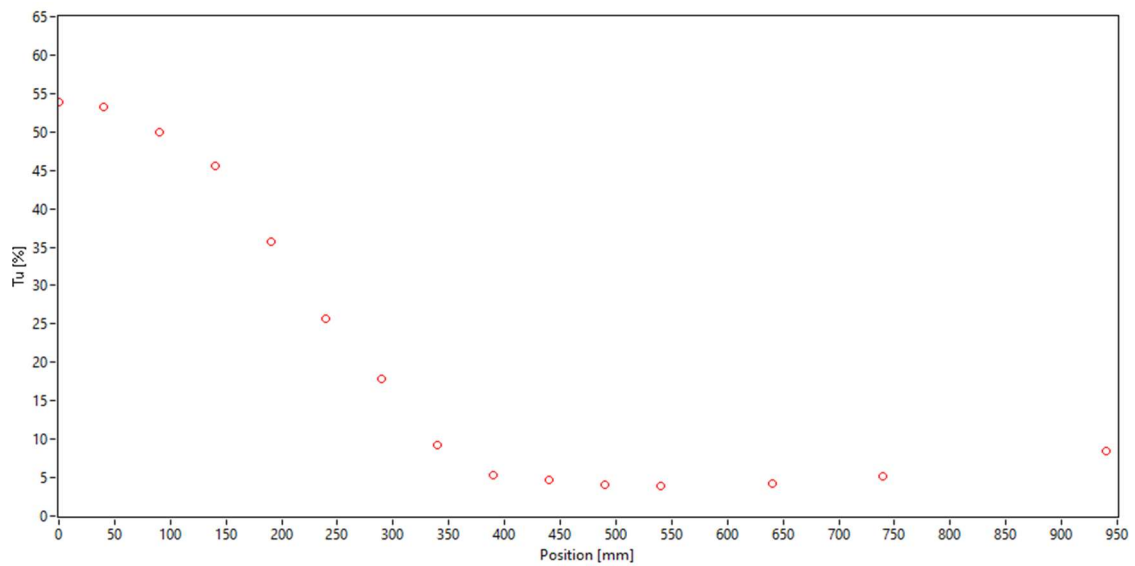


Figura 5.16 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf} = 45$  m/s,  $z = 670$  mm

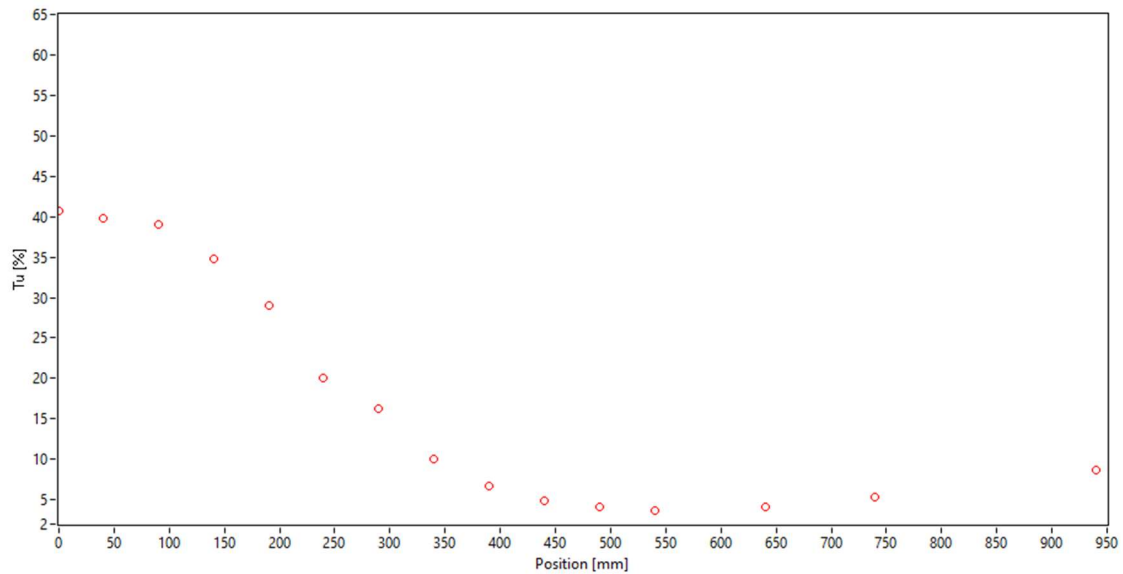


Figura 5.17 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf} = 45$  m/s,  $z = 870$  mm

La prima cosa che si nota dai grafici in configurazione “Moto+RC” paragonati a quelli con camera di prova vuota, è il netto cambio di forma dell’andamento delle fluttuazioni di velocità. Macroscopicamente si può identificare l’andamento generale simile alla forma della moto, ovvero più la sonda di Pitot si trova a valle in corrispondenza della moto vicino alla posizione  $y=0$  mm, più rileverà fluttuazioni di pressione importanti. Man mano che ci si sposta lungo  $z$ - (allontanandosi da terra, in sequenza da *figura 5.14* a *5.17*), il flusso diventa più pulito e la turbolenza diminuisce, dovuto al fatto che sulla parte superiore della moto non ci sono superfici con forme che possano creare distacchi della vena fluida burrascosi e quindi ci si avvicina alla chiusura della scia. Ulteriori considerazioni si possono fare sulla coordinata  $y$ : per  $y > 490$  mm, il flusso risente solo in minima parte della presenza

della moto, come si vede dalla percentuale di turbolenza che si aggira intorno al 2/3%. Inoltre, discretizzando lungo l'asse y ogni 50 mm, si notano salti di turbolenza importanti tra una posizione e la successiva, dell'ordine di 15 punti percentuali, in particolar modo ad una distanza da terra  $z=270$  mm (figura 5.14). Ciò denota il fatto che la zona sia molto turbolenta e che, spostandosi anche solo di pochi millimetri, la differenza di valori sia rilevante.

A fronte di quest'ultima considerazione, si è deciso di infittire la discretizzazione della sezione di scia per poter colmare quei vuoti dovuti ai salti di turbolenza tra una coordinata y e l'altra, potendo così mappare in maniera più fitta la scia di interesse.

### 5.3 Moto+Ma+RC (manichino+radiatore chiuso)

Il passo successivo è stato quello dell'inserimento del manichino, così da rendere la configurazione più aderente alla realtà, mantenendo il radiatore chiuso.

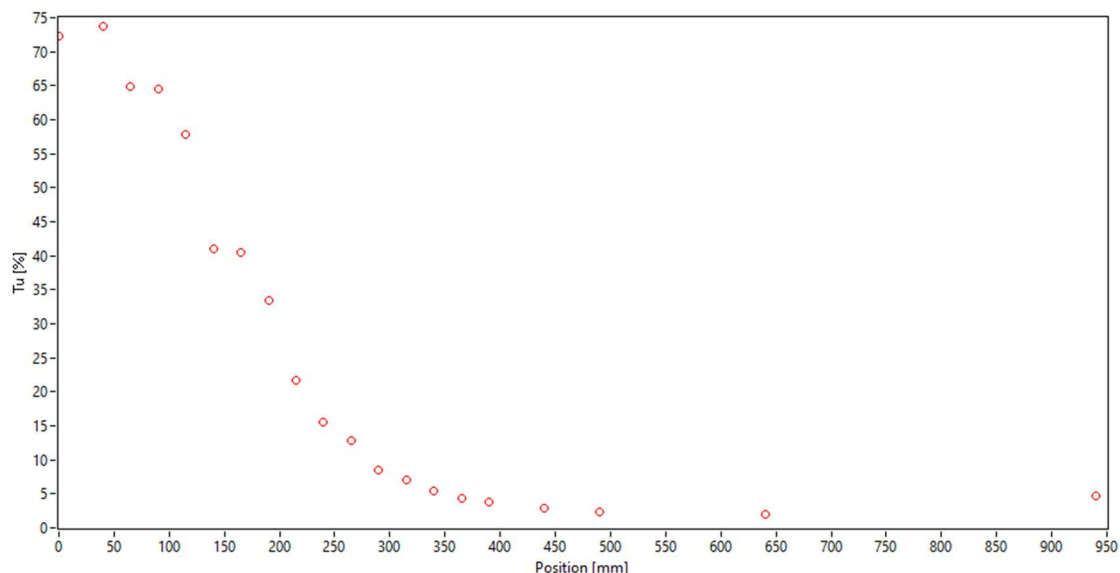


Figura 5.18 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf}=15$  m/s,  $z=270$  mm

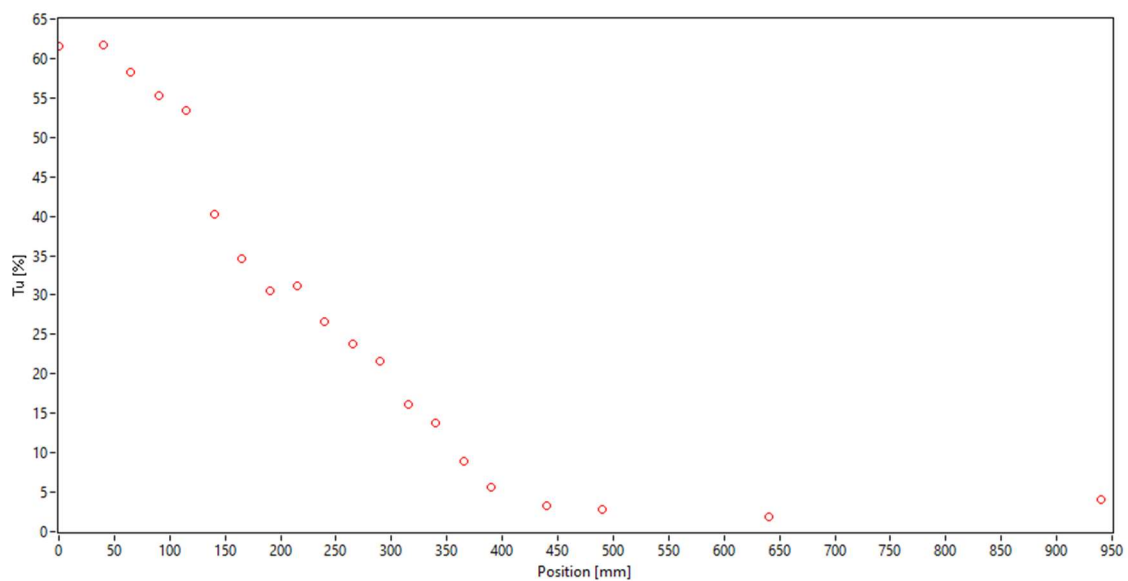


Figura 5.19 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf} = 15$  m/s,  $z=470$  mm

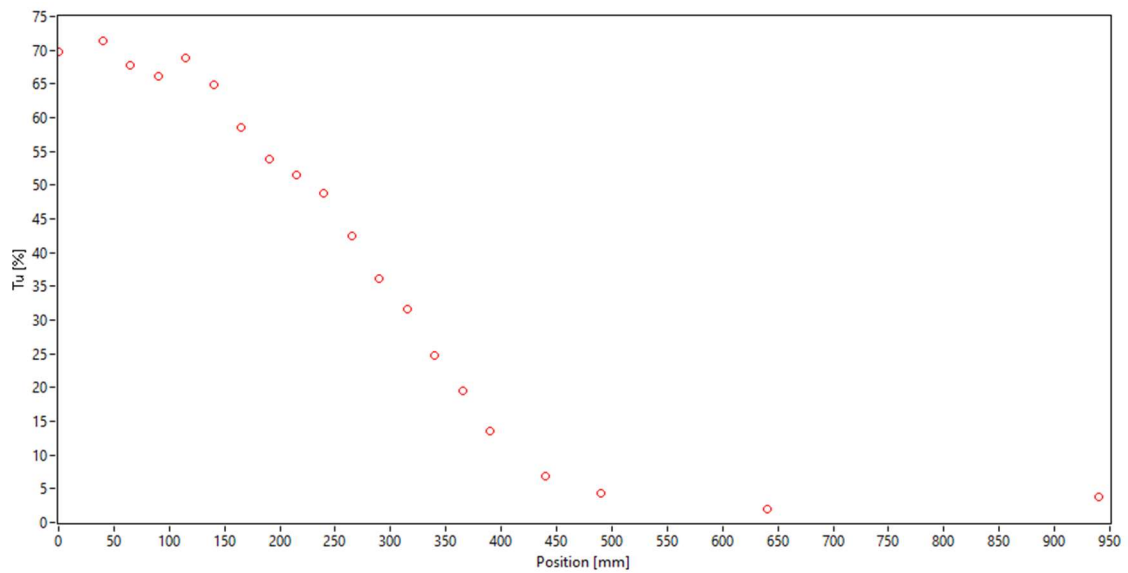


Figura 5.20 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf} = 15$  m/s,  $z=670$  mm

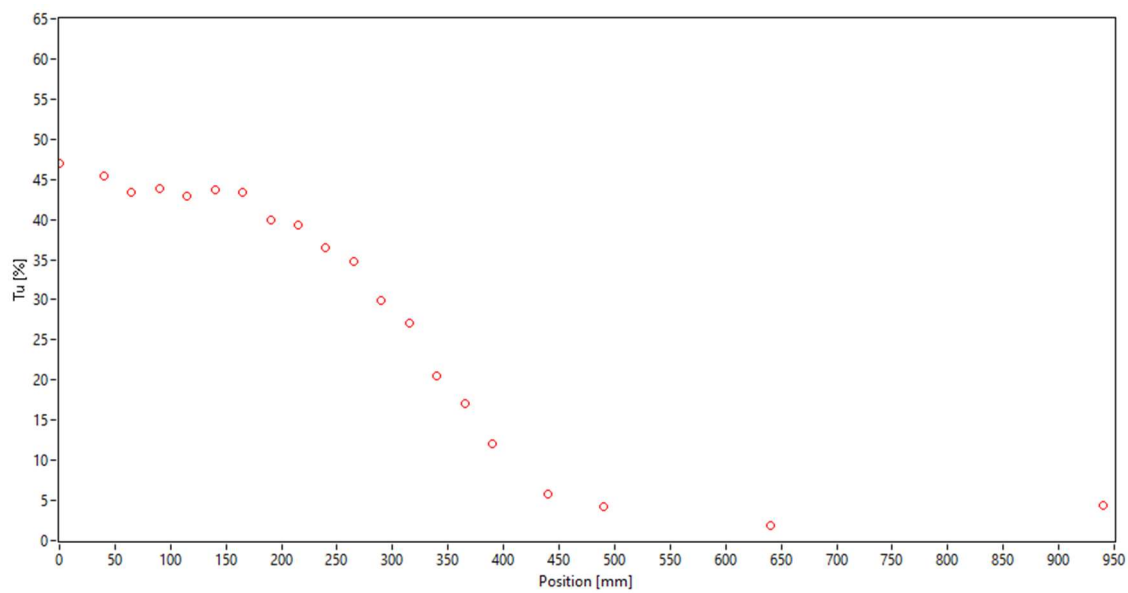


Figura 5.21 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf}= 15$  m/s,  $z=870$  mm

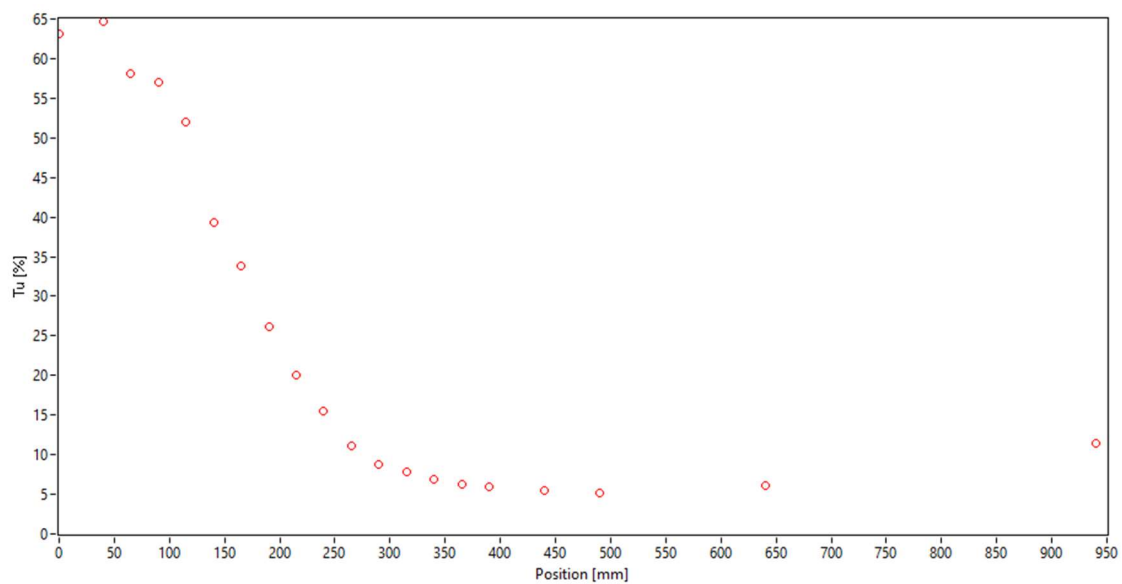


Figura 5.22 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf}= 33$  m/s,  $z=270$  mm

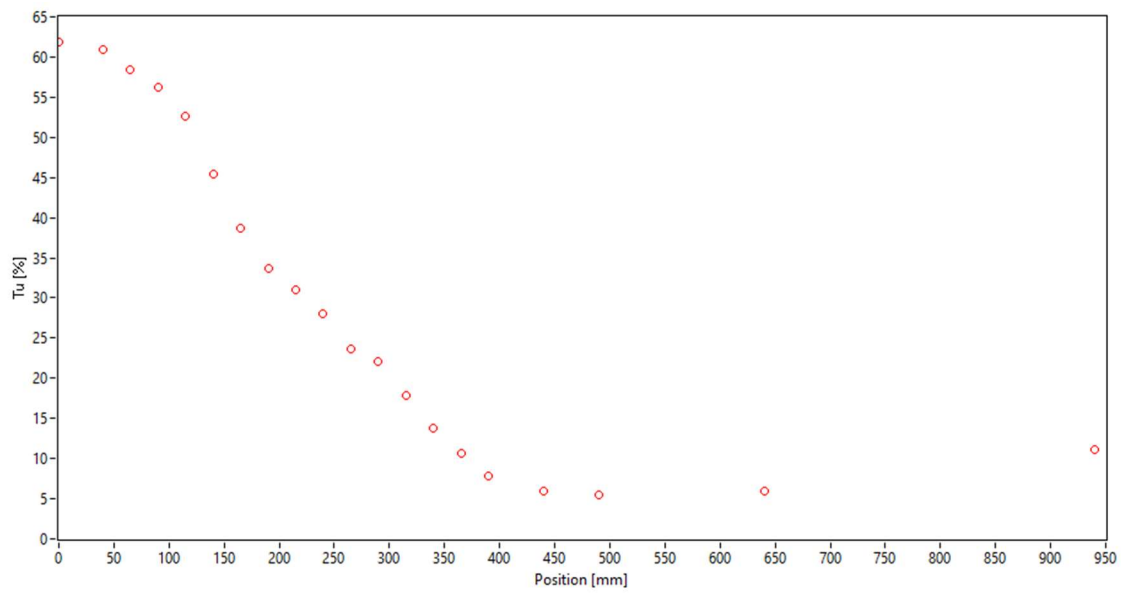


Figura 5.23 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf} = 33$  m/s,  $z=470$  mm

