

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria meccanica e aerospaziale

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria aerospaziale

Tesi di Laurea Magistrale

Ottimizzazione aerodinamica di un motociclo da competi-
zione con HEPIA motorsport methodology



Relatori

prof. Lorenzo Peroni, prof. Patrick Haas

.....

.....

Candidato

Andrea Carlappi

Ottobre 2019

Sommario

Sommario.....	2
1 Intro	4
1.1 L'aerodinamica nei motocicli in rettilineo	4
1.2 L'aerodinamica in curva	4
1.3 Risultati noti.....	5
1.4 Dati e setup della galleria principale.....	6
Collegamento moto-balance.....	6
1.5 Dati e modelli di turbolenza per il codice di calcolo	9
2 Modelli CFD, analitici e sperimentali.....	9
2.1 Caratterizzazione del radiatore	9
Coefficienti e significato.....	11
Commenti risultati.....	14
Galleria per radiaori home made	17
2.2 Misure di velocità a valle del radiatore	18
Scelta della configurazione del pitot.....	19
Caratterizzazione della configurazione adottata	20
Interpolazione dati	20
Analisi dell'errore	21
Conclusione.....	24
3 Analisi dei punti critici e soluzioni	25
3.1 Flusso al di sotto delle piastre di sterzo	25
3.2 Allineamento presa d'aria	25
3.3 Cerchi lenticolari	26
3.4 Carenatura zona mani	26
3.5 Flusso posteriore al radiatore.....	28
3.6 Parafango.....	29
3.7 Riduzione scia tramite profili laterali.....	31
3.8 Modifica codino.....	37
3.9 Analisi al variare dell'angolo di picchiata.....	39

3.10	Elette anteriori.....	40
	Studio equilibrio statico longitudinale rigido.....	40
	Analisi cfd per ricavare <i>Dbody CL wing Mbody</i>	44
	Analisi risultati	44
	Configurazione dell'aletta.....	47
	Endplate optimization.....	49
4	[3]Test in galleria.....	51
4.1	Inizio test e primi risultati.....	51
	Posizione in sella.....	52
	Sommario primo giorno:.....	53
4.2	Test seconda giornata.....	54
	Controllo dei flussi interni.....	55
	Paramani a scopi aerodinamici	57
	Modifiche ai fianchi della carena.....	58
	Sommario secondo giorno	59
4.3	Test terza giornata.....	60
	Ali verticali posteriori.....	60
	Ali anteriori.....	64
	Sommario terzo giorno:	65
4.4	Test quarta giornata.....	65
	Variazione angolo di pitch.....	65
	Deviazione del flusso a valle dei radiatori (test 40).....	67
	Appendici orizzontali posteriori (test 41).....	68
4.5	Sommario finale.....	71
5	Conclusioni	71
5.1	Sviluppi futuri.....	72
6	Bibliography	73

1 Intro

La seguente trattazione è volta all'investigazione delle criticità aerodinamiche di un motociclo stradale da competizione, partecipante al campionato MOTO3 e in una sua variante al campionato studentesco MOTOSTUDENT.

La base di partenza è un motociclo interamente progettato e costruito dal team 2wheels polito ad eccezione delle carenature, che sono sì prodotte anch'esse dal team, ma con design e forma non ottimizzate direttamente sul motociclo di anno in anno. Motociclo che muta stagionalmente in geometrie per seguire i constrain del regolamento e le evoluzioni progettuali [1].

Numerosi sono stati gli studi effettuati in materia di aerodinamica sui motocicli da velocità, tuttavia la reperibilità dei risultati è davvero frammentaria e si limita a qualche dato e considerazione su quanto reperito su riviste specialistiche e articoli accademici.

1.1 L'aerodinamica nei motocicli in rettilineo

La relativamente bassa potenza dei piccoli propulsori 250 4t installati sul motociclo in esame e la presenza di lunghi rettilinei nei circuiti del campionato, portano in questi tratti il motociclo a lavorare alla velocità massima, quest'ultima fortemente influenzata dalla resistenza aerodinamica e i rapporti di trasmissione.

In questa configurazione il pilota può avere il tempo e la lucidità di mettersi in posizione ottimale e non cambiarla fino alla zona di frenata. Questa condizione è facilmente replicabile in galleria e nella analisi CFD e altrettanto facile da studiare analizzando i coefficienti aerodinamici allineati con gli assi moto, e le loro variazioni secondo le incidenze. Questo ultimo passaggio permette di capire se l'assetto aerodinamico trovato è in una condizione di equilibrio stabile o instabile.

1.2 L'aerodinamica in curva

In questo caso il pilota e la moto assumono configurazioni difficili da studiare analiticamente e ancor più sperimentalmente. Per quanto riguarda la parte analitica è possibile impostare in simulazione sistemi di riferimento rotanti che replichino le condizioni di accelerazione centripeta e di Coriolis presenti in una massa d'aria posta in rotazione e posizionando il modello pilota-moto in configurazione di piega, con pilota esposto dalla carena secondo il suo stile di guida. Sperimentalmente ciò che si fa è porre la moto in galleria nella medesima configurazione spiegata sopra, cercando di far investire il motociclo con una incidenza che possa replicare almeno approssimativamente le condizioni di vento in curva, con non poche difficoltà e imprecisioni.

1.3 Risultati noti

Dall'articolo [2] emergono due risultati che crediamo valga la pena sottolineare riguardo il comportamento in curva e i coefficienti aerodinamici in rettilineo. Infatti ci si aspetterebbe che una volta inclinata la moto, questa cominci a deportare creando una sorta di effetto suolo con la parte di carena più vicina al terreno, l'effetto che ci cerca di creare nel fondo delle autovetture di formula uno per intenderci. Tutto ciò invece non accade, anzi, dai risultati il pilota con la sua posizione esposta dalla carena tende a creare una sovrappressione in tale zona, aumentando la tendenza di questa a sollevarsi dal suolo e a porsi di nuovo eretta. In rettilineo invece i risultati confermano quelli che troveremo analiticamente e sperimentalmente più avanti ossia, il motociclo presenta una caratteristica leggermente portante.