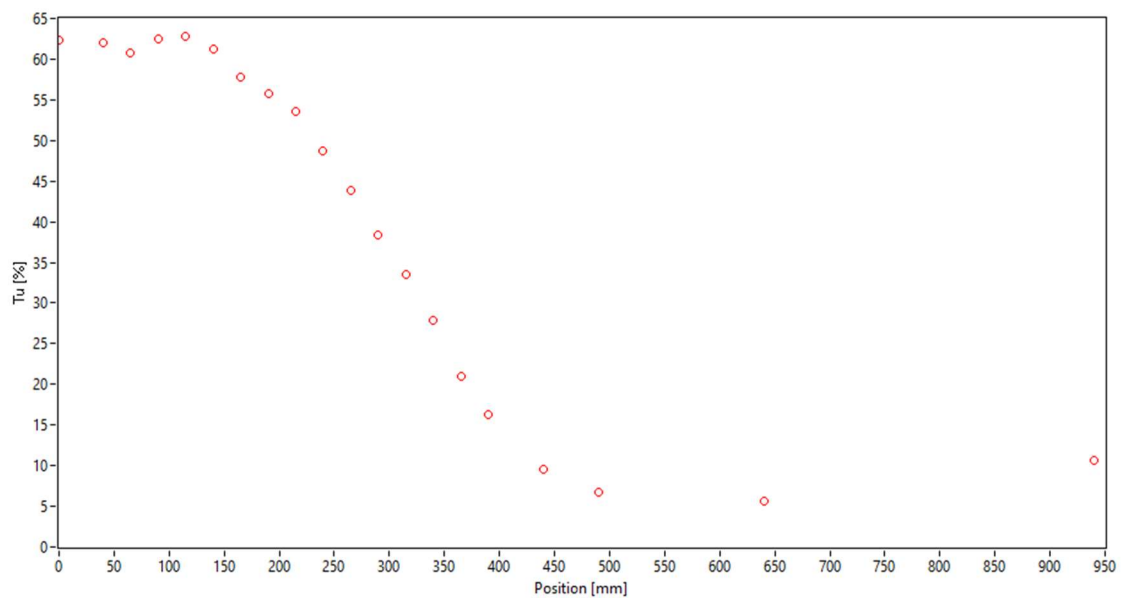


Figura 5.24 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf} = 33$  m/s,  $z=670$  mm



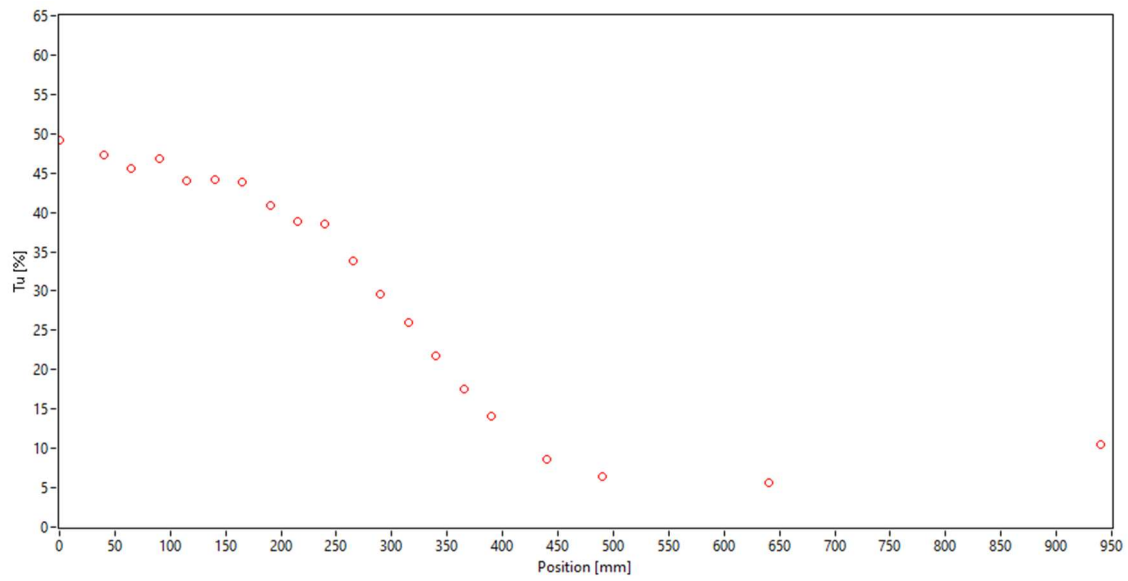


Figura 5.25 Entità delle fluttuazioni % ,  $V_{inf} = 33$  m/s,  $z = 870$  mm

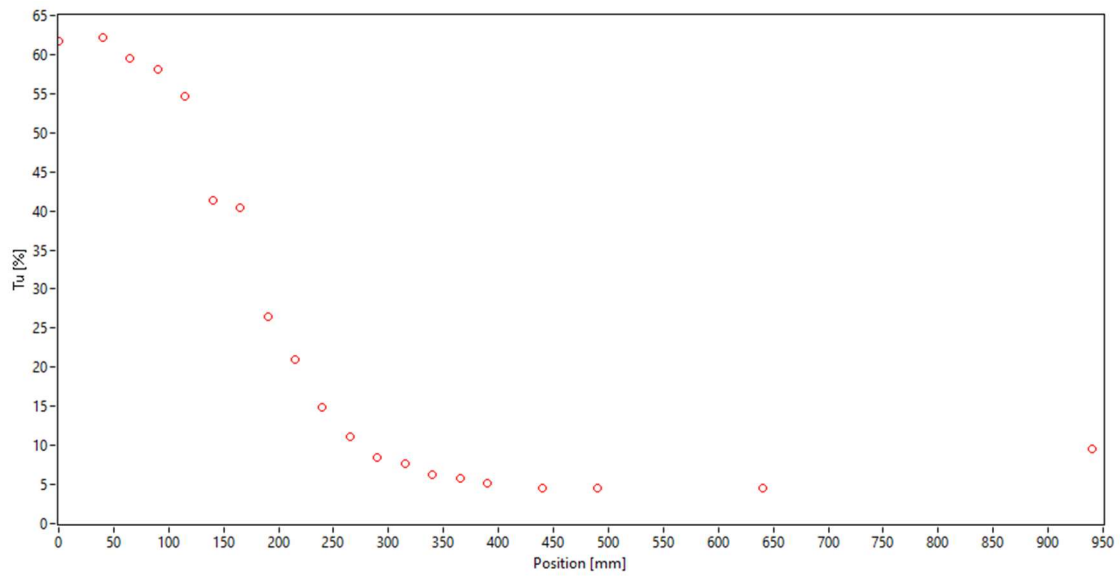


Figura 5.26 Entità delle fluttuazioni % ,  $V_{inf} = 45$  m/s,  $z = 270$  mm

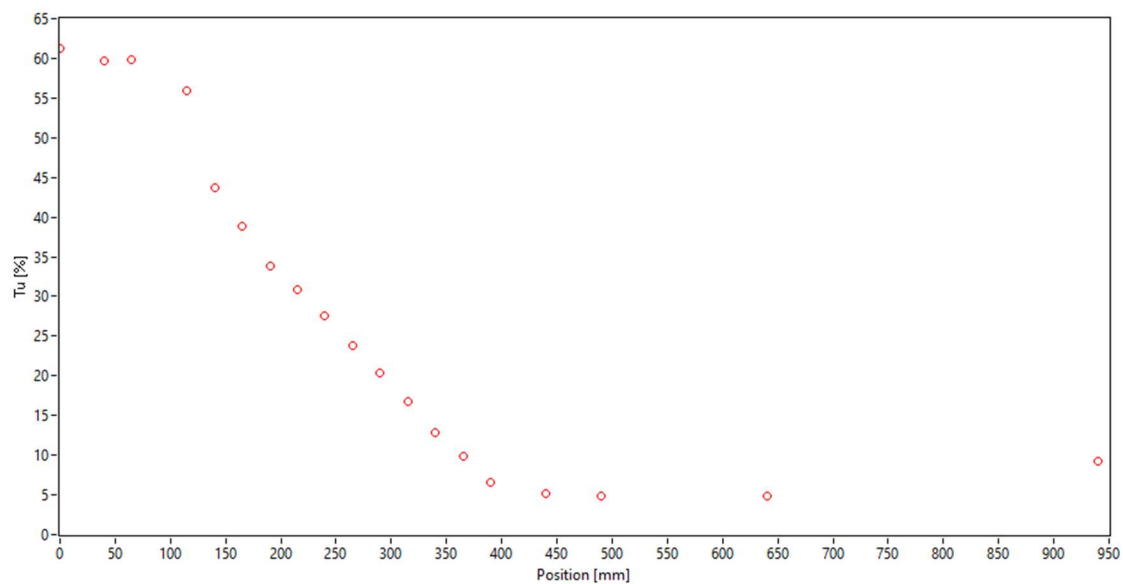


Figura 5.27 Entità delle fluttuazioni % ,  $V_{inf} = 45$  m/s,  $z = 470$  mm

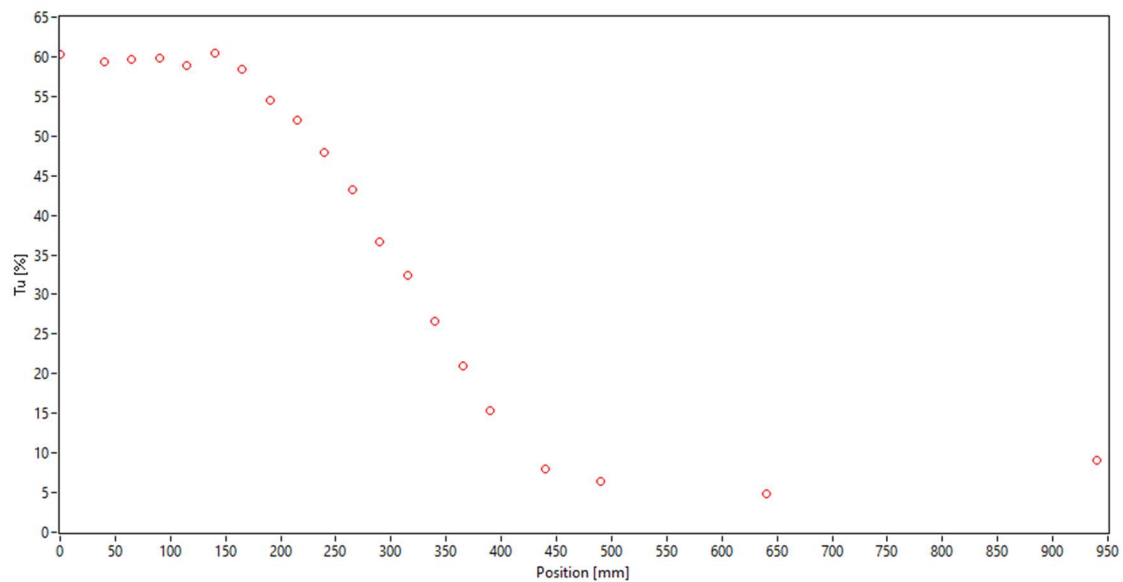


Figura 5.28 Entità delle fluttuazioni % ,  $V_{inf} = 45$  m/s,  $z = 670$  mm

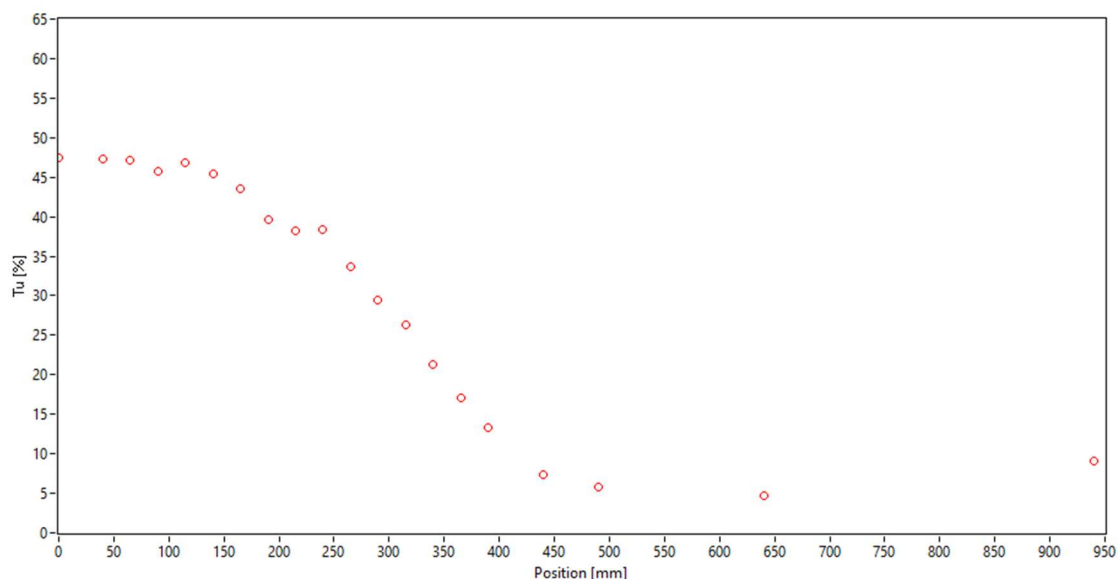


Figura 5.29 Entità delle fluttuazioni % ,  $V_{inf} = 45 \text{ m/s}$ ,  $z = 870 \text{ mm}$

Dalla modalità “moto + manichino + radiatore chiuso” in poi, la discretizzazione è stata fatta più fitta nella zona di scia della moto dove i salti di turbolenza tra un punto e l’altro sono risultati maggiori. Quindi le misure sono state prese lungo l’asse  $y$  con  $\Delta y = 25 \text{ mm}$  invece che  $\Delta y = 50 \text{ mm}$  come era nelle configurazioni precedenti.

Quello che si nota è che la zona di turbolenza appare più estesa lungo  $y$ , soprattutto a valori di  $z = 670 \text{ mm}$  e  $z = 870 \text{ mm}$ , dovuta alla posizione del manichino che con braccia e gambe aumenta la superficie frontale su cui impatta il flusso. Questo risultato mette da subito in mostra di quanto la posizione del pilota in carena faccia la differenza in termini di scia e di conseguenza, come vedremo in seguito, di coefficiente di resistenza.

Al tempo stesso, anche in questa configurazione, la turbolenza diminuisce all'aumentare della distanza da terra lungo l'asse z per lo stesso motivo sopra descritto. Altra caratteristica ricorrente rispetto alla precedente configurazione, per  $y > 490$  mm si notano gli stessi valori dei grafici precedentemente elaborati, all'incirca fluttuazioni di velocità percentuali inferiori al 5%. Questo sta ad indicare che la posizione del manichino non ha più grossa influenza sul flusso a valle.

## 5.4 Moto+Ma+RA (radiatore aperto)

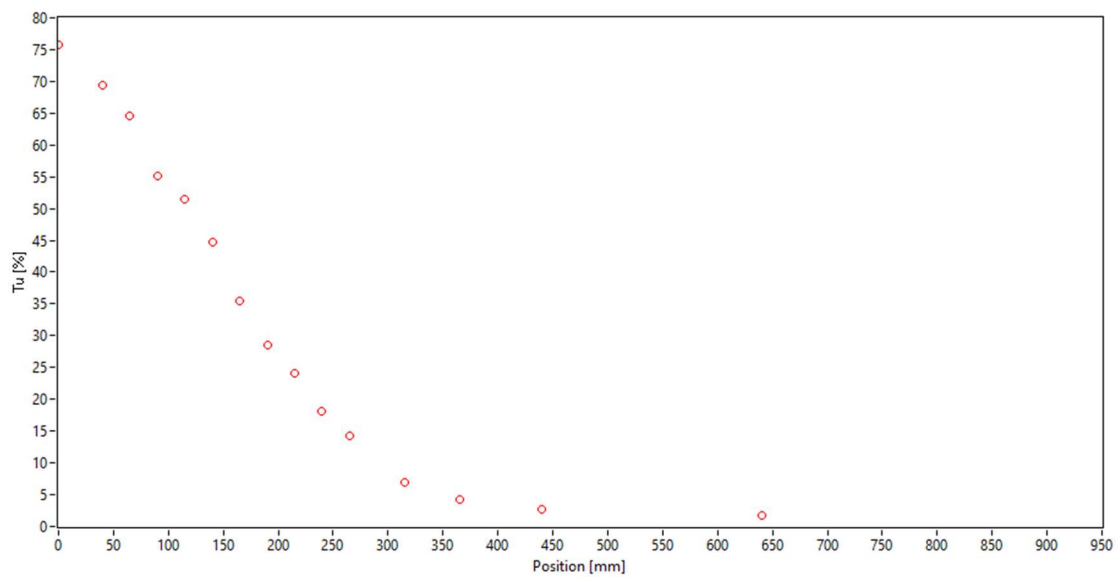


Figura 5.30 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf} = 15$  m/s,  $z = 270$  mm

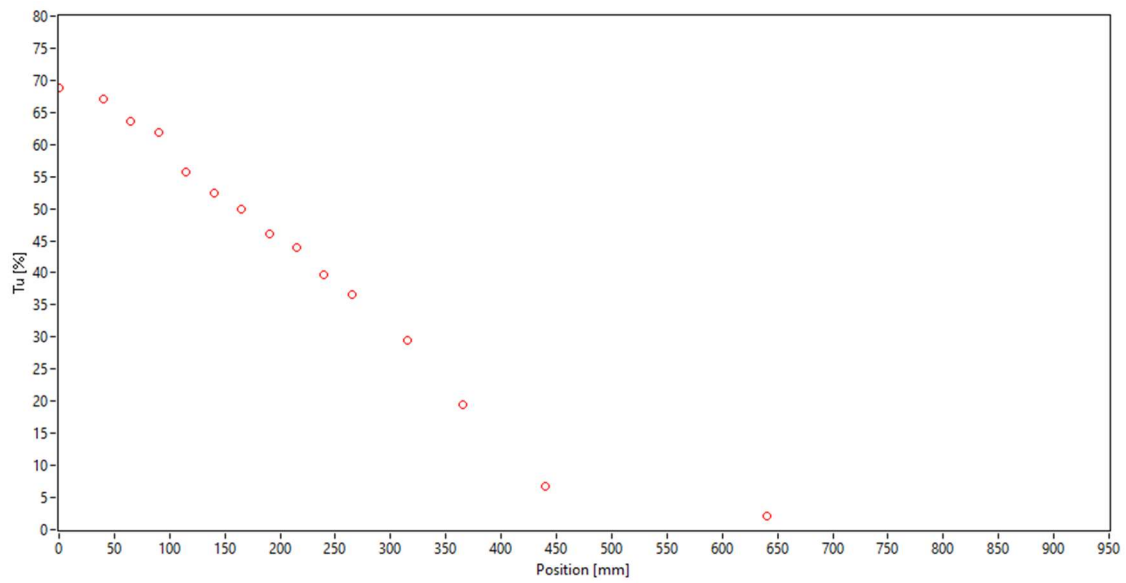


Figura 5.31 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf}= 15$  m/s,  $z=470$  mm

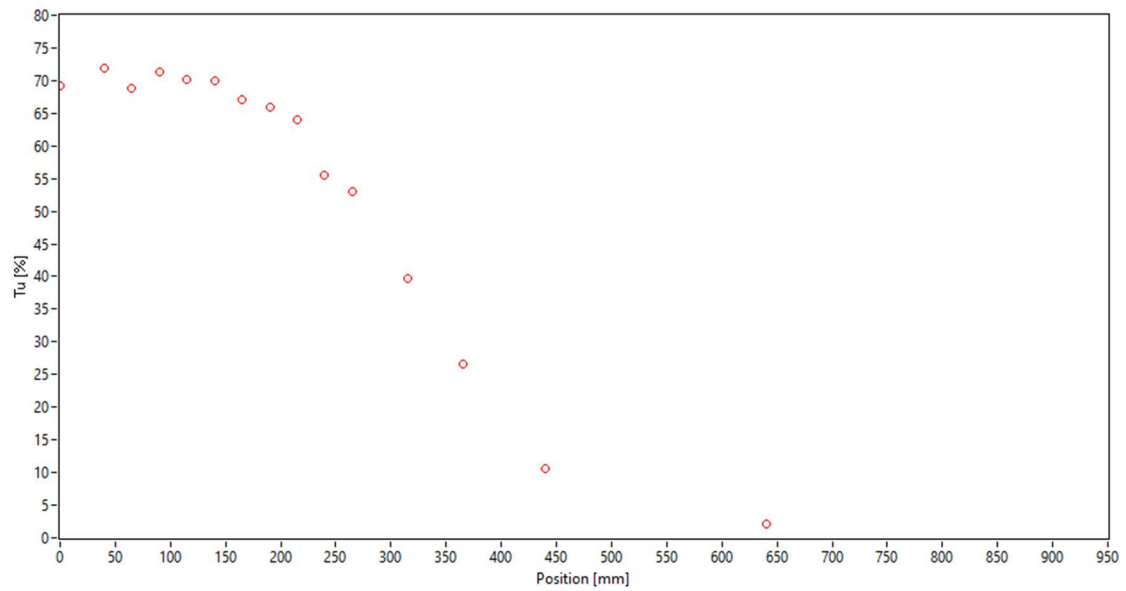


Figura 5.32 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf}= 15$  m/s,  $z=670$  mm

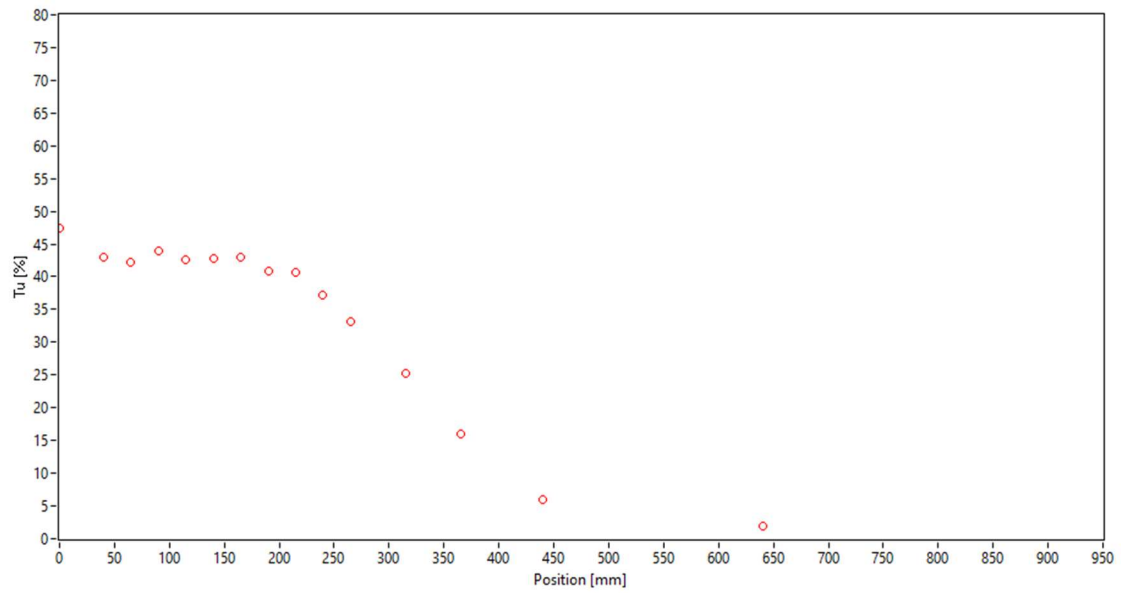


Figura 5.33 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf}= 15$  m/s,  $z=870$  mm

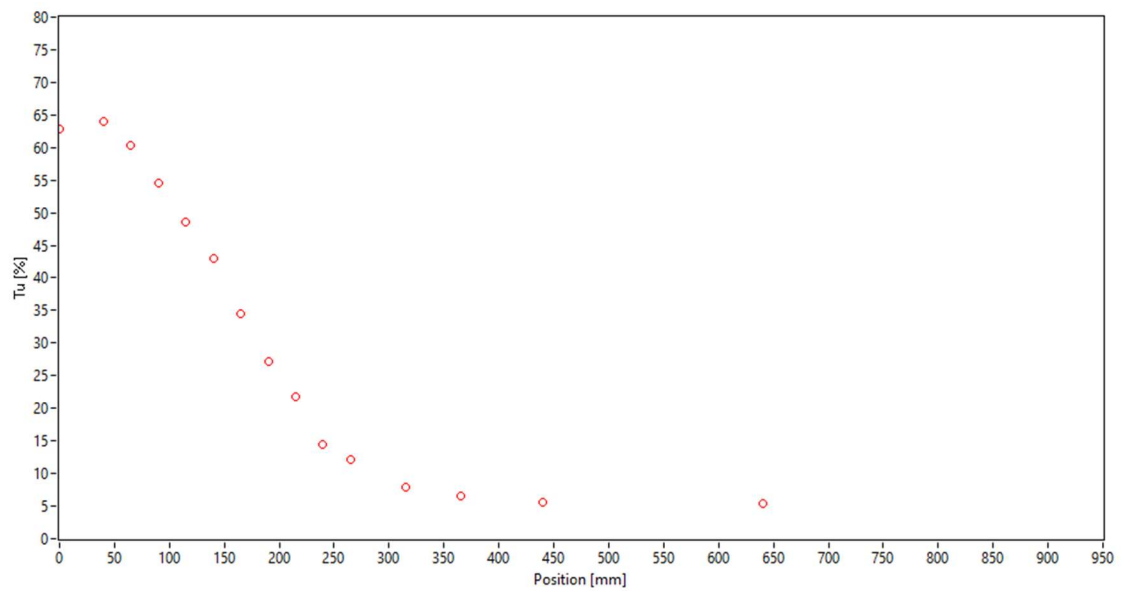


Figura 5.34 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf}= 33$  m/s,  $z=270$  mm

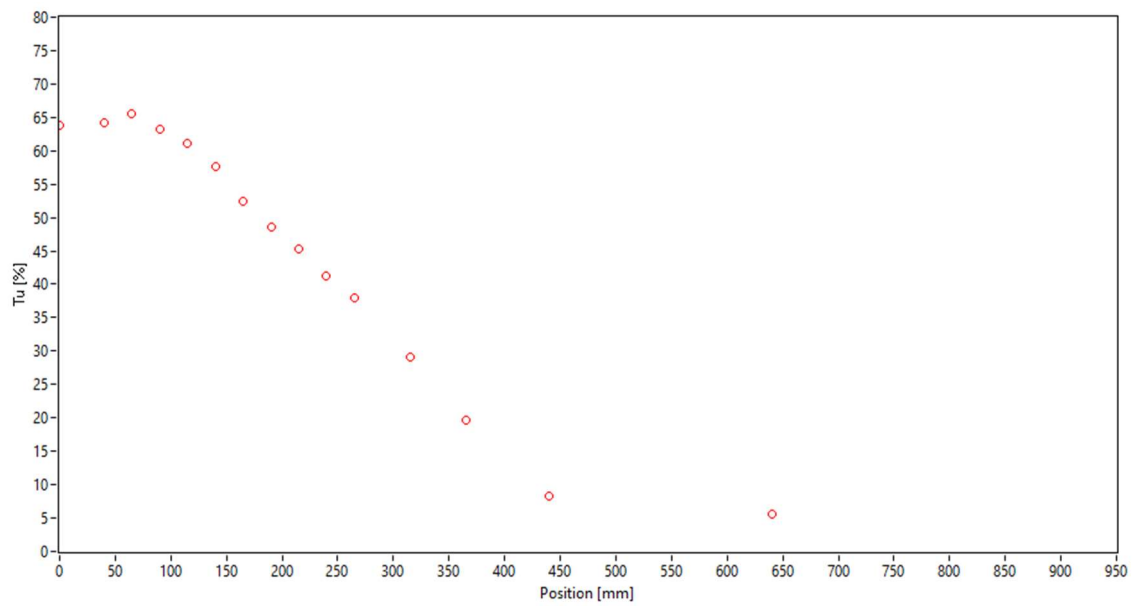


Figura 5.35 Entità delle fluttuazioni % ,  $V_{inf} = 33$  m/s,  $z = 470$  mm

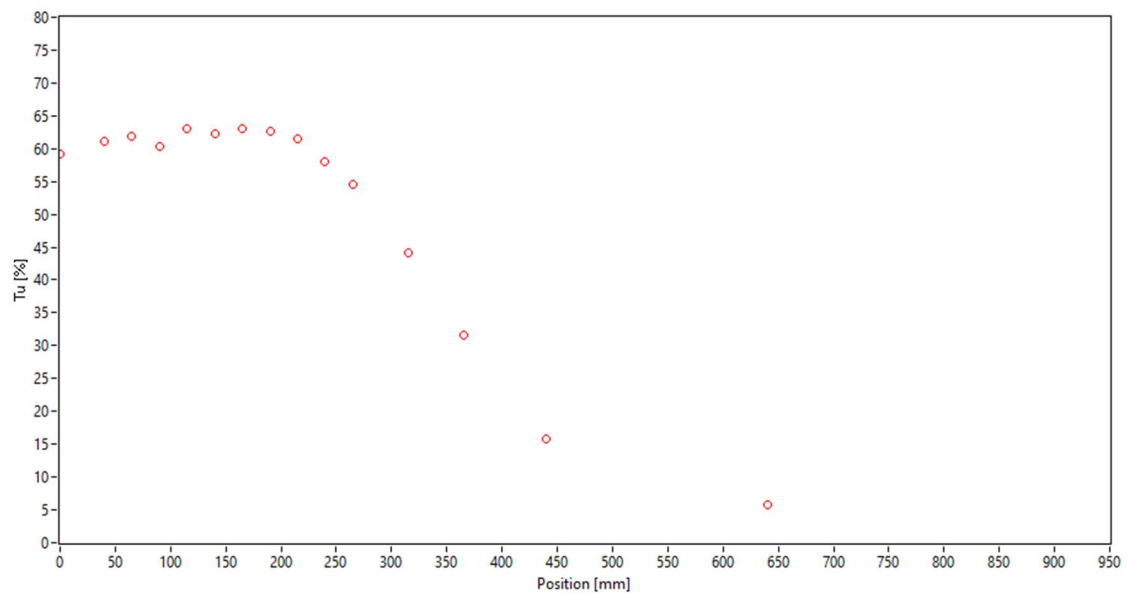


Figura 5.36 Entità delle fluttuazioni % ,  $V_{inf} = 33$  m/s,  $z = 670$  mm

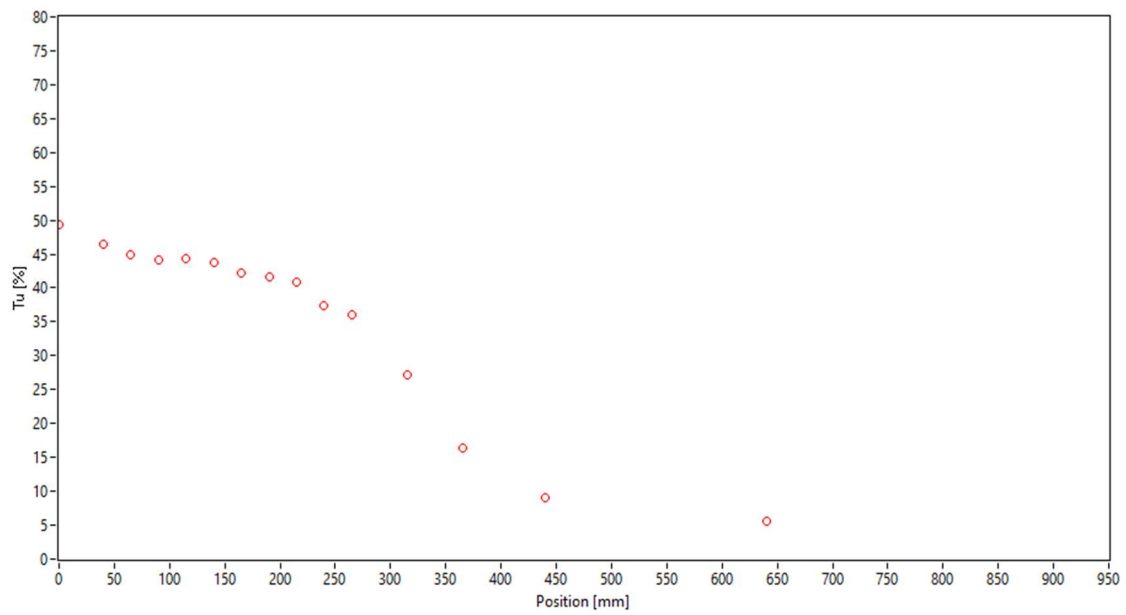


Figura 5.37 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf}= 33$  m/s,  $z=870$  mm

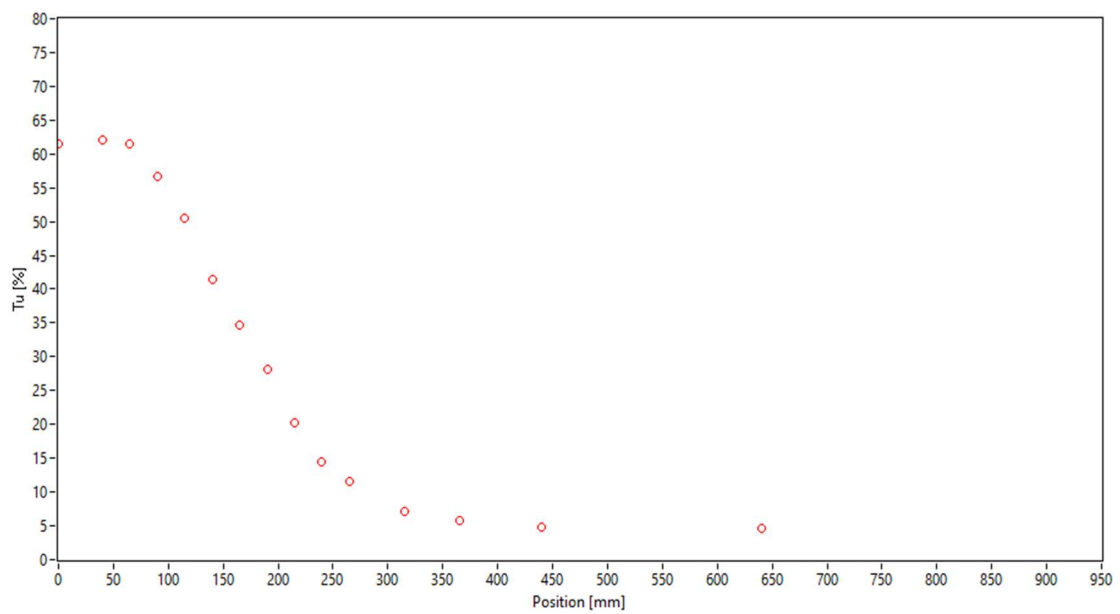


Figura 5.38 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf}= 45$  m/s,  $z=270$  mm



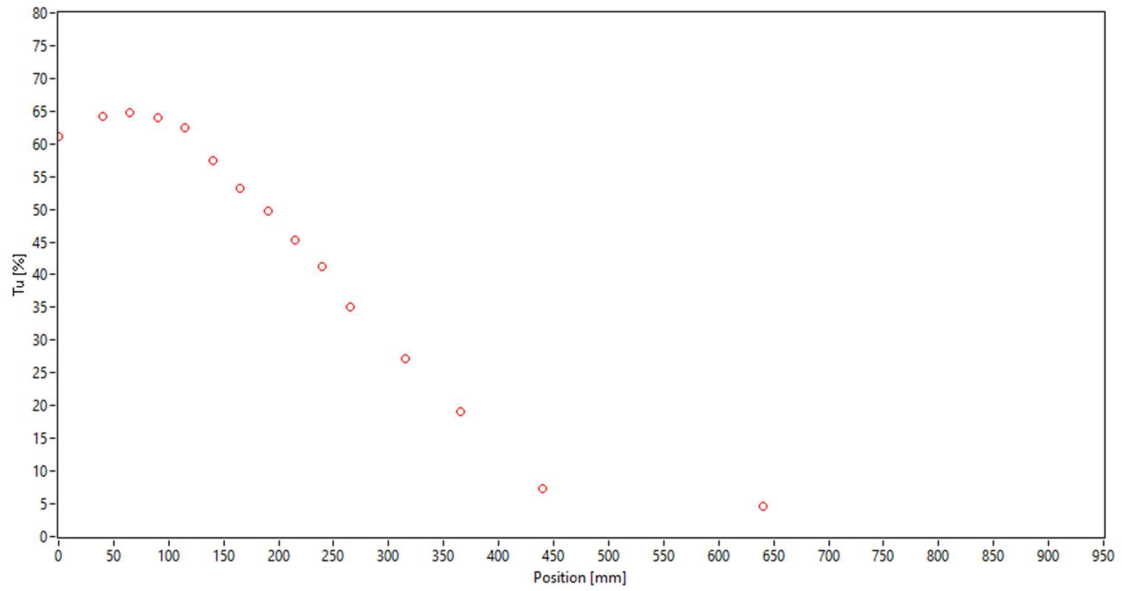


Figura 5.39 Entità delle fluttuazioni % ,  $V_{inf} = 45$  m/s,  $z = 470$  mm

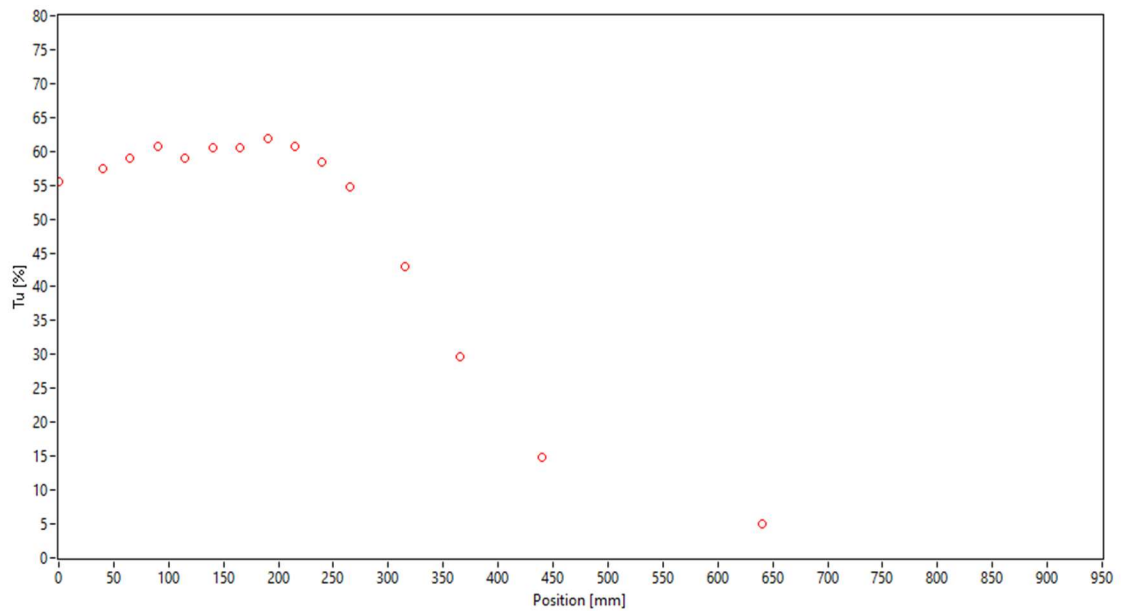


Figura 5.40 Entità delle fluttuazioni % ,  $V_{inf} = 45$  m/s,  $z = 670$  mm

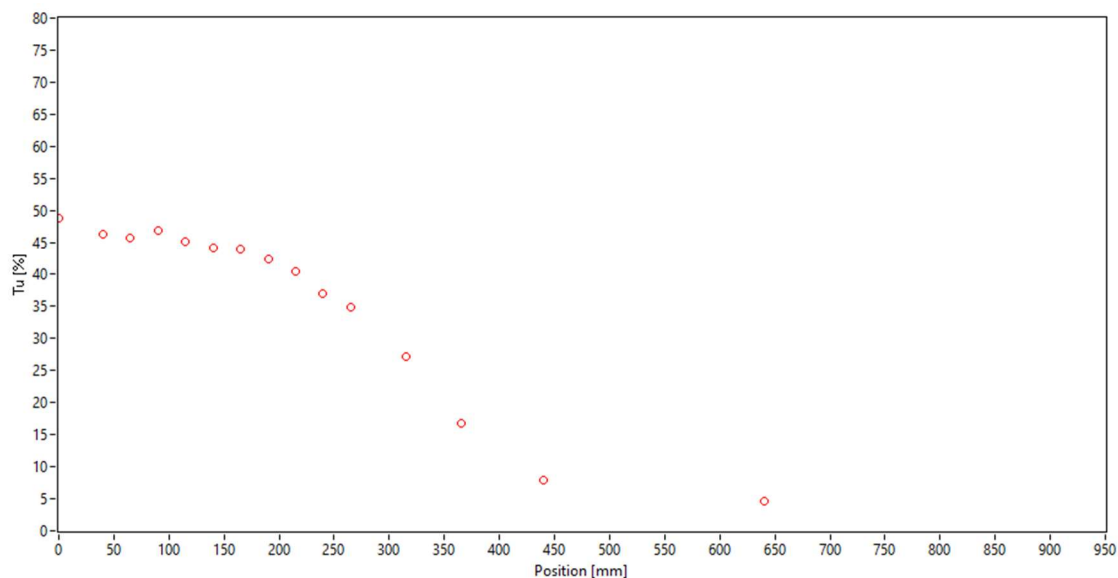


Figura 5.41 Entità delle fluttuazioni % ,  $V_{inf}= 45$  m/s,  $z=870$  mm

L'apertura del radiatore ha messo in luce quello che in parte ci si aspettava, ma di cui si voleva ottenere un risultato numerico più dettagliato. Di fatto, il livello di turbolenza subito dietro la moto, quindi a  $0 < y < 150$ , si è innalzato di un 5% rispetto alla configurazione a radiatore chiuso. L'aerodinamica interna ha quindi un impatto rilevante sulla scia in termini di aumento di fluttuazioni turbolente.