Essendo questo il primo studio aerodinamico effettuato su questo motociclo la configurazione in rettilineo sarà dunque quella studiata, sia analiticamente che sperimentalmente e rappresenterà un punto di partenza per eventuali sviluppi futuri

1.4 Dati e setup della galleria principale

La galleria utilizzata per il test principale sul motociclo è subsonica di tipo chiuso, ricavata all'interno di un'ex galleria ferroviaria che garantisce una temperatura pressoché costante intorno ai 20°C in ogni periodo dell'anno, caratteristica molto apprezzata che consente correzioni stagionali minime sia dal punto di vista aerodinamico che meccanico nelle bilance.

È componibile e allestibile per diversi tipi di test, in particolare la configurazione per moto consta di una bilancia progettata costruita appositamente in loco dalla precisione di 0.01 N e un tappeto rotante per la movimentazione della ruota anteriore.

La velocità massima varia in base alla resistenza del mezzo in esame, in particolare nel nostro caso si aggira attorno ai 250 Km/h senza la presenza di reti per abbattere il livello di turbolenza, livello che si aggira attorno a valori abbastanza alti ma accettabili per il nostro caso, ossia l'1%

Collegamento moto-bilance.

Una volta che HEPIA ha fornito i dati geometrici della galleria, uno dei primi step è il posizionamento della moto in configurazione straight line, in modo tale che la ruota anteriore sia ben posizionata sul tappeto movimentato. Fatto ciò si è passati alla ricerca di eventuali punti dove poter sostenere la moto senza danneggiarla, avendo cura di minimizzare l'intrusività del supporto che da tali punti va alle bilance.

La soluzione definitiva a cui si è giunti quella riporta in Figura 1-1

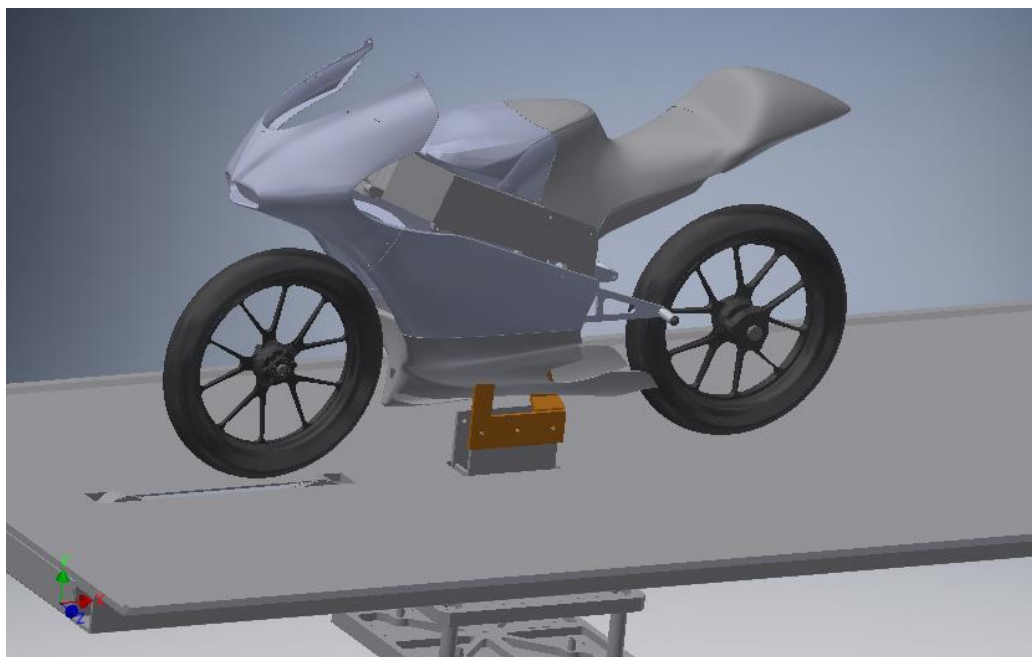


Figura 1-1: dettaglio del supporto moto sinistro in arancione

Si è poi passati a una verifica strutturale inserendo in un modello fem il componente sotto l'azione di forze aerodinamiche, ipotizzate utilizzando dati dello storico e del CFD e forza peso della moto.

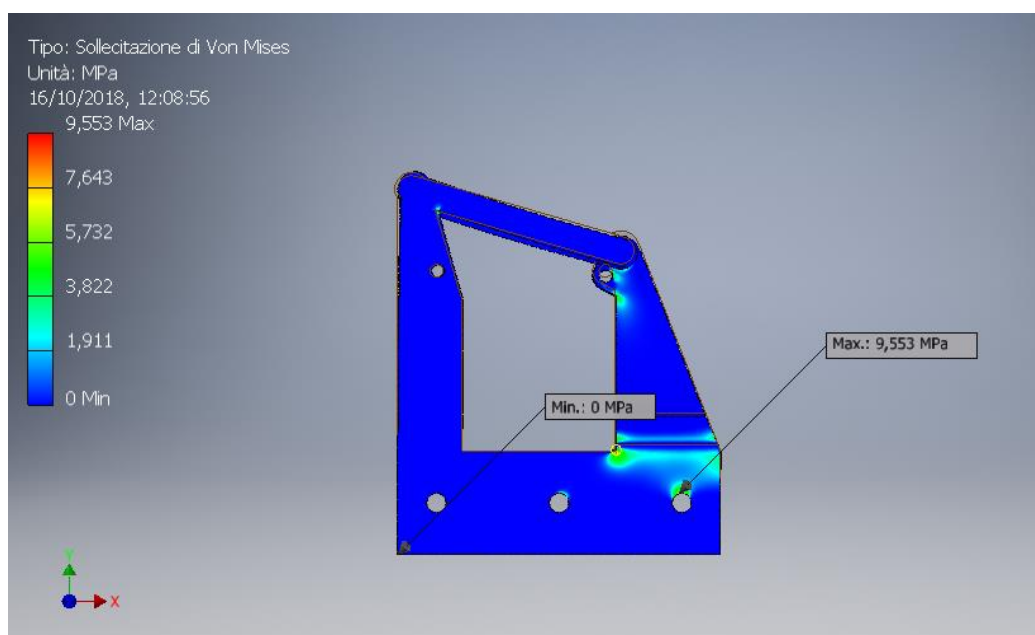


Figura 1-2 dettaglio sollecitazione massima e minima dell'analisi fem statica sul supporto moto