La seconda conseguenza di questa modifica è l'ampliamento lungo  $y$  della zona di turbolenza (*figure 5.39 e 5.40*). Si notano, infatti, circa 50 mm di differenza tra lo stesso valore di turbolenza nelle due configurazioni a radiatore chiuso e aperto. Basti vedere la conformazione esterna della moto, che presenta due deflettori di aria sulla "pance" laterali per convogliare il flusso esternamente ed evitare il completo passaggio interno dello stesso (*figura 5.42*). Questi deflettori si trovano esattamente

in corrispondenza delle coordinate in cui si vede l'allargamento della scia turbolenta,  $z=470$  mm e  $670$  mm.

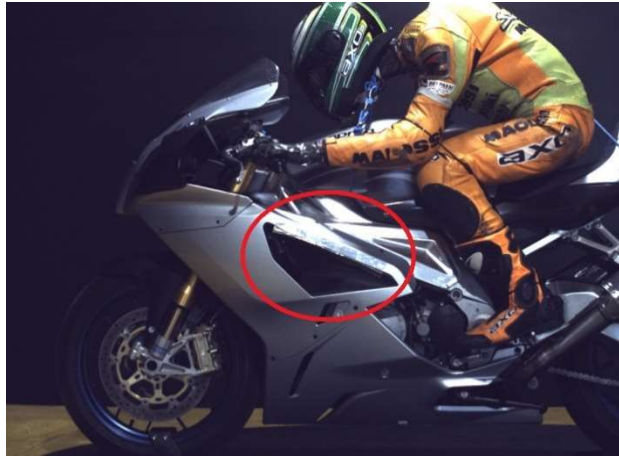


Figura 5.42 Deflettore d'aria sulle "panche" laterali della moto

## 5.5 Moto+Ma+RA+DC (deflettore chiuso)

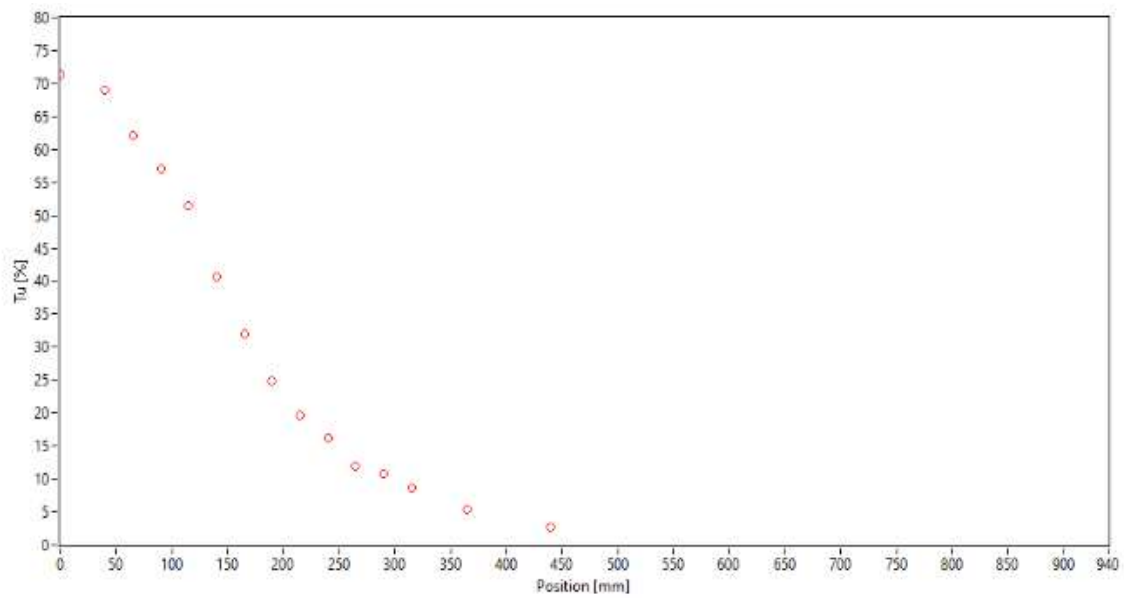


Figura 5.43 Entità delle fluttuazioni % ,  $V_{inf} = 15$  m/s,  $z=270$  mm

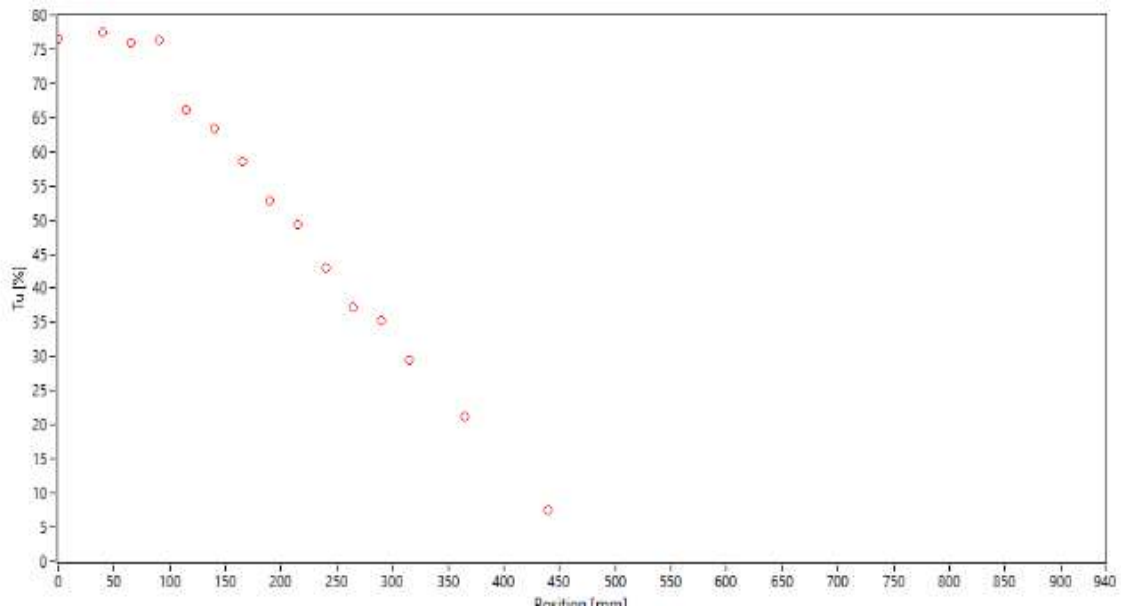


Figura 5.44 Entità delle fluttuazioni % ,  $V_{inf} = 15 \text{ m/s}$ ,  $z = 470 \text{ mm}$

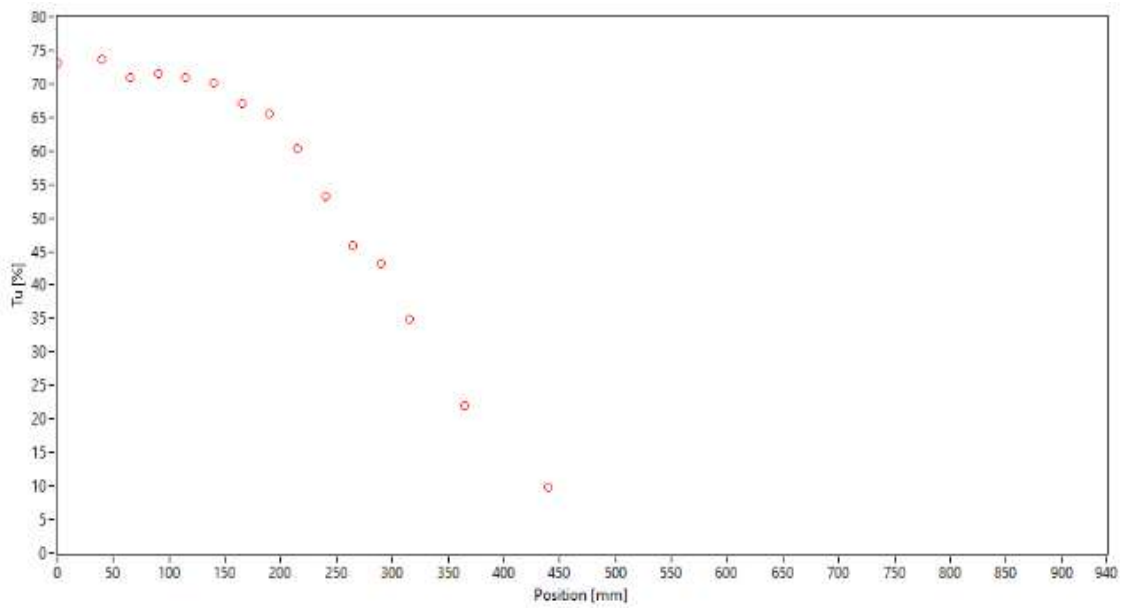


Figura 5.45 Entità delle fluttuazioni % ,  $V_{inf} = 15 \text{ m/s}$ ,  $z = 670 \text{ mm}$

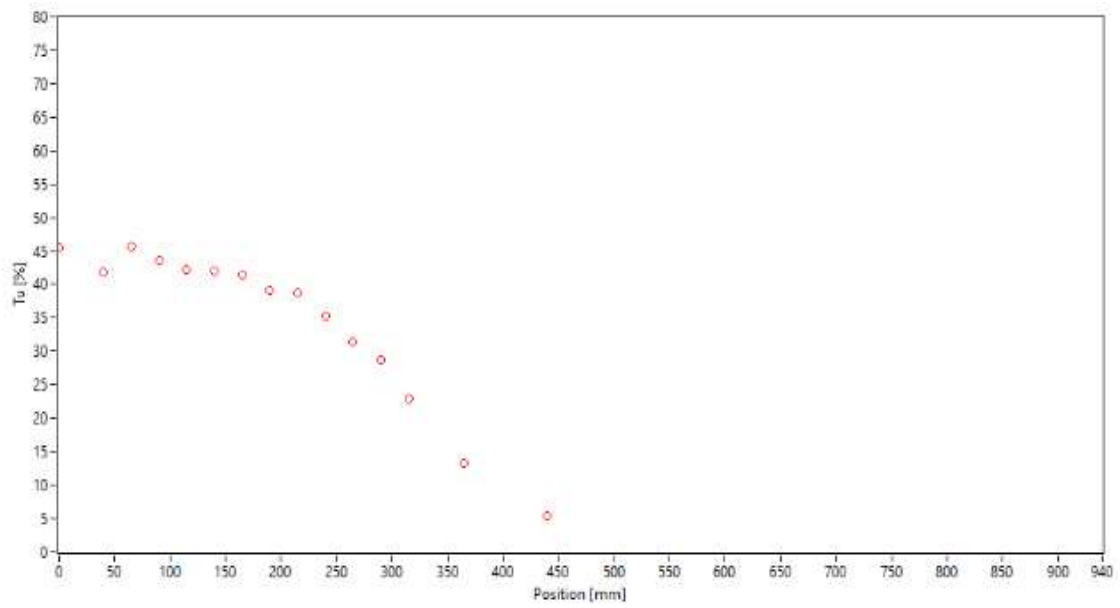


Figura 5.46 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf} = 15$  m/s,  $z = 870$  mm

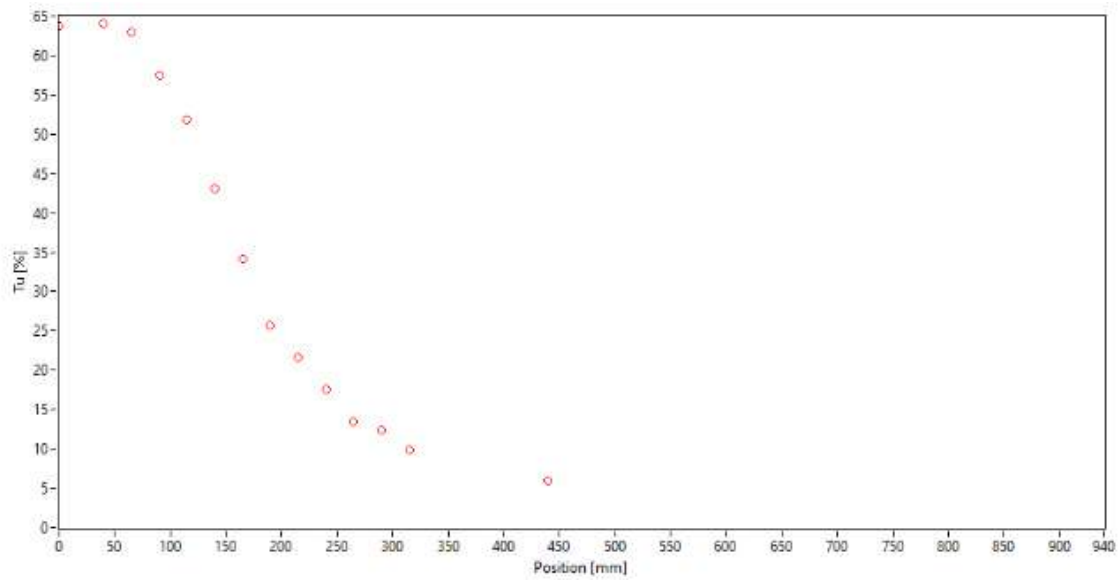


Figura 5.47 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf} = 33$  m/s,  $z = 270$  mm

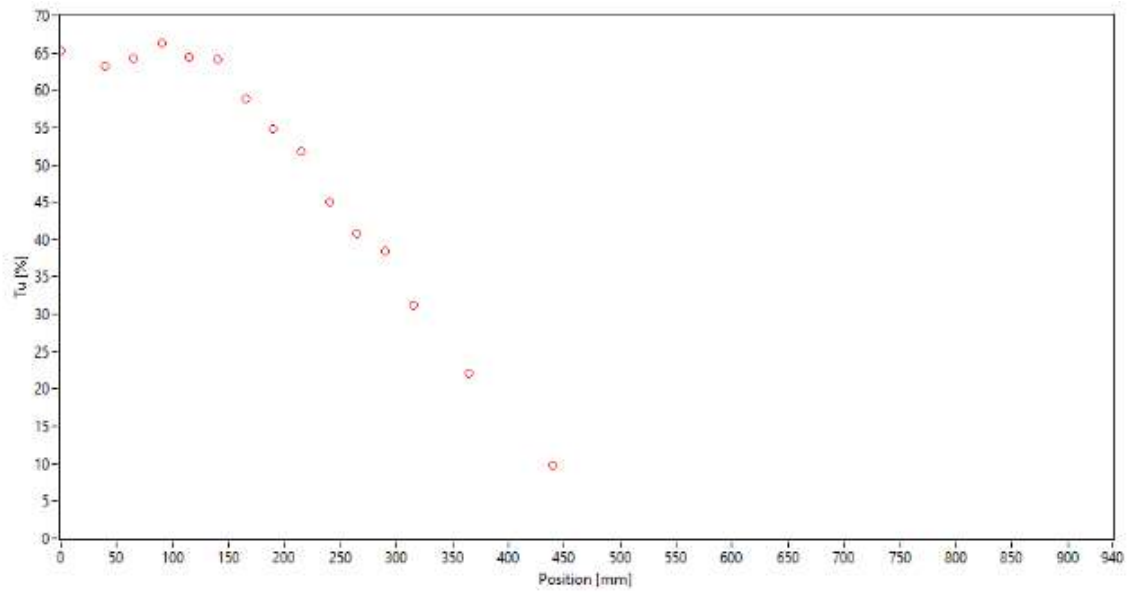


Figura 5.48 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf}= 33$  m/s,  $z=470$  mm

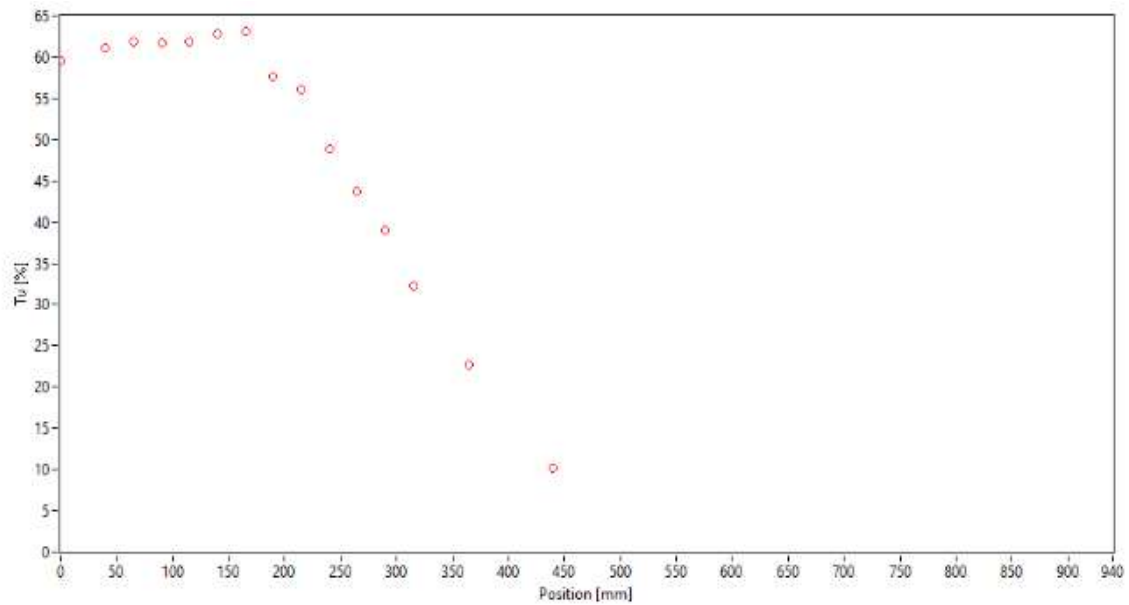


Figura 5.49 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf}= 33$  m/s,  $z=670$  mm

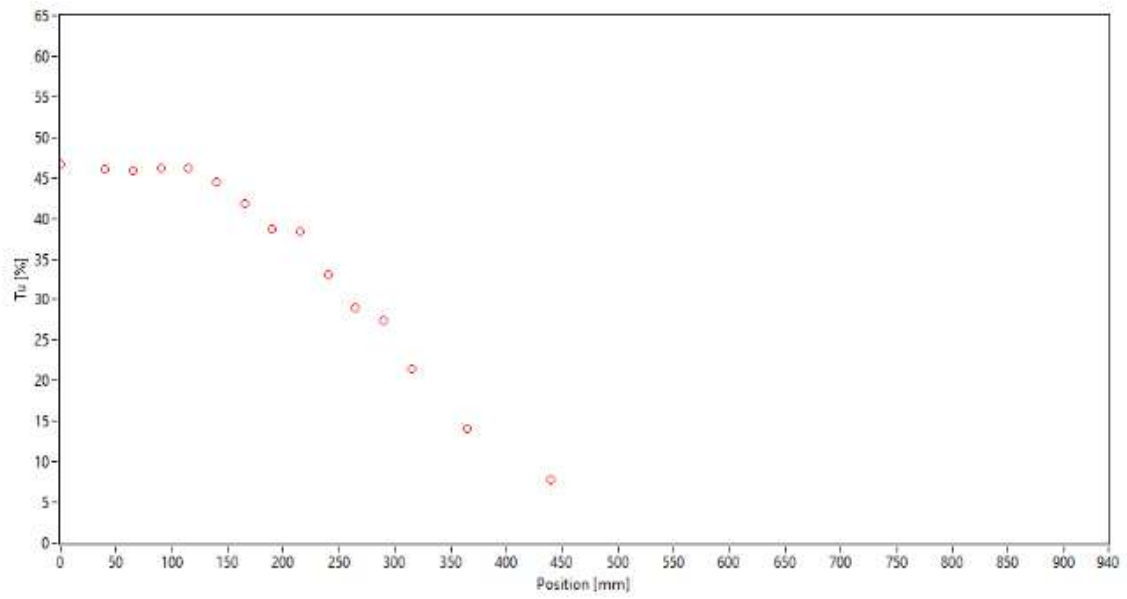


Figura 5.50 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf} = 33$  m/s,  $z = 870$  mm

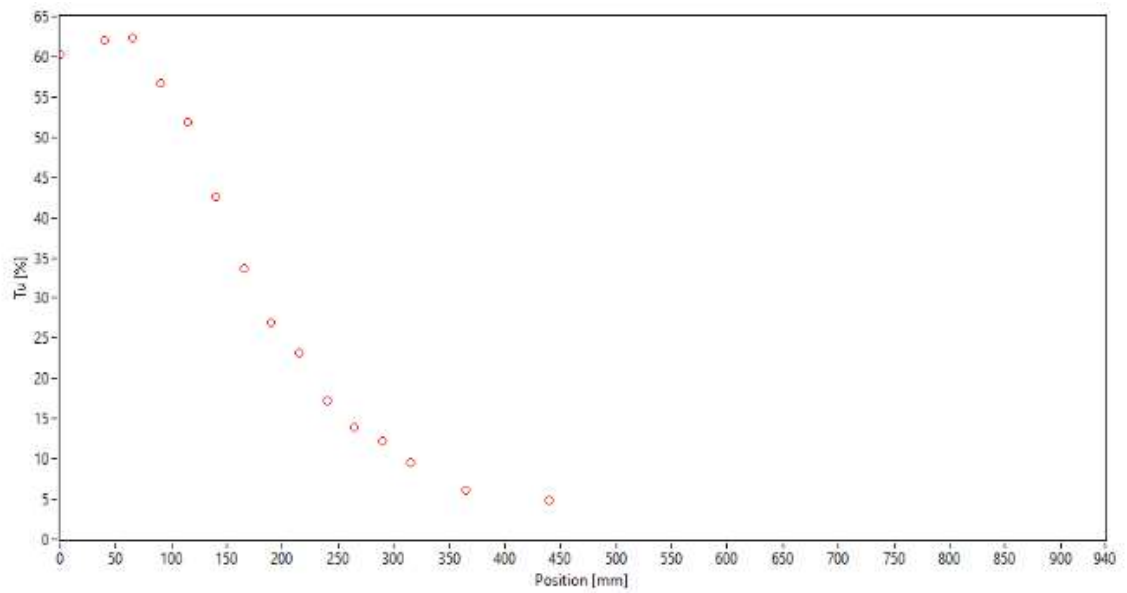


Figura 5.51 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf} = 45$  m/s,  $z = 270$  mm

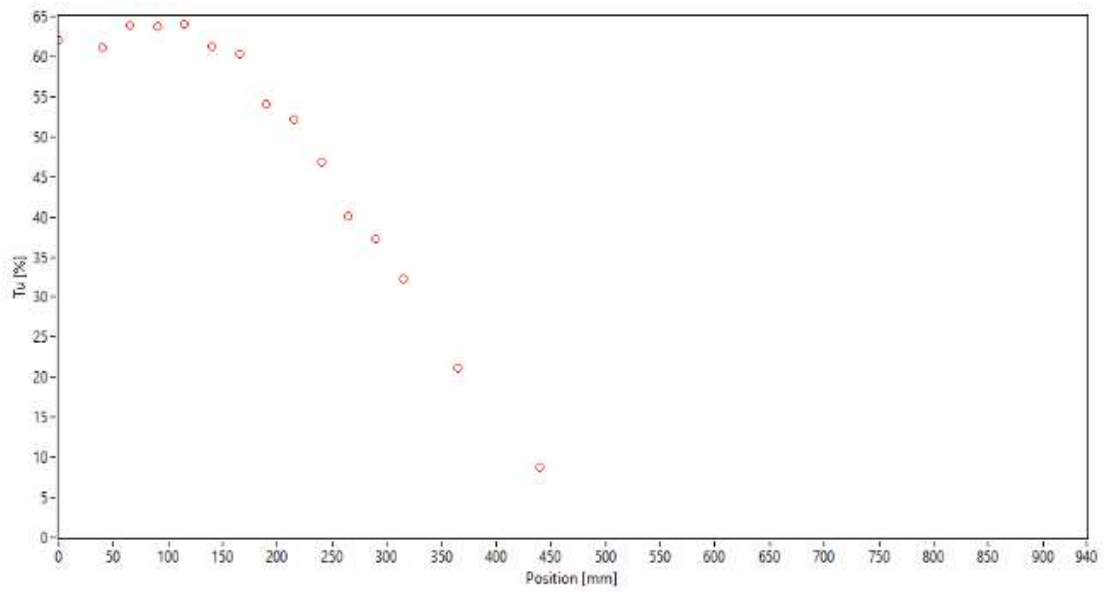


Figura 5.52 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf} = 45$  m/s,  $z=470$  mm

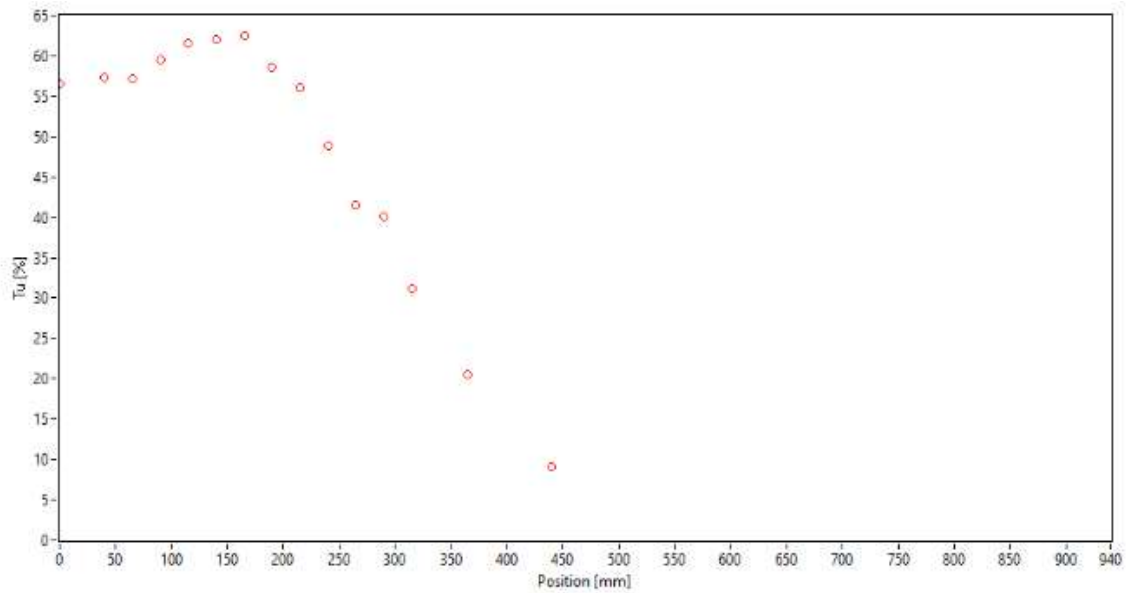


Figura 5.53 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf} = 45$  m/s,  $z=670$  mm



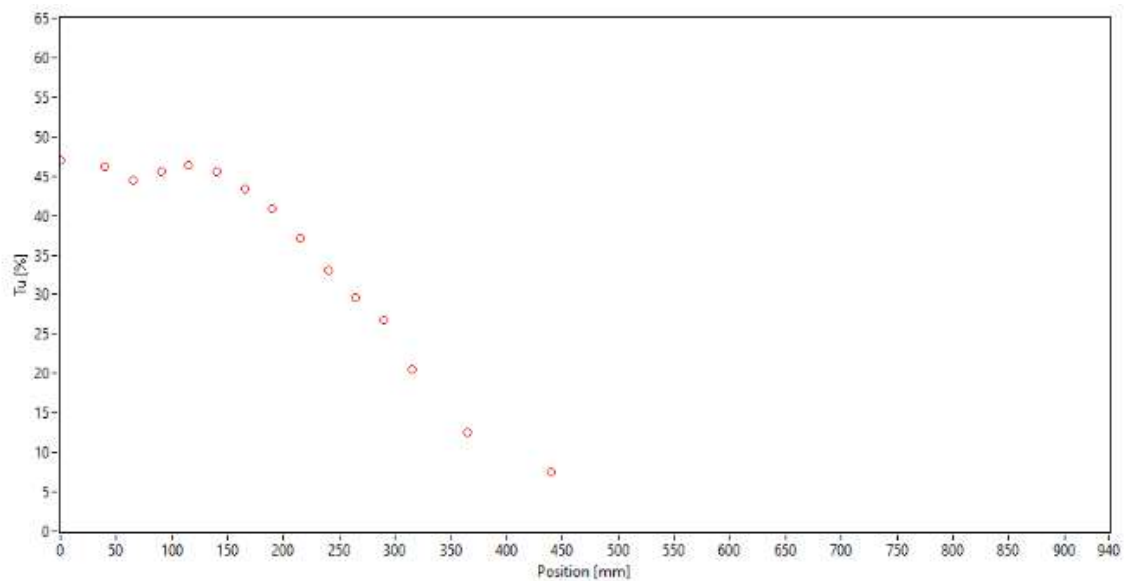


Figura 5.54 Entità delle fluttuazioni %,  $V_{inf}= 45$  m/s,  $z=870$  mm

L'ultima modifica effettuata va a completare il percorso di studio della moto. Dopo essersi interrogati una prima volta sull'influenza dell'aerodinamica interna e aver trovato delle risposte coerenti, l'attenzione si è spostata sull'importanza dei convogliatori di aria che impediscono il completo passaggio dell'aria sotto la carena. Lasciando aperto il passaggio di aria dal radiatore, ma chiudendo i deflettori, si è obbligato il flusso a lambire interamente i componenti interni della moto.

La caratteristica principale di questa configurazione la si nota di nuovo nell'intorno di  $z=470$  mm e  $z=670$  mm (*figure 5.53 e 5.54*). A questa altezza corrisponde la fuoriuscita forzata dell'aria causata dalla chiusura del convogliatore laterale e la si vede in maniera più evidente a  $V_{inf}=45$  m/s, con una percentuale di turbolenza

intorno a  $I=60\%$  fino a  $y=190$  mm, mentre nella configurazione classica il valore di turbolenza crolla al  $35\%$  alla stessa coordinata. Alle altre velocità considerate, il delta rimane sempre di circa  $\Delta I=25/30\%$  di turbolenza tra le due configurazioni.

## 5.6 Mappe di TKE

È da puntualizzare come lo strumento più adatto e preciso per misurare i livelli di turbolenza non sia un tubo di Pitot, bensì altri, come per esempio l'anemometro a filo caldo. Per ricavare quei valori di turbolenza percentuale, ci si è affidati all'*equazione 3.15*, sfruttando il calcolo di RMS e velocità medi. Inizialmente, questo ha portato a pensare che i risultati ottenuti e appena mostrati, legati alla turbolenza, fossero qualitativi e non quantitativi. Cioè che fossero una rappresentazione sicuramente valida dell'andamento delle velocità fluttuanti, ma che non descrivesse con esattezza le effettive percentuali.

A fronte di questo dubbio, ci si è interrogati sul trovare un paragone di fluidodinamica computazionale in bibliografia, che mettesse in luce le differenze con il modello elaborato in questo lavoro di tesi. È, quindi, stato necessario il calcolo della grandezza legata alla turbolenza che permettesse questo paragone, ovvero la *Turbulent Kinetic Energy (TKE)*[11]. Utilizzando l'*equazione 3.17*, si sono ottenuti i risultati riportati di seguito:

Mappe di Energia cinetica turbolenta a V=15 m/s

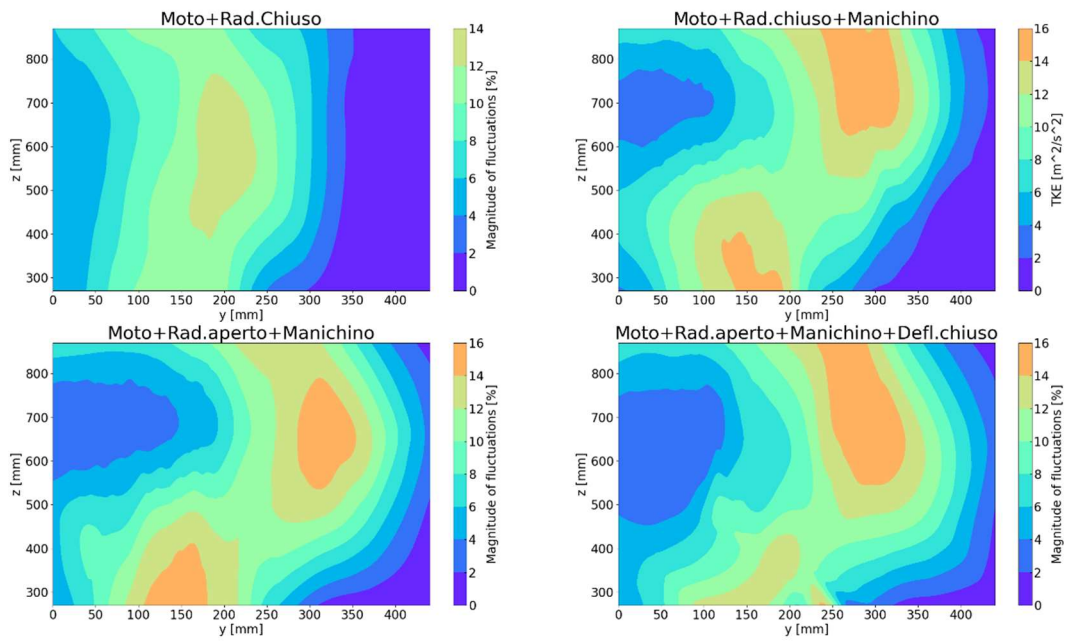


Figura 5.55 Contorni di energia cinetica turbolenta a  $V_{inf}=15$  m/s

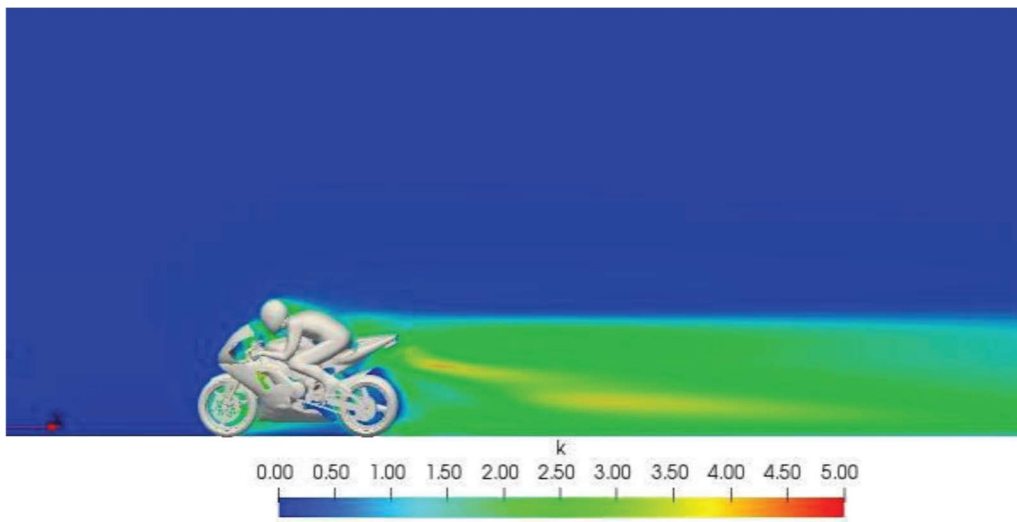
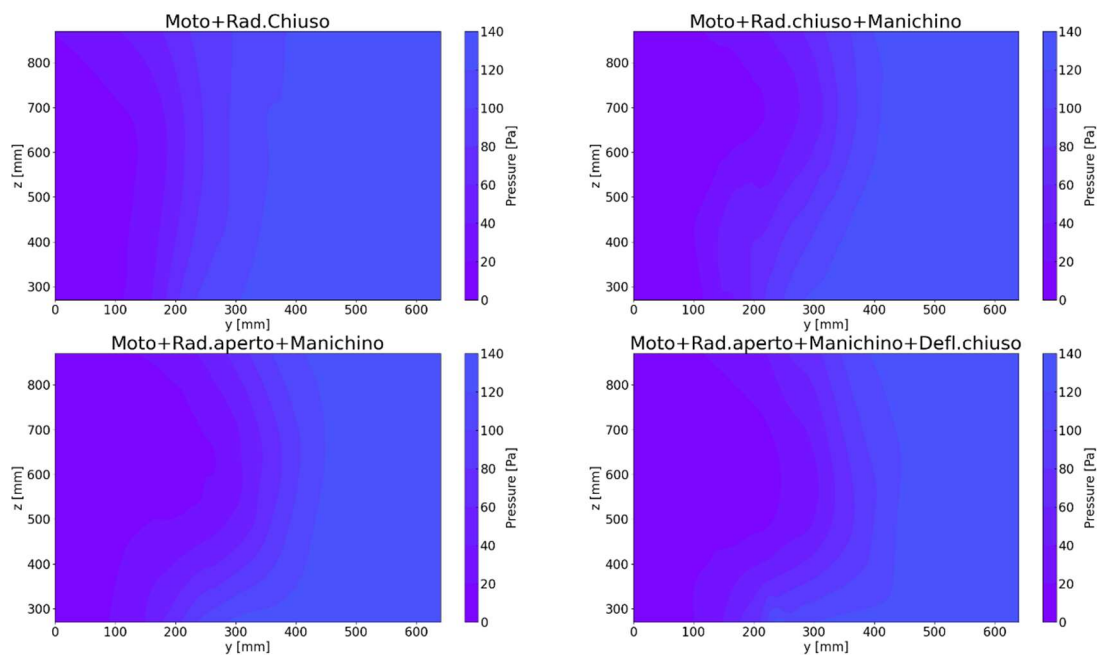