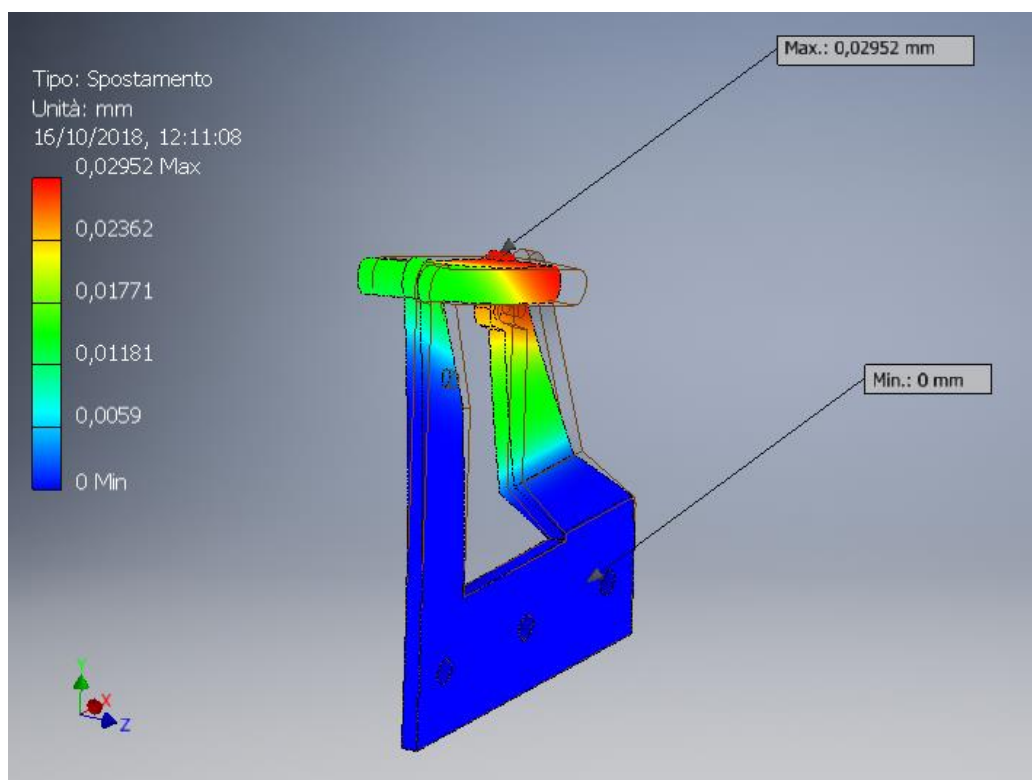


Figura 1-3 dettaglio displacement massimo e minimo dell'analisi fem statica sul supporto moto

Come si può evincere dalla Figura 1-2, 1-3 tensioni 9 MPa e deformazioni sono ampiamente sotto i limiti del materiale (acciaio 480÷1100 MPa) e di progetto, non è necessario dunque intervenire sul nuovamente sul design del supporto

1.5 Dati e modelli di turbolenza per il codice di calcolo

Nel software di calcolo è stato impostato un modello RANS, il quale richiede a sua volta un modello di turbolenza. Per le applicazioni automobilistiche e motociclistiche solitamente è raccomandato l'utilizzo del modello K-omega a discapito di un peggioramento della convergenza dei residui rispetto al modello K-epsilon, ma che permette di stimare meglio l'attrito a parete a velocità relativamente basse. Il codice richiede anche il livello di turbolenza nella zona di ingresso d'aria del dominio, assegneremo ad esso lo stesso valore presente in galleria, ossia pari all'1%.

La velocità del fluido è stata impostata a varie velocità facendo alcune prove, studiando la sua influenza sui coefficienti in studio, si è adottata in definitiva una velocità di 40 m/s.

La rotazione degli pneumatici è stata impostata assegnando una velocità tangenziale opportuna a tali porzioni di dominio, analogamente per la movimentazione virtuale del terreno.

2 Modelli CFD, analitici e sperimentali

Per cercare di avere una prima idea di quali fossero le problematiche di questo tipo di motociclo, si è sviluppato un modello CFD, grazie a cui è stato possibile ricavare un ordine di grandezza dei coefficienti aerodinamici del veicolo e analizzare nel dettaglio il comportamento del flusso.

L'analisi delle simulazioni per quanto possa essa descrivere opportunamente o meno le condizioni reali, è comunque in grado di dare una idea circa direzioni dei flussi principali, effetti di down-wash up-wash, spessore e uniformità della scia, suggerendo eventuali direzioni da prendere per ottenere i risultati di ottimo desiderati e nuove idee non inizialmente pervenute o considerate.

La modellazione CFD del motociclo consta di alcune semplificazioni numeriche e talvolta viene affiancato da semplici modelli analitici.

Uno di questi sicuramente è la caratterizzazione e modellazione del radiatore e misure di velocità su di esso nel vero in galleria.

In secondo luogo, in uno studio del momento di beccheggio, molto fastidioso per motocicli che viaggiano ad alte velocità, si sono fatte delle stime analitiche preventive per comprendere se fosse possibile controbilanciare tali momenti con l'aggiunta di forze (appendici aerodinamiche) in opportuni punti.

2.1 Caratterizzazione del radiatore

Si ipotizza che un radiatore possa essere simulato tramite un mezzo poroso, al fine di avere minori costi computazionali, che nel codice a sua volta venga modellato attra-

verso un campo di forze nella regione del fluido occupata dalla materia porosa. Il software chiede dunque una serie di coefficienti necessari al calcolo che andremo dunque ad analizzare e ricavare.

Coefficienti e significato

partiamo illustrando come sono espresse le forze di volume, per capire il significato dei coefficienti.

$$\begin{aligned}\vec{f}[N/m^3] &= [P] \cdot \vec{V} \\ [P] &= [P_v] + [P_i] \cdot \|V\| \\ [P] &= \begin{bmatrix} P_{xx_v} & 0 & 0 \\ 0 & P_{yy_v} & 0 \\ 0 & 0 & P_{zz_v} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{xx_i} & 0 & 0 \\ 0 & P_{yy_i} & 0 \\ 0 & 0 & P_{zz_i} \end{bmatrix} \cdot \|V\| \\ \vec{f} &= \begin{bmatrix} P_{xx_v} & 0 & 0 \\ 0 & P_{yy_v} & 0 \\ 0 & 0 & P_{zz_v} \end{bmatrix} \cdot \vec{V} + \begin{bmatrix} P_{xx_i} & 0 & 0 \\ 0 & P_{yy_i} & 0 \\ 0 & 0 & P_{zz_i} \end{bmatrix} \cdot \vec{V} \cdot \|V\|\end{aligned}$$