Figura 5.56 TKE Contour con software CFD [11]

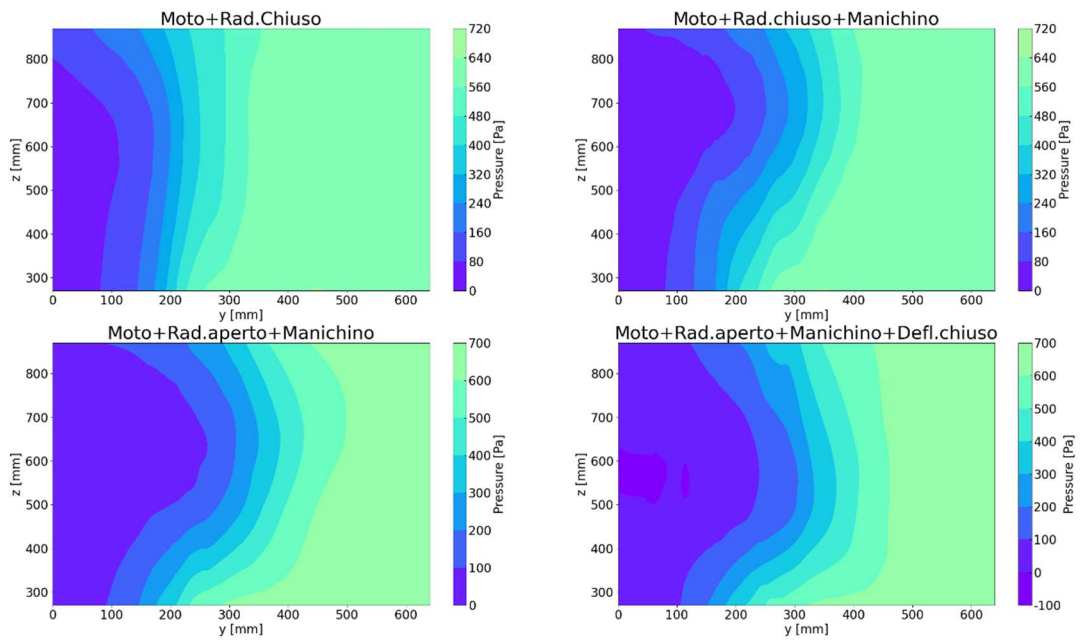
I valori riportati in bibliografia con software CFD sono confrontabili a quelli ottenuti in questo lavoro di tesi con il Pitot, sia per le dimensioni della moto adottata, sia per i valori ottenuti, come si può interpretare dalle mappe di contorni in *figura 5.55* e dalla rappresentazione in *figura 5.56*. In scia, nelle immediate vicinanze della moto, la bibliografia riporta valori di media pari a  $k \sim 3.5:4$ , mentre nelle mappe di colore il valore rimane leggermente più basso ( $k \sim 2.5:3$ ), giustificabile dal fatto che le velocità di infinito a monte sono pari a  $V_{inf}=15$  m/s nei test in galleria e  $V_{inf}=20$  m/s nel calcolo computazionale. Quindi i risultati ottenuti si possono dire coerenti rispetto alla realtà.

## 5.7 Mappe di pressione, velocità media e velocità fluttuanti associate alla turbolenza

Mappe di pressione a  $V=15$  m/s



Mappe di pressione a  $V=33$  m/s



Mappe di pressione a  $V=45$  m/s

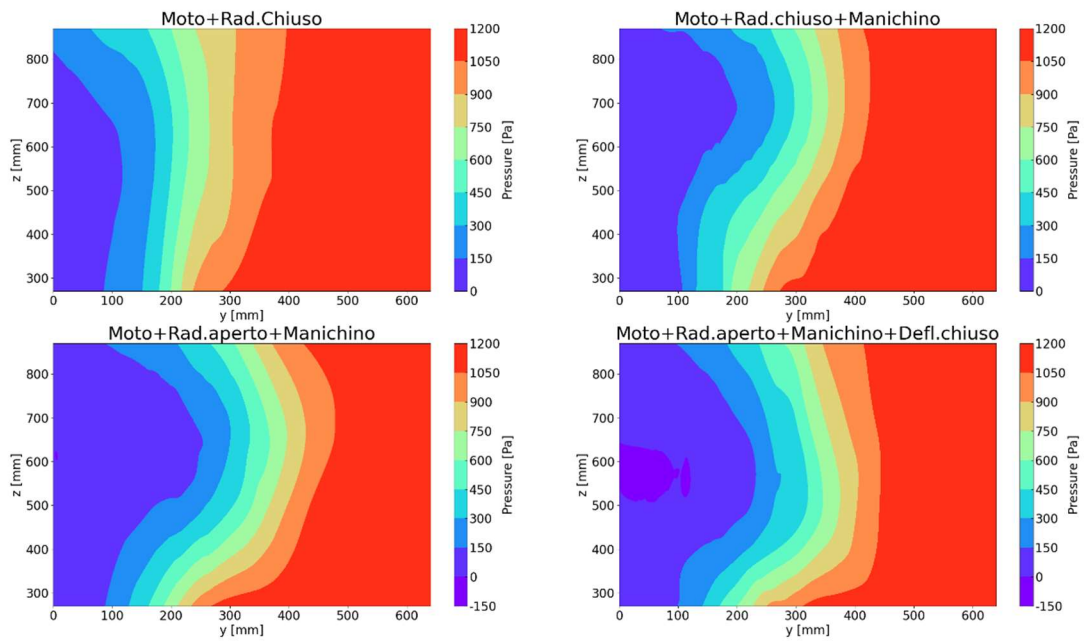
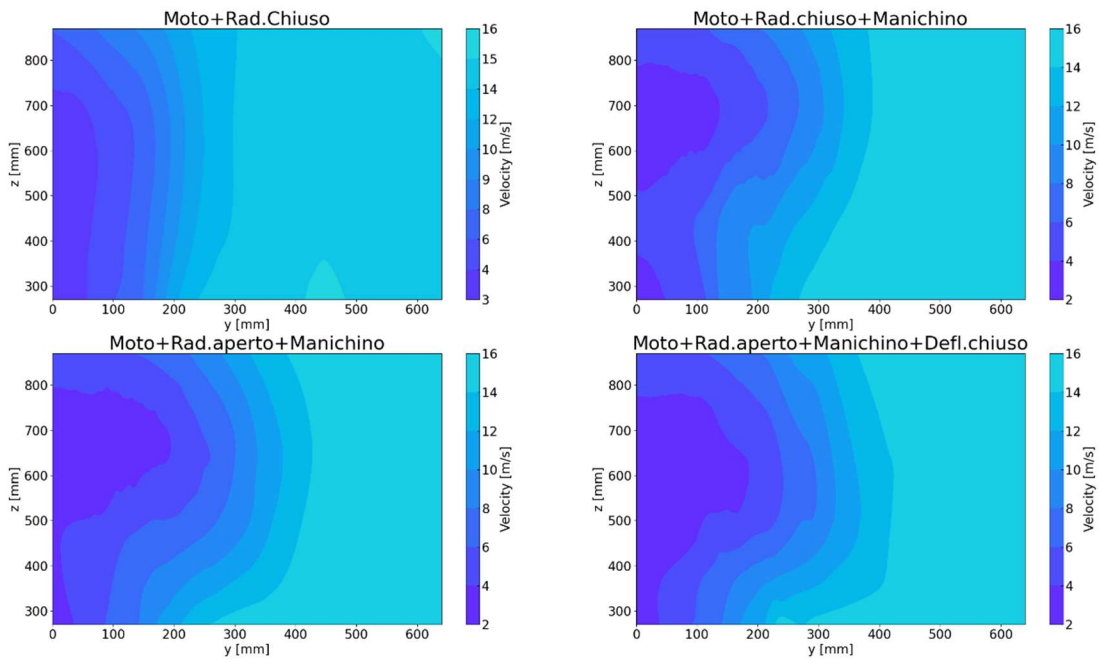
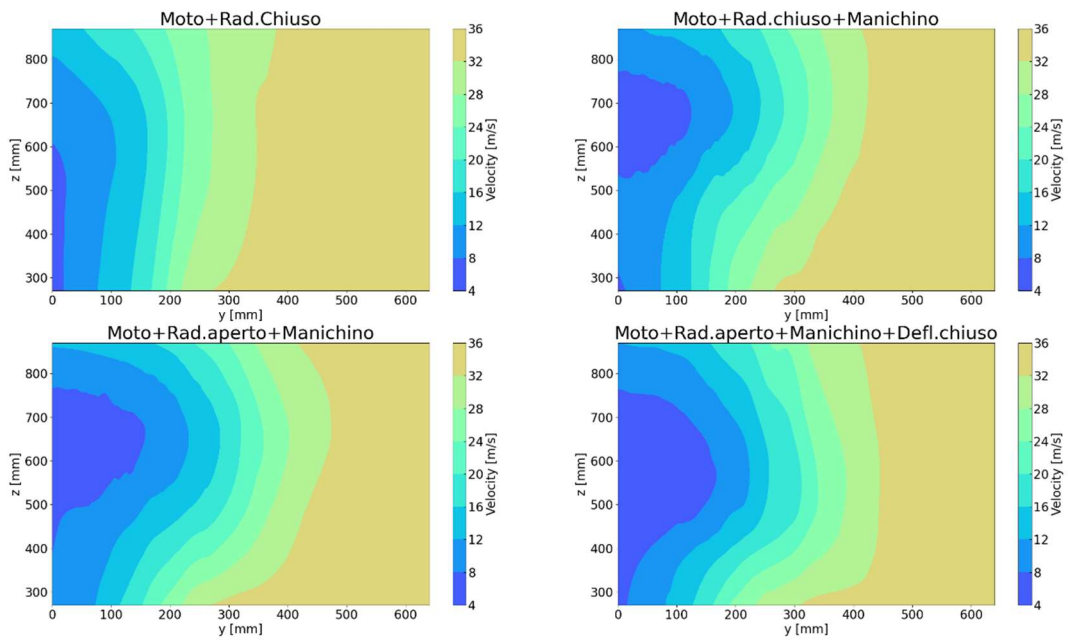


Figura 5.57 Contorni di pressione a  $V_{inf}=15, 33, 45$  m/s nelle varie configurazioni

### Mappe di velocità a V=15 m/s



### Mappe di velocità a V=33 m/s



Mappe di velocità a  $V=45$  m/s

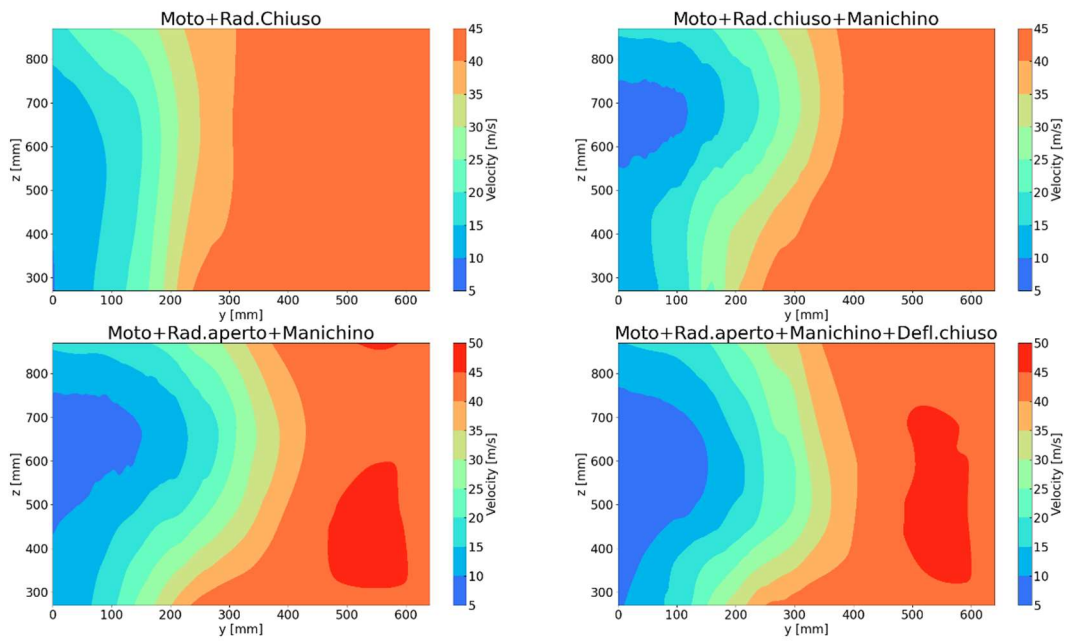
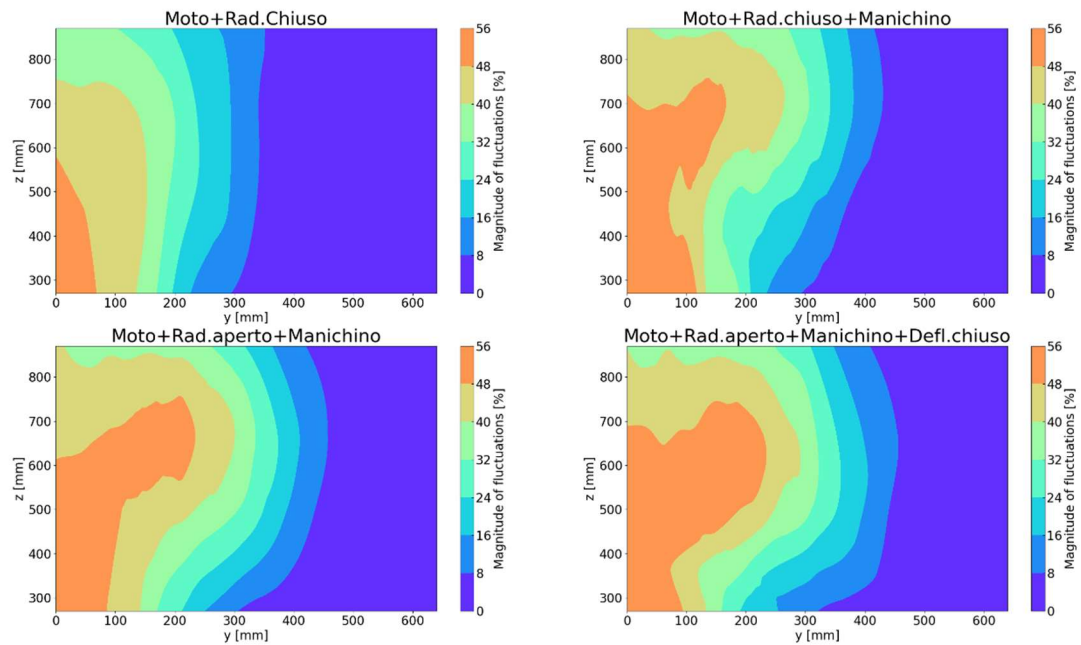


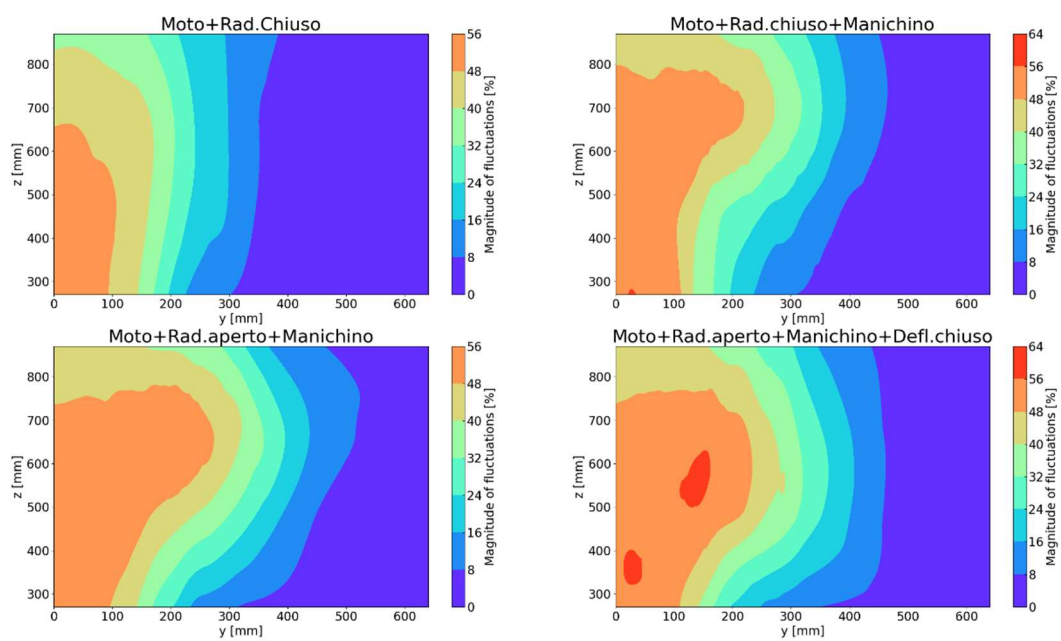
Figura 5.58 Contorni di velocità a  $V_{\infty}=15, 33, 45$  m/s nelle varie configurazioni

Mappe di velocità fluttuante associata alla turbolenza a  $V=15$  m/s





Mappe di velocità fluttuante associata alla turbolenza a  $V=33$  m/s



Mappe di velocità fluttuante associata alla turbolenza a  $V=45$  m/s

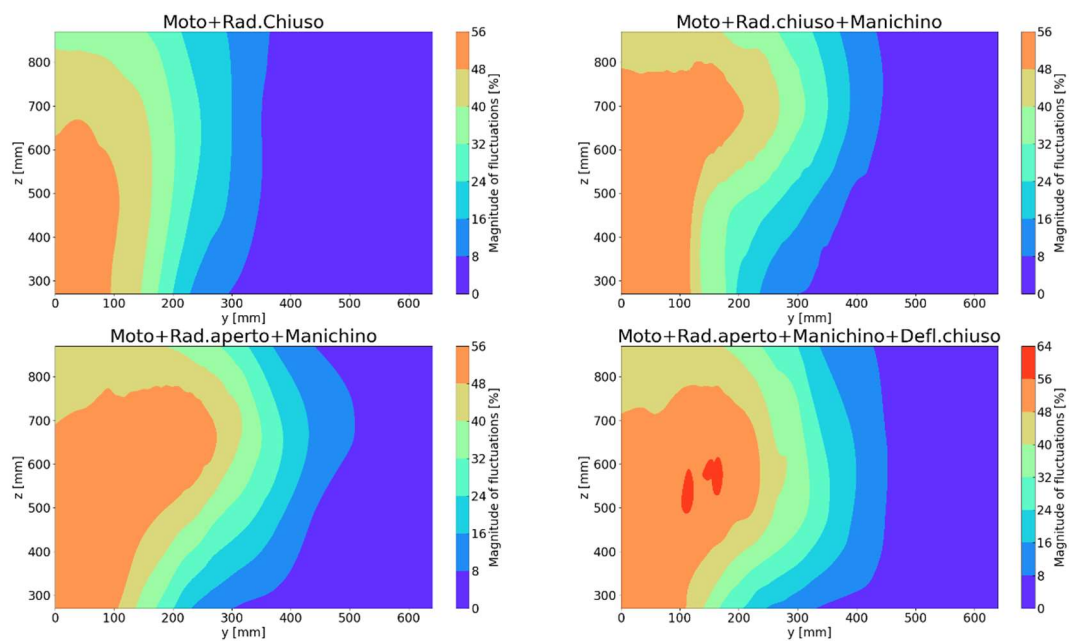


Figura 5.59 Mappe di velocità fluttuanti associate alla turbolenza % a  $V_{inf}=15, 33, 45$  m/s nelle varie configurazioni



A dimostrazione di quanto elaborato e scritto in precedenza, questi grafici mettono in risalto i contorni delle aree con simile valore. Significativo il passaggio da solo moto a moto con manichino, ma ancora di più l'influenza dell'aerodinamica interna sull'ampliamento della scia turbolenta. Nei grafici di pressione (*figura 5.58*), emergono anche delle zone a valori negativi, dovuti al fatto che la depressione dell'aria porta ad avere zone di ricircolo in cui il flusso cambia direzione e il tubo di Pitot la rileva con modulo negativo. Avviene proprio a coordinate prossime allo zero, dove si raggiunge il picco massimo di turbolenza (*figura 5.60*). In quest'ultima figura, i risultati ottenuti derivano dall'equazione 3.15, ricavando indirettamente quella che viene definita come il rapporto percentuale tra il root mean square della velocità e la velocità di infinito a monte.

## **5.8 Profili di velocità media adimensionale**

Un altro passaggio del post processing dei dati acquisiti ha riguardato i profili di velocità media elaborati attraverso la formula della pressione dinamica in uscita dal tubo di Pitot (*figura 5.60*). Questa volta, ad essere esaminato è stato il comportamento del flusso in presenza o meno del manichino, paragonandoli con la configurazione di radiatore chiuso. L'influenza del rider si nota a valori di  $z$  più elevati ( $z=670$  mm e  $z=870$  mm), dove effettivamente il pilota genera, con il suo corpo, una maggiore superficie di impatto. Da casco e gobba superiori ( $z=870$ mm), a braccia e gambe laterali ( $z=670$ ), la differenza di velocità media adimensionale è di circa il 20% nell'intervallo  $0 < y < 350$  mm: . Dopo di che, per  $y > 350$  mm le curve si sovrappongono perché l'effetto del pilota non influisce più in termini di uniformità del flusso in scia.

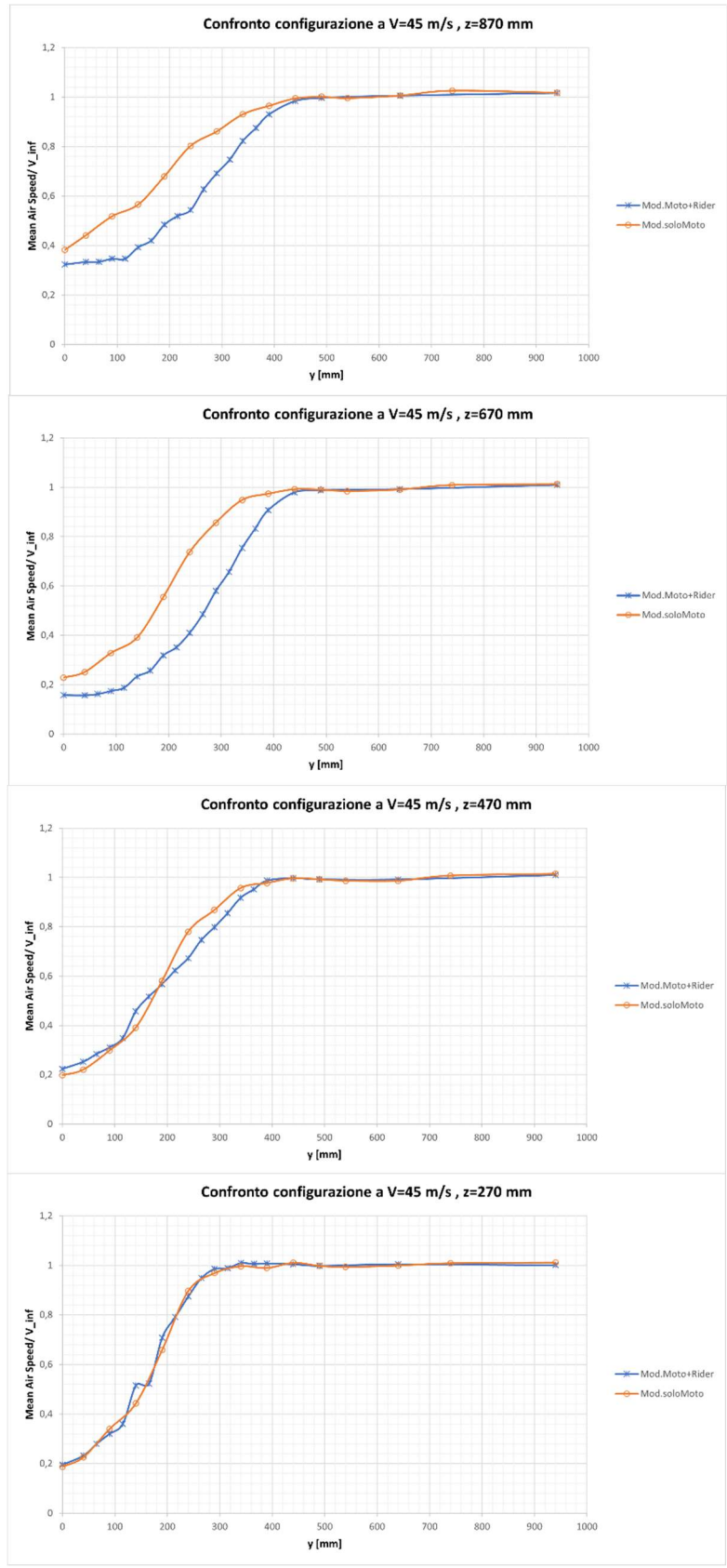


Figura 5.60 Grafici di confronto in configurazione uguale al variare della velocità in camera di prova

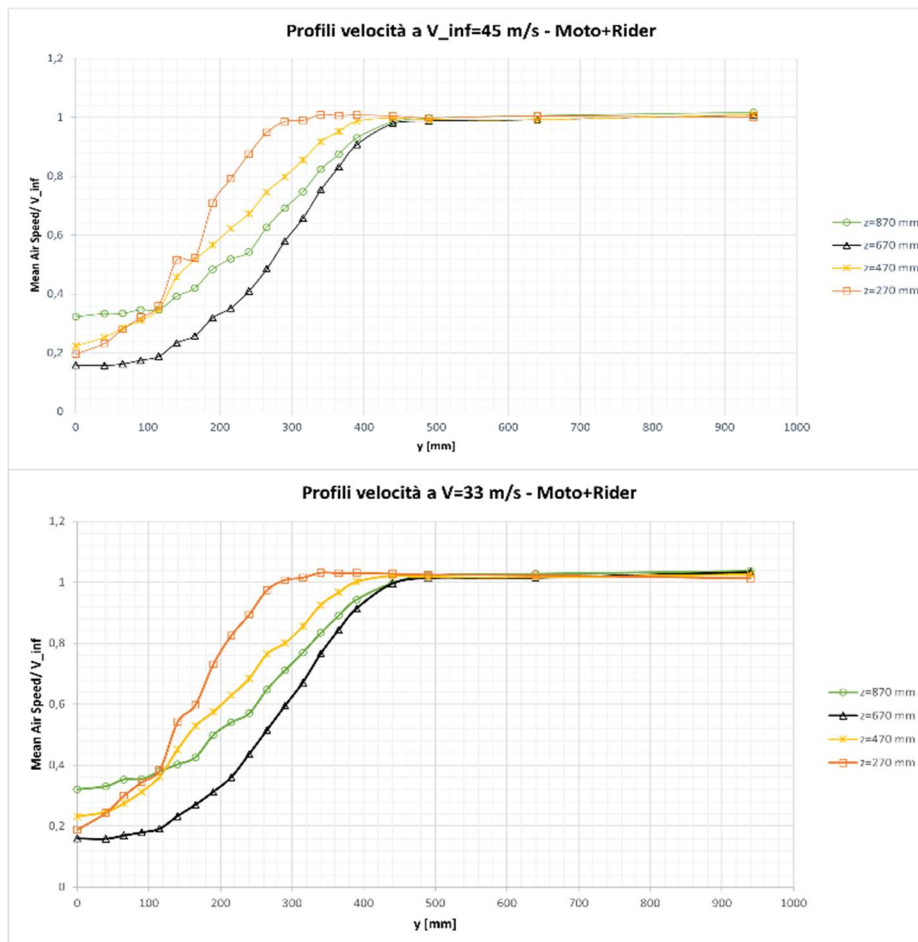


Figura 5.61 Grafici di confronto sull'influenza del rider sull'ampiezza della scia a valle della moto

Dai profili di velocità in modalità M+Ma+RC (figura 5.61), variando la velocità in camera di prova, si nota come a valori bassi della coordinata  $z$ , le velocità adimensionali medie siano decisamente più alte. Questo perché ci si trova nella zona in cui il flusso non lambisce il corpo del manichino e ha una superficie di impatto inferiore, quella che comprende la parte bassa di pneumatici e carena. Tra  $z=270$  mm (minimo ingombro del pilota) e  $z=870$  mm (massimo ingombro), vi è uno scostamento in termini di velocità di circa il 30%.

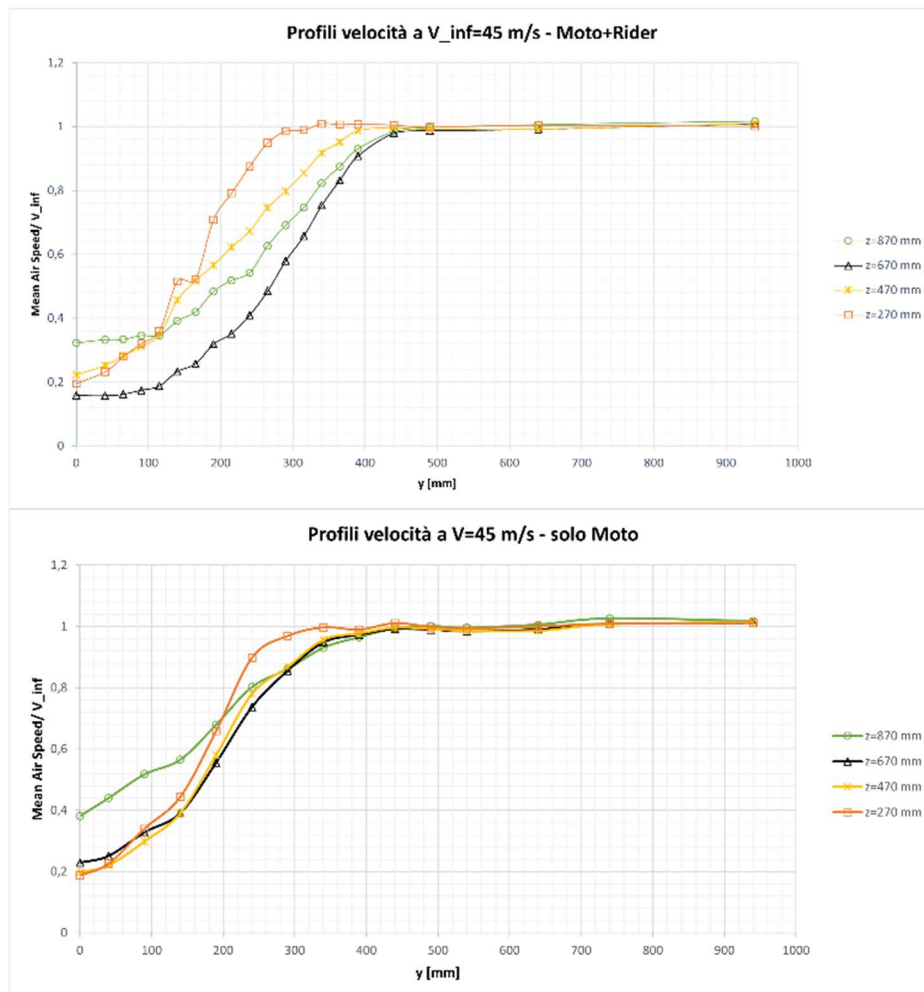


Figura 5.62 Grafici di confronto sull'influenza del rider sull'ampiezza della scia a valle della moto

Paragonando i profili di velocità media a  $V=45$  m/s nelle due configurazioni M+Ma+RC e M+RC, si vede ancora più nettamente l'influenza del rider. Le curve in assenza di manichino risultano quasi interamente sovrapponibili, al contrario di quando esso viene inserito che, come abbiamo notato in precedenza, rende più visibile le differenze di velocità nelle varie zone di scia.

Inoltre, si nota come la posizione del manichino non sia ottimale, rendendo la scia in altezza ancora più importante rispetto alla configurazione M+RC. La curva verde a  $z=870$  mm, infatti, nella pozione centrale  $y=0$  ha un valore medio di velocità di

0.4 rispetto a circa 0.3 della corrispettiva curva in M+R. Per i principi dell'aerodinamica, infatti, un rider dovrebbe permettere al flusso di rimanere più "attaccato" e ritardarne la separazione, quindi migliorandone la scia e aumentandone di conseguenza il modulo di velocità media. Nel successivo paragrafo si metterà in evidenza nuovamente quest'ultimo difetto del manichino.

## 5.9 Forze aerodinamiche misurate con bilancia

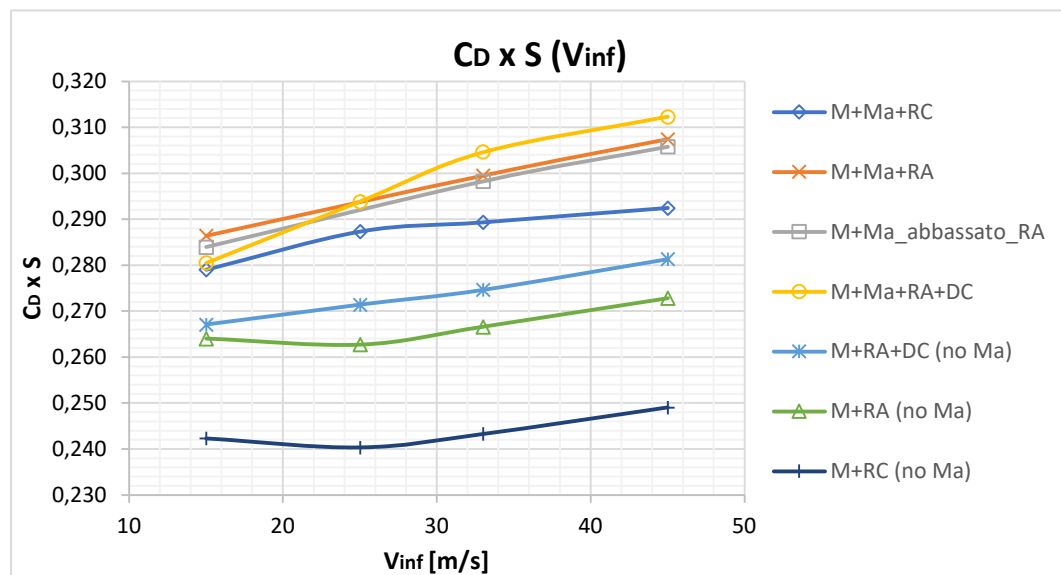


Figura 5.63 Coefficiente di Drag acquisito in tutte le configurazioni al variare della Velocità indisturbata a monte

Oltre alle misure di scia tramite Pitot, si è provveduto anche al calcolo dei carichi aerodinamici tramite la bilancia sottostante la moto e il corrispettivo software di acquisizione. Il grafico in *figura 5.63* mostra la variazione di Drag Area al variare delle configurazioni adottate. Si nota come le curve con "no Ma" corrispondano ai valori più bassi di  $C_d \times S$ , rispetto a quelle con manichino. È una contraddizione con quello che riporta l'esperienza empirica e bibliografica, in cui il pilota permette un distacco dello strato limite sulla schiena del pilota più tardivo rispetto alla

configurazione in sua assenza. Ciò è dovuto a un montaggio del manichino non pienamente corretto, in quanto troppo rialzato nella zona della gobba superiore. Infatti, provvedendo a una sua seppur leggera modifica, si arriva a una riduzione di Drag Area di 10 Drag Count<sup>3</sup>.

Tra le varie configurazioni di aerodinamica interna, invece, quella con radiatore aperto e deflettore chiuso è senza dubbio la peggiore sia nel caso di sola moto che nel caso di presenza del manichino. Questo perché si forza il passaggio del flusso d'aria all'interno del motociclo dove l'aerodinamica non è tenuta molto in considerazione in fase di progettazione.

### **5.9.1 Distribuzione di portanza**

In ambito motociclistico, in pochi prestano attenzione al coefficiente di portanza e la risposta al perché è riassunta proprio nei grafici in *figura 5.64*. Analizzando singolarmente front e rear, i valori hanno una certa rilevanza e ci dicono come l'anteriore, a fronte di una forte pressione del flusso che investe la moto, abbia carico positivo e quindi tenda a sollevarsi da terra. L'opposto accade posteriormente, con livelli negativi di portanza. Andando a sommare i due valori, si vede come il risultato finale sia un numero prossimo allo zero, che negli anni passati ha reso questa grandezza poco attraente nei Team. Da qualche anno in avanti, il concetto di aderenza della moto all'asfalto si è incentrato sullo sviluppo di *winglet* aerodinamiche che garantissero maggiore portanza negativa

---

<sup>3</sup> Il Drag Count è un'unità di misura adimensionale adottata in ambito aerospaziale, la cui formula è:  $\Delta C_D = 10^4 \frac{2D}{\rho V^2 A}$ .

(“deportanza”) sulla ruota anteriore e ne hanno guadagnato sia in velocità di punta che in stabilità in curva.

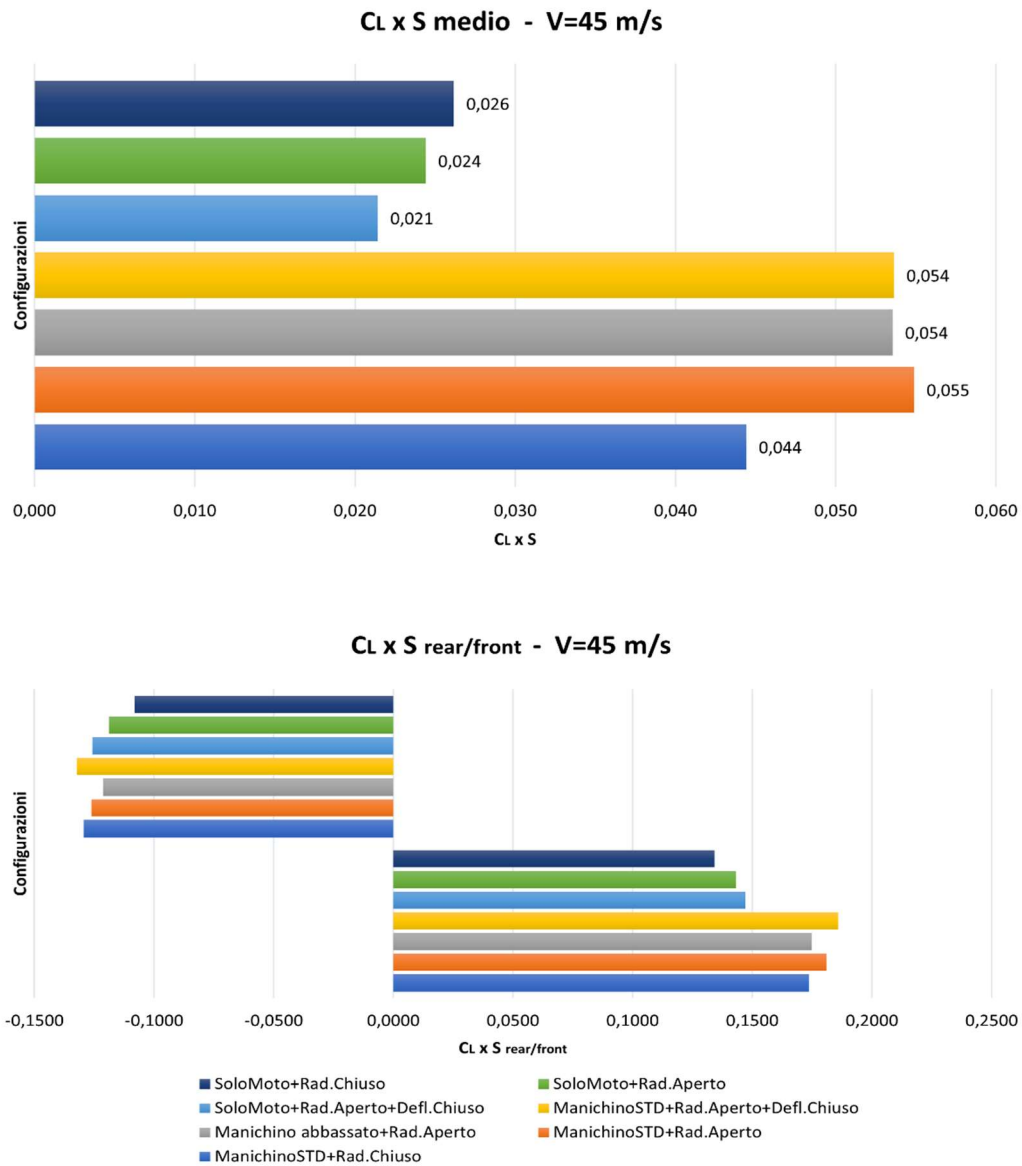


Figura 5.64 Distribuzione di portanza media e distribuita tra ruota anteriore e posteriore

## 5.9.2 Influenza del traversing sulle misure

Per dare maggiore validità al sistema di misurazione, si è voluto cercare di capire quale influenza avesse il traversing che sosteneva il Pitot. La consapevolezza di aver creato un sostegno potenzialmente intrusivo, è stato però compensato dalla necessità di stabilità della struttura ad elevate turbolenze. Il compromesso tra maggiore stabilità e minore intrusività ha portato a questa struttura.