Sviluppando Lungo x

$$f_x = P_{xx_v} \cdot u + P_{xx_i} \cdot u \cdot \|V\|$$

Il radiatore permette il flusso solo lungo x per cui $\vec{V}$ diventa:

$$\vec{V} = \begin{pmatrix} u \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; e \|V\| = u$$

Dunque l'equazione (0.1) diviene

$$f_x = P_{xx_v} \cdot u + P_{xx_i} \cdot u^2$$

f_x lo calcoliamo sperimentalmente definendo il volume di caratterizzazione (forma della sezione del radiatore in figura) e calcolando la resistenza integrando sulla superficie della sezione di radiatore considerato

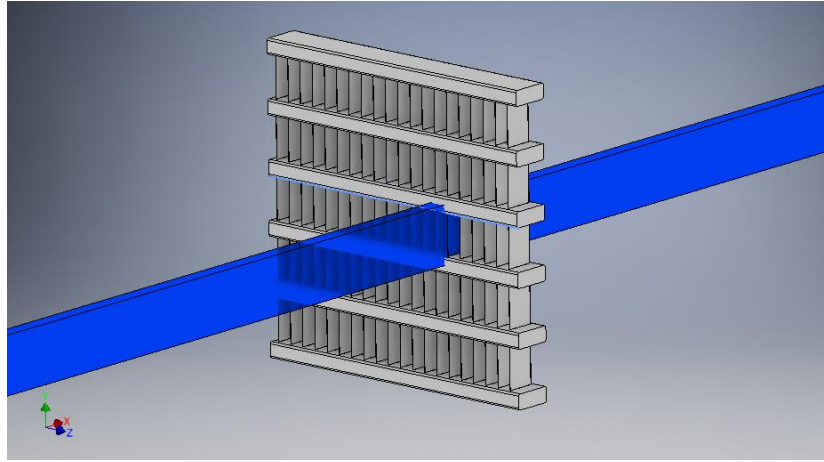


Figura 2-1 dettaglio macroscopico del modello CAD del radiatore, in blu la porzione di aria considerata nell'analisi CFD

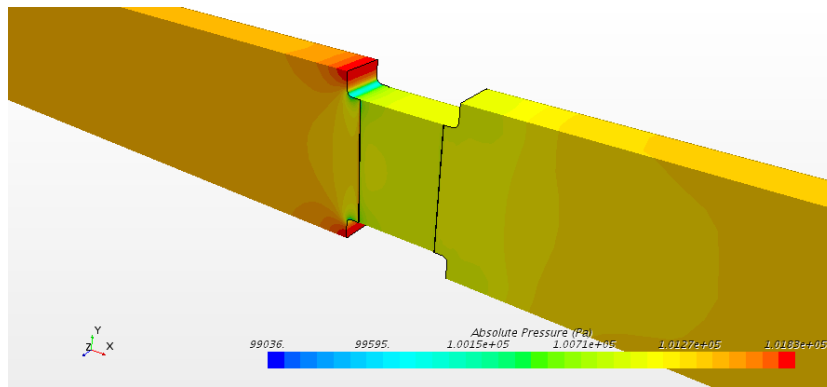


Figura 2-2 dettaglio della porzione di radiatore e di aria simulata, con rappresentazione cromatica delle pressioni del fluido sul contorno del dominio.

Non ci resta dunque che avviare la simulazione e ricavare il valore numerico di $drag_x$ quindi

$$f_x = \frac{drag_x}{volume} [N/m^3]$$

$$volume \stackrel{\text{def}}{=} volume \text{ considerato nella prova}$$

$$volume = 0.06 \cdot 0.0157 \cdot 0.04 \quad \text{dimensioni in } x \text{ y z}$$

Otteniamo

$$\frac{drag_x}{volume} = P_{xx_v} \cdot u + P_{xx_i} \cdot u^2 \quad \text{eq di nostro interesse}$$

Nota la forma del radiatore e la velocità di immissione dell'aria nella galleria di prova se ne calcola la sua resistenza $\frac{drag_x}{volume}$



Figura 2-3 galleria del vento per misurazioni di resistenza di mezzi porosi. Cerchiata in bianco la sezione di prova ove viene inserito il mezzo su cui si vuole effettuare la misura, ai lati le prese di pressione statica e a destra le tubazioni connesse al pitot interno per la misura della velocità

La validazione del modello aerodinamico del radiatore è stata condotta con la galleria aperta rappresentata in Figura 2-3. La parte centrale individua la test section (a sezione circolare di area A_{ts} di diametro $d_{ts} = 80 \text{ mm}$,) che consta di una apertura scorrevole ove inserire il radiatore da testare e due pipeline connesse a due sensori di pressione indipendenti in grado di misurare la pressione del fluido anteriormente e posteriormente al radiatore mediata su quattro punti, così da calcolarne le perdite di carico del fluido e dunque i coefficienti di perdita inerziale e viscoso che caratterizzano il radiatore.

Sulla sinistra si ha un divergente blando e un fan centrifugo che aspira aria dalla test section non che dal divergente stesso. A destra si ha un tratto a sezione costante usato come camera di tranquillizzazione e, successivamente, un cono di aspirazione.

Cerchiamo ora di ricavare le equazioni necessarie per confrontare i dati ottenuti dal CFD e quelli ricavati sperimentalmente.

Considerando la conservazione della quantità di moto sul volume di controllo definito da una sezione di radiatore possiamo ottenere:

$$P_a \cdot A_{ts} = P_b \cdot A_{ts} + D$$

Essendo la velocità costante prima e dopo la test section rimane:

$$\Delta P = \frac{D}{A}$$

Dalla equazione ricavata in precedenza per il CFD

$$D = (P_{xx_v} \cdot u + P_{xx_i} \cdot u^2) \cdot volume$$

Dunque:

$$\Delta P = (P_{xx_v} \cdot u + P_{xx_i} \cdot u^2) \cdot \frac{volume}{A_{ts}}$$

Abbiamo dunque il materiale necessario per confrontare tutte le considerazioni fatte sin ora sui modelli CFD e le misurazioni per quanto concerne i radiatori. Tutti i risultati saranno confrontati nel piano $\Delta P - V$ usando le relazioni appena ricavate.