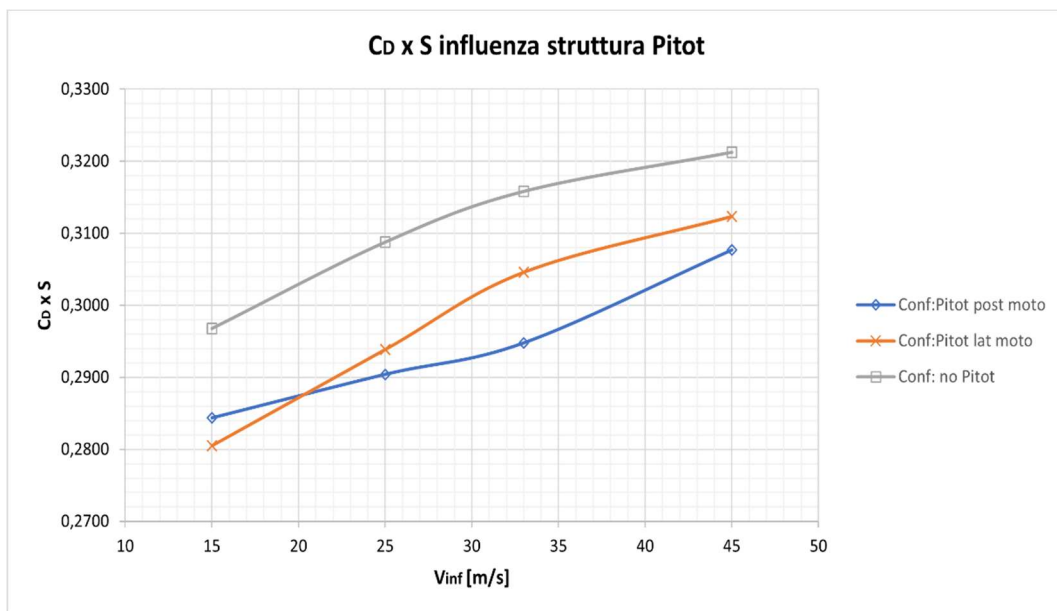


Figura 5.65 Influenza della struttura di sostegno del tubo di Pitot sul coefficiente di Drag

Nel grafico in *figura 5.65*, quindi, si prende in considerazione il disturbo e l'intrusività della struttura posteriore di sostegno del Pitot facendo variare la Drag Area con la velocità di infinito a monte. L'impatto sulle misure dei carichi aerodinamici è, come previsto, diverso da zero. Provando le tre configurazioni sopra descritte, si nota che la presenza della struttura posteriormente alla moto favorisce una diminuzione di Coefficiente di Drag Area, mentre la completa



assenza della struttura porta a un aumento medio di circa 110 Drag Count. Questo fenomeno va, in parte, contro le aspettative iniziali per cui ci si aspettava un peggioramento con la presenza della struttura posteriormente alla moto. Il risultato ottenuto ha portato ad interrogarsi sulle motivazioni del fenomeno, trovando una risposta nel fenomeno descritto come “splitter plate”.

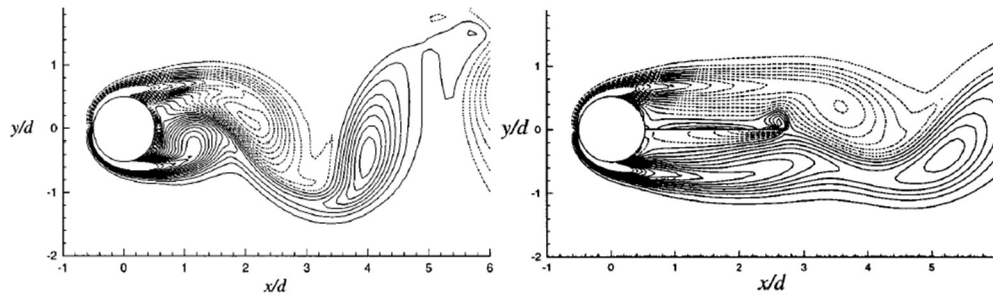


Figura 5.66 Contorni di vorticità senza lo splitter plate a sx, con lo splitter plate a destra[12]

Si è visto in vari studi precedenti [12,13] come i vortici turbolenti in scia, a fronte della presenza di una lastra piana, tendano a seguire la forma del profilo e a rienergizzare il fluido separato. A sua volta, quest’ultimo tende a riattaccarsi per effetto Coanda<sup>4</sup>, rendendo più sottile la scia e riducendo il Drag (figura 5.66). Tutto ciò va considerato con le dovute proporzioni di una struttura molto più piccola rispetto al modello in camera di prova, ma è stata l’opzione più plausibile a fronte di un risultato inizialmente inaspettato.

<sup>4</sup> Definizione “effetto Coanda”: un flusso di fluido in movimento a contatto con una superficie curva tenderà a seguire la curvatura della superficie piuttosto che continuare a viaggiare in linea retta .

## 5.10 Tufting

Questa tecnica di visualizzazione, nota come la più antica e semplice da realizzare, è servita principalmente ad avere un'idea ottica di come si sviluppasse la scia a valle della moto, quindi la sua ampiezza e le zone di maggiore ricircolo turbolento. È stato fatto nella configurazione che, dati alla mano, si era dimostrata peggiore in termini di ampiezza di scia, ovvero “Moto+Ma+RA+DC” (figura 5.67).



Figura 5.67 Vista laterale della visualizzazione con fili di lana



Figura 5.68 Vista posteriore della visualizzazione con fili di lana

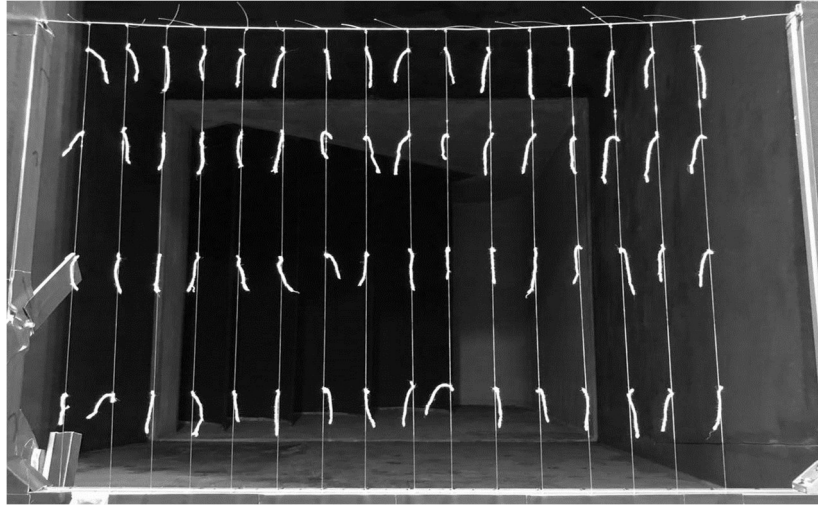


Figura 5.69 Struttura con fili di lana

È stata creata una griglia di monofilamenti di filo da pesca da 0.60 cm a cui sono stati legati e incollati dei filetti di lana di medesime dimensioni alle stesse coordinate in cui era stato posizionato il tubo di Pitot per le misurazioni. Si è deciso per questa visualizzazione, di lavorare ad una velocità di infinito a monte di 33 m/s per garantire stabilità alla struttura di fili di lana. I risultati ottenuti hanno dato evidenza di ciò che il tubo di Pitot aveva segnalato, ovvero un ricircolo turbolento di flusso per circa 450 mm lungo la coordinata y. È stato possibile definire questo valore interpretando il movimento del filo stesso, che in questa zona era instabile e non seguiva la direzione del flusso, roteando su se stesso. All'altezza delle ultime coordinate, invece, i fili seguivano perfettamente la direzione dell'aria, indice di un flusso a bassi livelli di turbolenza e completamente fuori dalla scia della moto.

## 6 Conclusioni

I test effettuati in Galleria del Vento erano partiti con l'idea di analizzare l'aerodinamica della moto a disposizione del Dipartimento di Ingegneria, cercando di valutarne le variazioni più consistenti in termini di pressione, velocità e turbolenza medie al variare delle configurazioni impostate. I risultati di questi test hanno portato ad avere delle conferme rispetto a quanto trovato in bibliografia e alle esperienze empiriche di galleria precedenti. Sono stati ottenuti confronti realistici sui livelli di energia cinetica turbolenta che si assestano intorno a valori di circa  $k=3$  a valle della moto per velocità di infinito a monte di  $V=15$  m/s. Ma a guidare il percorso di Tesi è stata anche la curiosità nell'andare a decifrare ogni particolare che avesse apportato anche solo un minimo dubbio rispetto ai risultati attesi. In particolare, la scoperta principale ha riguardato l'impatto che tutto ciò che è nascosto dalla carena ha sui valori dei coefficienti aerodinamici. In termini numerici, si è trattato di una differenza di 170 Count a velocità di 45 m/s. Tradotto in velocità di percorrenza e rapportato alle prestazioni massime di una moto da corsa, si tratta di un aumento del coefficiente di resistenza di circa il 5% a cui corrisponde una diminuzione di velocità di punta di 3 km/h.

Per concludere, nel settore motoristico, l'aerodinamica esterna è sicuramente il concetto che ha guidato questi ultimi decenni di ricerca ingegneristica. L'elevato grado di efficienza raggiunta, però, porterà probabilmente a dover scoprire nuove rotte da seguire per sviluppi futuri. Una di queste, sulla base dei risultati ottenuti durante questo lavoro di tesi, potrebbe essere lo sviluppo più approfondito dell'aerodinamica interna. Il flusso di aria che finora ha avuto importanza principalmente in termini di raffreddamento del motore, da adesso potrebbe giocare

un ruolo fondamentale nella diminuzione del  $C_x$  della moto. Si tratta di un lavoro che richiederà molti più sforzi perché in gioco ci sono componenti modificabili solo in piccola parte e il range di spostamento interno è nettamente minore. Quello che, però, la ricerca aerodinamica ha saputo ottenere fino ad oggi, nessuno se lo sarebbe aspettato anche solo agli inizi del nuovo secolo, quindi non ci sarà da stupirsi se questo obiettivo sarà raggiunto in breve tempo.

## Bibliografia

- [1] Hucho WH, Sovran G. Aerodynamics of road vehicles 1993.
- [2] Risitano G, Scappaticci L, Garinei A. Studio delle schiere di vortici in scia di una moto sportiva.
- [3] Tarroni A. Aerodinamica della moto e del suo impianto di raffreddamento. 1st ed. Edizioni Accademiche Italiane; 2014.
- [4] Bella G, Ubertini S, Desideri U. Experimental and computational analysis of the aerodynamic performances of a maxi-scooter. SAE Technical Papers, 2003.
- [5] Cossalter V, Lot R, Massaro M. Motorcycle Dynamics. Modelling, Simulation and Control of Two-Wheeled Vehicles, 2014
- [6] Wood R. Reynolds Number Impact on Commercial Vehicle Aerodynamics and Performance. SAE Int J Commer Veh 2015.
- [7] Ghasemi E, McEligot DM, Nolan KP, Crepeau J, Siahpush A, Budwig RS, et al. Effects of adverse and favorable pressure gradients on entropy generation in a transitional boundary layer region under the influence of freestream turbulence. Int J Heat Mass Transf 2014.
- [8] Rae WH, Pope A. Low-speed wind tunnel testing. Second Edn. 1984.
- [9] Collin C, Mack S, Indinger T, Mueller J. A Numerical and Experimental Evaluation of Open Jet Wind Tunnel Interferences using the DrivAer

Reference Model. SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems 2016.

- [10] Forliti DJ, Strykowski PJ. Controlling turbulence in a rearward-facing step combustor using countercurrent shear. Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME 2005.
- [11] Dubey P, Pramod MY, Kumar AS, Kannan BT. Numerical simulation of flow over a racing motorbike using OpenFOAM®. AIP Conf Proc, 2020.
- [12] Kwon K, Choi H. Control of laminar vortex shedding behind a circular cylinder using splitter plates. Physics of Fluids 1996.
- [13] Ain Q ul, Mahmood R, Awrejcewicz J, Siddique I, Majeed AH, Pawłowski W. Effectiveness of splitter plate to control fluid forces on a circular obstacle in a transient flow: FEM computations. Sci Rep 2022.
- [14] Persico G. Hot Wire Anemometry for Fluid-Machines Wake Investigation: main flow properties and Turbulence. 2016.
- [15] Cooper K. Bluff-body Blockage Corrections in Closed- and Open-Test-Section Wind Tunnels.
- [16] Forliti DJ, Strykowski PJ. Controlling turbulence in a rearward-facing step combustor using countercurrent shear. Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME 2005.

- [17] Taylor P, Evans JR, Evans JR, Pacejka HB. Vehicle System Dynamics : International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility 2008.
- [18] McKeon BJ, Li J, Jiang W, Morrison JF, Smits AJ. Pitot probe corrections in fully developed turbulent pipe flow. Meas Sci Technol 2003.
- [19] Bailey SCC, Hultmark M, Monty JP, Alfredsson PH, Chong MS, Duncan RD, et al. Obtaining accurate mean velocity measurements in high Reynolds number turbulent boundary layers using Pitot tubes. J Fluid Mech 2013.
- [20] Desai S, Lylek E, Lo CMB, Doddegowda P, Bychkovsky A, George AR. Experimental and CFD comparative case studies of aerodynamics of race car wings, underbodies with wheels, and motorcycle flows. SAE Technical Papers, 2008.
- [21] Scappaticci L, Risitano G, Battistoni M, Grimaldi C. Drag optimization of a sport motorbike. SAE Technical Papers, 2012.
- [22] Palanivendhan M, Nagpal D, Ayush Rao D, Philip J, Srinivas Ganapathi M. Design and analysis of an aerodynamic kit for a two wheeled race motorcycle.
- [23] Cooper KR. Bluff-body aerodynamics as applied to vehicles. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 1993.
- [24] Angle GM, Huebsch WW. Aerodynamic drag reduction of a racing motorcycle through vortex generation. SAE Technical Papers, 2003.



- [25] Mercker E, Cooper KR, Fischer O, Wiedemann J. The influence of a horizontal pressure distribution on aerodynamic drag in open and closed wind tunnels. SAE Technical Papers.
- [26] Watkins S, Saunders JW. Turbulence Experienced by Road Vehicles under Normal Driving Conditions. 2018.
- [27] Arina R. Fondamenti di Aerodinamica, Parte II.
- [28] Wiński K, Piechna A. Comprehensive CFD Aerodynamic Simulation of a Sport Motorcycle. *Energies (Basel)* 2022.
- [29] Katz J. Aerodynamics in motorsports. *Proc Inst Mech Eng P J Sport Eng Technol* 2021.
- [30] Katz and J, Plotkin A. *Low-Speed Aerodynamics, Second Edition*. *J Fluids Eng* 2004.
- [31] Pope SB. *Turbulent flows*. *Turbulent Flows*, by Stephen B. Pope. Isbn 2000.
- [32] Francesco Uffreduzzi. Effetti aerodinamici del parafango anteriore sulle prestazioni di raffreddamento di un veicolo MotoGP. Tesi di Laurea. Politecnico di Torino, 2019.

## 8 Ringraziamenti

Grazie al prof. Castellani Francesco per la disponibilità e la gentilezza con cui mi ha accolto sin dal primo momento, nonostante fossi uno studente esterno all'Università degli Studi di Perugia, ai suoi collaboratori Dott. Pignattini Roberto, Ing. Becchetti Matteo, Dott. Vedovelli Matteo che mi hanno affiancato in ogni momento del percorso di Tesi e da cui ho imparato molto, e all'Ing. Ficuciello Corrado per gli spunti che mi ha dato durante il percorso di Tesi.

Grazie al prof. Iuso Gaetano che è venuto incontro alle mie esigenze e ha fatto in modo che le due università, Politecnico di Torino e Università degli Studi di Perugia, collaborassero. Grazie, soprattutto, per la passione trasmessa nelle lezioni di Aerodinamica Sperimentale, perché da lì ho avuto la certezza di ciò che spero un giorno diventi il mio lavoro.

Grazie alla mia famiglia, mamma, papà e mio fratello, perché di difficoltà ne ho avute tante in questo lungo percorso, ma ho sempre ricevuto da voi parole di conforto, per spingermi a non mollare di fronte agli insuccessi. Spero di avervi resi orgogliosi nonostante tutto.

Grazie agli amici di sempre per esserci stati nonostante la distanza. Ho sempre avuto la sensazione di avervi vicino. In particolare a Marco, perché ci siamo conosciuti appena nati e non c'è mai stato nulla che ci abbia fatto allontanare; sei sempre stato una punto fermo.

Grazie alla grande famiglia dell'AIA, di Torino e di Perugia, per avermi fatto maturare come uomo e avermi fatto incontrare quelli che sono diventati amici importanti. Il gruppo "Popera" che ha reso gli anni vissuti a Torino più leggeri e spensierati, prendendosi cura di me. In particolare a Gian Marco, che mi ha accolto dal primo giorno che ho varcato la porta della nuova Sezione. Se quel "cucciolo di coccodrillo" è diventato quello che è diventato, una bella fetta di merito va anche a te. E Simone, per un'amicizia che è cresciuta nel tempo, fino a diventare una colonna portante. C'eri nei giorni più neri sulle panchine del Poli ma anche in quelli di felicità, e questo ha fatto di te un riferimento costante.

Grazie agli amici conosciuti all'interno delle mura del Politecnico per tutte le esperienze vissute insieme, dalle giornate sopra i libri alle serate fuori, tra concerti, tisane e Gin Lemon. Se è vero che il percorso conta più della destinazione, posso dire che avete reso le tortuosità degli anni universitari un bellissimo viaggio.

Grazie a Sara, per gli insegnamenti e l'amore con cui mi ha accompagnato in questo risultato. Sei stata fonte di ispirazione nello studio e nella vita. Non avrei mai pensato di poter trovare una persona che riuscisse a far uscire tutto ciò che di buono c'è in me. Questo giorno speciale te lo dedico, perché lo abbiamo raggiunto insieme.