Commenti risultati

Le prove sperimentali sono state condotte sul radiatore prendendo come zona di test tre differenti zone, in primis per avere più curve confrontabili ed accorgerci di eventuali errori di setup e in secondo luogo per avere dati a seconda del danneggiamento delle lamelle dello scambiatore.

Si poi stampata e testata una sezione di radiatore pari a quella semplificata per l'uso nel CFD per le motivazioni che spiegheremo a seguito.

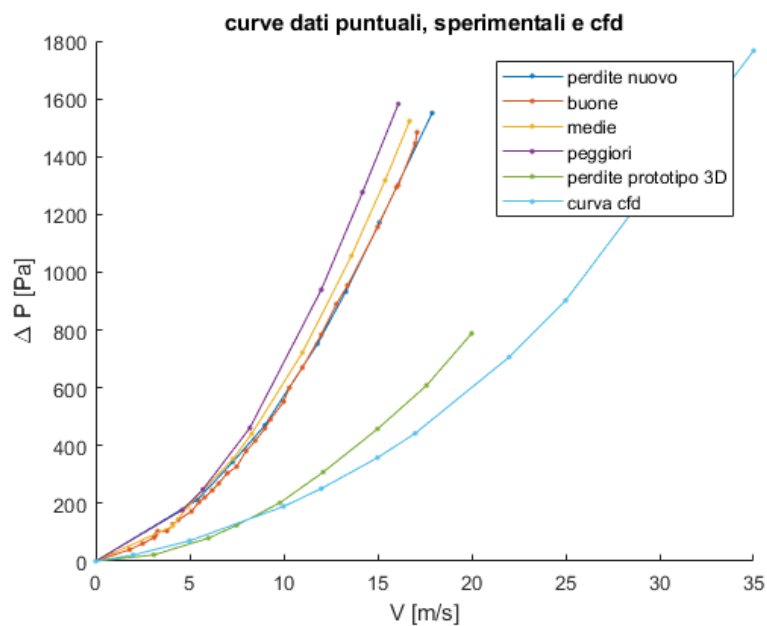


Figura 2-4 dati puntuali sperimentali connessi da tratti lineari nel piano pressione velocità

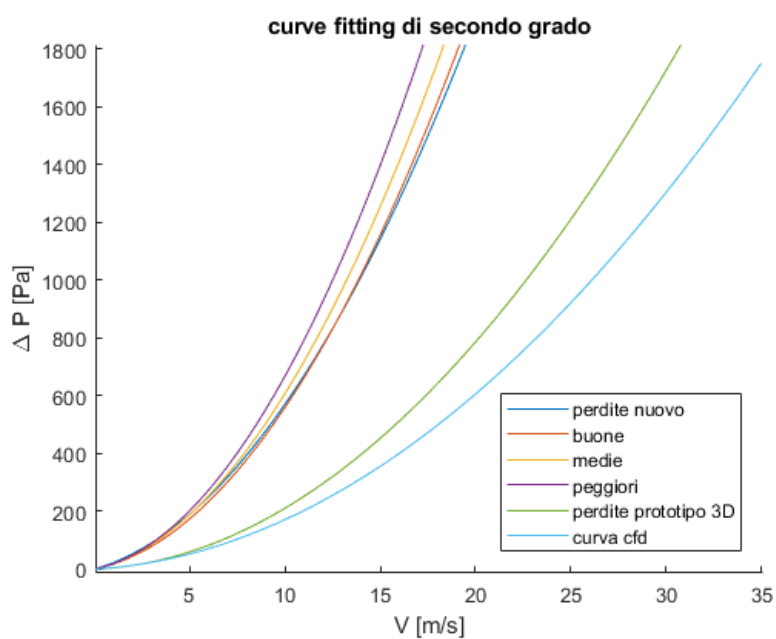


Figura 2-5 polynomial fitting dei dati sperimentali nel piano pressione velocità

Le curve in Figura 2-5, 2-6 non necessitano di particolari presentazioni, rappresentano la perdita di pressione al variare della velocità del flusso in ingresso la prima utilizzando i dati grezzi e la seconda interpolando tali dati con curve di secondo grado imponendo il passaggio per l'origine.

A colpo d'occhio si evince come vi siano di fatto due gruppi di curve, le più alte sono le sperimentali al variare delle condizioni del radiatore; più la test section è danneggiata e più le curve si elevano a perdite di pressione maggiori a parità di velocità, come ci aspettavamo.

La seconda famiglia di curve, quella più in basso invece rappresentano test CFD e sperimentali fatti sul modello semplificato, il modello semplificato in questione era stato sviluppato nelle precedenti sezioni per stimare i coefficienti aerodinamici del mezzo poroso, visto il suo discostarsi dai dati sperimentali della prima famiglia si è deciso di costruire tale sezione in prototipazione 3D e provarla sulla stessa galleria aperta, per capire se l'errore fosse dovuto a una geometria troppo semplificata oppure a un errato inserimento della rugosità superficiale nel modello cfd.

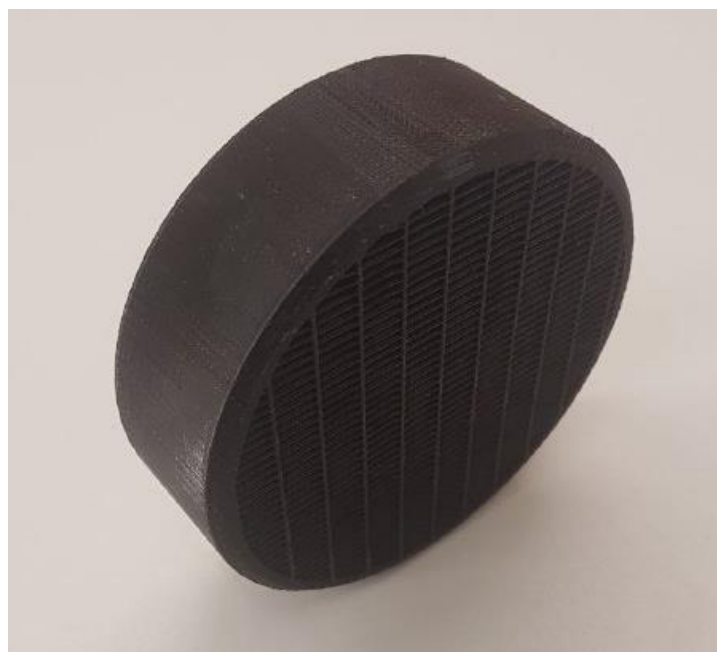


Figura 2-6 disco inseribile nella section test della galleria.

I test su questa ultima configurazione stampata in 3D, assieme all'analisi dei coefficienti hanno denotato come i due dati siano effettivamente ravvicinati, confermando di fatto che la geometria troppo semplificata ha portato a una sottostima delle curve, ma che il metodo CFD si presta allo scopo di stima dei coefficienti a patto che il CAD rappresenti nel modo più veritiero possibile il reale.

Si ripotano in seguito i coefficienti raggruppati nel grafico in figura.

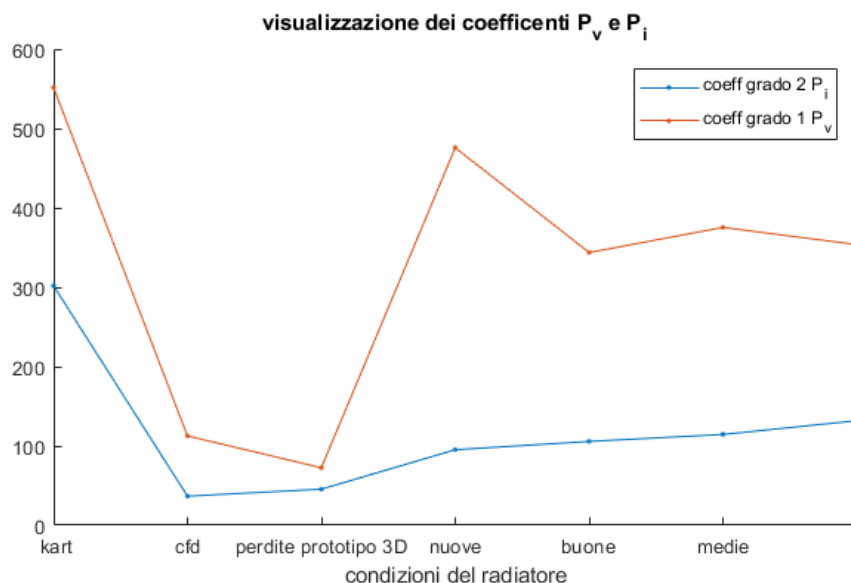


Figura 2-7 grafico in cui si rappresentano i coefficienti di primo e secondo grado dei polinomi che saranno poi fondamentali nel calcolo dei coefficienti del mezzo poroso. A sinistra si riportano i valori ricavati tramite la galleria home made che verrà presentata a seguito, spostandosi verso destra invece i coefficienti del CFD, prototipo stampato e radiatore reale al variare delle condizioni.

Il primo dato a sinistra è un dato sperimentale ricavato in una galleria autocostruita in un secondo momento assieme a un collega, testandola e ricavando il dato su un radiatore da gokart. Lavoro svolto in parte per interesse personale e in primo luogo come verifica quanto meno dell'ordine di grandezza ricavato dalle due diverse gallerie, vista la somiglianza geometrica riscontrata con i precedenti mezzi radianti studiati.

I risultati sembrano dunque restare in modo soddisfacente in un intorno dei dati ottenuti in precedenza, lasciando intuire che nonostante il basso costo dei componenti utilizzati per la galleria artigianale, siamo comunque in grado di ricavare dati di tutto rispetto. Potremo asserire ciò con assoluta certezza nel caso riuscissimo a reperire nuovamente i mezzi radianti usati nei precedenti test e ritestarli nella nuova galleria homemade.

Ciò risulta difficile, dato il costo dei radiatori e per il fatto che i motocicli in questione sono costantemente utilizzati e non possono rimanere fermi nella stagione di gara per l'intera durata dei test.

Galleria per radiaori home made

Concettualmente non è nulla di diverso da quanto visto precedentemente

La differenza sostanziale sta nel fatto che la strumentazione quali, pitot, tubazioni, motori, struttura, alimentatori e trasduttori di pressione hanno un costo complessivo di circa un decimo rispetto a una strumentazione di laboratorio.

Tutto ciò grazie all'uso di Arduino, un semplice PC con cui farlo comunicare e la produzione di componenti con una stampante 3d personale.



Figura 2-8 galleria auto costruita analoga a quella di laboratorio che utilizza componenti elettronici per aeromodellismo

2.2 Misure di velocità a valle del radiatore

Capire quale è la velocità del fluido che attraversa il radiatore risulta importante per diversi fattori:

- Permette di capire il profilo di velocità attraverso la sezione di uscita (analogamente di entrata) fornendo indicazione di eventuali punti critici nello stesso, zone morte, portata insufficiente al raffreddamento.
- I profili di velocità possono essere confrontati con le analisi CFD in sede di validazione.

Le misure di velocità verranno effettuate appena a valle del radiatore questo perché la sua geometria assicura in uscita un flusso allineato alla normale della superficie d'uscita. Sapere la direzione del flusso è importante per misurare accuratamente la velocità tramite soli due parametri puntuali di pressione, totale e statica.

Sarà necessario applicare semplicemente il teorema di Bernulli risalendo alle relazioni per il tubo di pitot.

Scelta della configurazione del pitot

Si sono analizzate diverse configurazioni di pitot da installare, le configurazioni sono state stampate in prototipazione rapida e testate in una piccola galleria del vento subsonica fino a valori di velocità coerenti con l'utilizzo del radiatore.



Figura 2-9 alcune delle configurazioni stampate in 3d e testate preliminarmente in galleria

La particolarità di questa sonda è che deve essere ancorata al radiatore stesso in una zona che in alcuni punti presenta spazio a valle davvero risicato, difficilmente dunque le letture saranno indisturbate dal calettamento del pitot stesso. Ciò non ci preoccupa, perché data la geometria fissa dello strumento, ci aspetteremo che tale errore sia introdotto in maniera sistematica, permettendoci di individuarlo e cancellarlo attraverso delle curve di taratura.

La velocità del flusso nella test section della galleria è nota tramite un sonda analoga inclusa nella strumentazione della galleria.

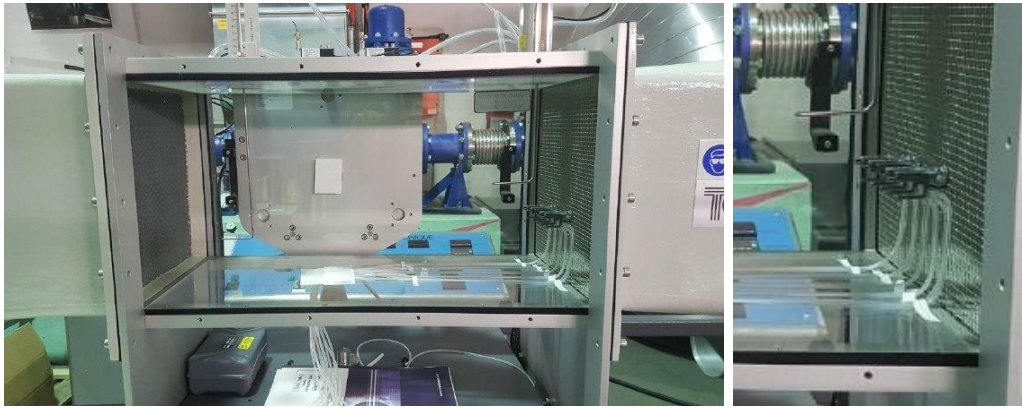


Figura 2-10 test section della galleria utilizzata, il flusso entra da sinistra passando attraverso un honeycomb, e arriva alla schiera di sonde a destra.

Caratterizzazione della configurazione adottata

Una volta dunque scelta la configurazione del pitot si è cercato la curva di taratura dello stesso, stampando 5 strumenti identicamente prodotti.

Ognuno di questi è stato posto poi in galleria per le misurazioni di pressione, disponiamo dunque due 5 misure di ΔP per 11 misure di velocità del flusso nella test section, 55 punti totali, non sufficienti per una accurata analisi statistica degli errori ma in grado perfettamente di dare un ordine di grandezza di questi.

Una volta ricavata la curva di taratura saremo in grado di eliminare gli errori sistematici e calcolare invece quello randomico da attribuire a:

- Difetti di produzione della sonda dovuti alla prototipazione rapida
- Disallineamento tra sonda e flusso

Interpolazione dati

Si riporta anzitutto i dati sperimentali graficati nel piano pressione velocità della corrente.

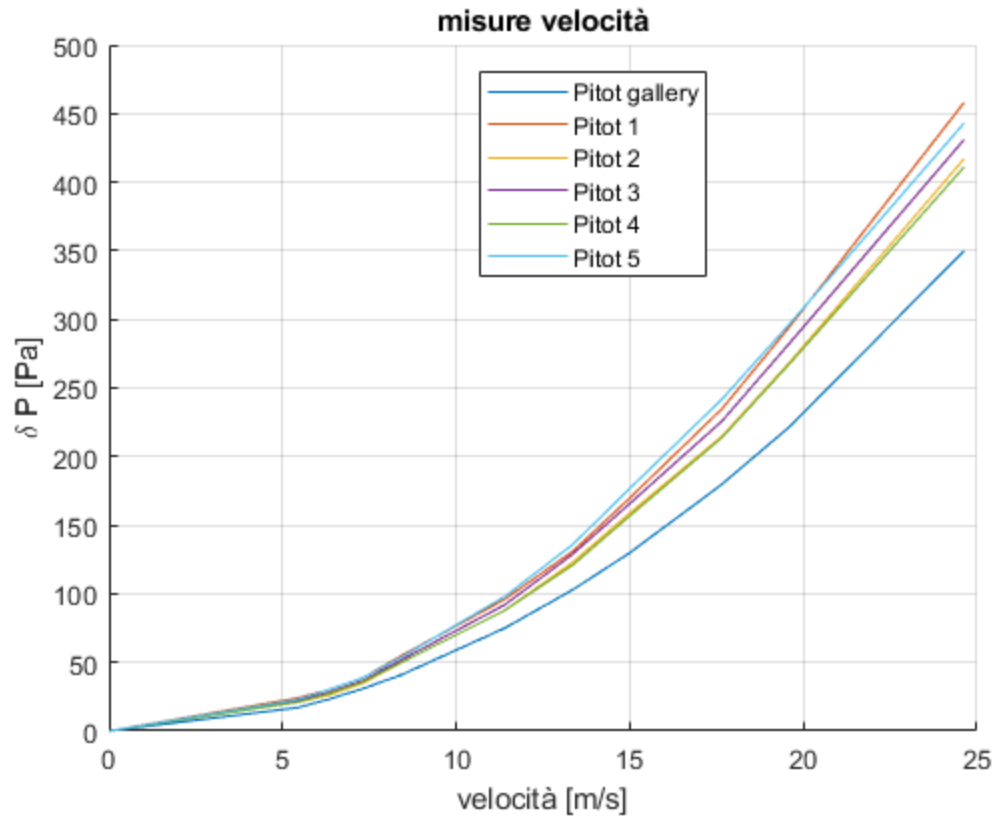


Figura 2-11 in basso la curva sperimentali del pitot della galleria in alto invece le curve dei pitot stampati in prototipazione rapida.

Vogliamo dunque ricavare la curva di taratura del nostro strumento, ipotizzando non a caso una interpolazione di secondo grado possiamo dunque scrivere:

$$\Delta P = b \cdot V^2$$

Dove b è il coefficiente di secondo grado interpolante i dati medi

Coerentemente con la fisica del problema possiamo scrivere:

$$b = k \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho$$

Dove k è la costante di taratura, slegata dalle variazioni di densità

La relazione che ci permetterà di trovare la velocità attraverso il nostro strumento sarà dunque:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{k \cdot \rho}}$$

Analisi dell'errore

Con gli opportuni calcoli possiamo introdurre l'errore percentuale dei nostri strumenti confrontati con la curva del pitot della galleria e l'errore dopo la taratura.



Figura 2-12 errore percentuale di ogni pitot confrontato con la curva del pitot della galleria

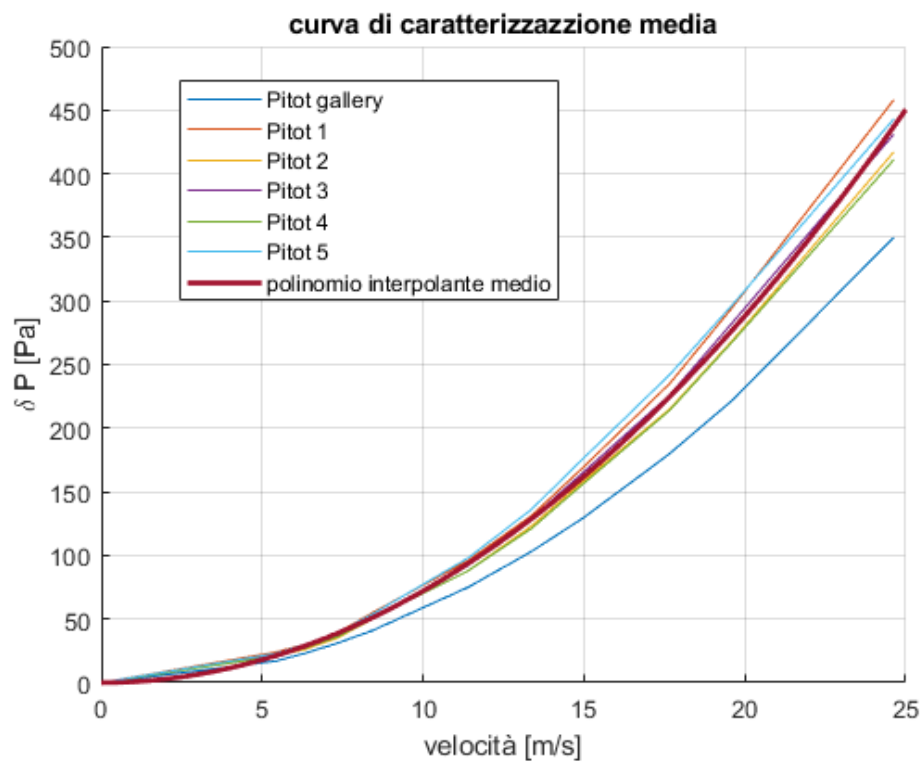


Figura 2-13 curva di taratura media dei pitot utilizzando i dati sperimentali

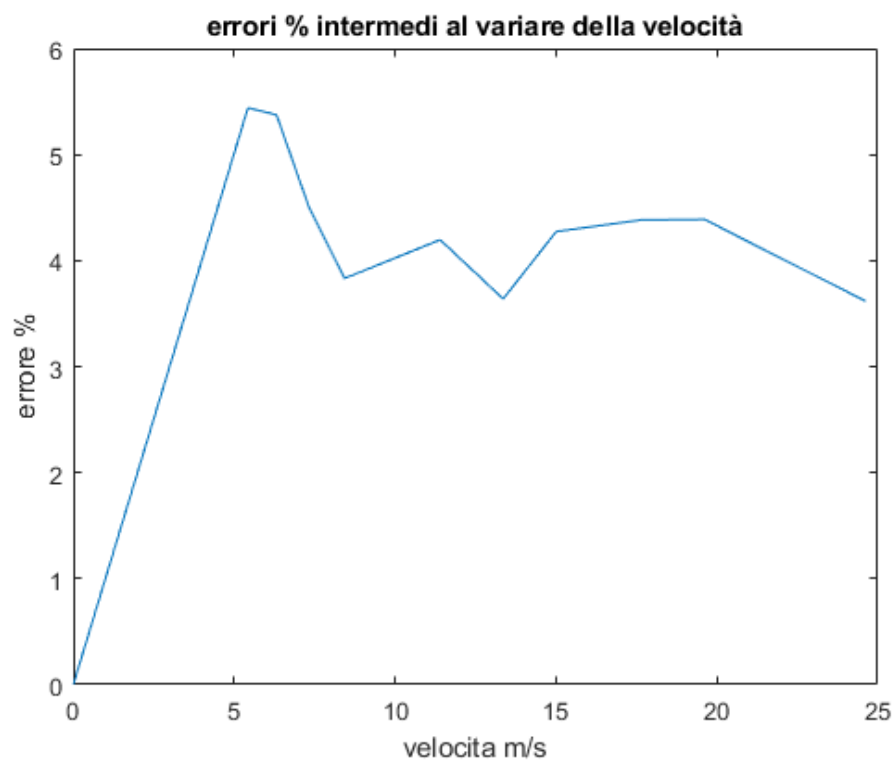


Figura 2-14 errori percentuali dello strumento calcolati dalla curva di taratura dello strumento stesso

Nell'ultimo grafico è visualizzato in valore assoluto l'errore commesso mediamente dei nostri pitot utilizzando i valori di taratura nel misurare la velocità, al variare della velocità stessa, tale errore rimane circa intorno al 6% a velocità medio basse decrescendo poi all'aumentare della stessa, grazie alla relazione quadratica che la lega alla pressione.

Conclusione

Se siamo dunque interessati allo studio del profilo di velocità a valle del radiatore possiamo pensare di stampare una serie di pitot e ricostruire i dati tramite la taratura ottenendo delle misure di comunque buona approssimazione con notevole risparmio in termini economici rispetto l'uso di pitot convenzionalmente prodotti o altri tipi di strumentazione altrettanto costosa come ad esempio schiere di anemometri a filo caldo.

3 Analisi dei punti critici e soluzioni

Grazie alla grande esperienza del centro nella risoluzione dei problemi aerodinamici, anche nei motocicli, si sono individuati e analizzati i punti più critici aerodinamicamente parlando.

In particolare la zona aperta al flusso al di sotto delle piastre di sterzo, la zona mani scoperta dalla carena anteriore, il disallineamento della presa d'aria e il cattivo controllo del flusso posteriormente al radiatore.

Successivamente si è anche studiata una modifica del parafango anteriore, riducendo l'aria che passa tra forcelle e parafango stesso e infine l'inserimento di due profili laterali per il controllo della scia, uniti a modifiche di inclinazione e forma del codino, volte a mitigare l'effetto down-wash sull'asse centrale.

3.1 Flusso al di sotto delle piastre di sterzo

L'apertura necessaria a far passare le forcelle e permettere allo sterzo di ruotare attorno al suo asse, a causa della sovrappressione creata dalla presenza del radiatore, vede una gran quantità d'aria passare da sotto il cupolino alla parte superiore interna della moto.

Flusso che investendo una gran parte dei componenti meccanici e il pilota, contribuisce al peggioramento della capacità penetrante del motociclo.

Si è dunque cercato di sviluppare un sistema che potesse chiudere tale apertura senza ostacolare il normale funzionamento dello sterzo. La soluzione proposta consta di due parti in grado di scorrere su se stesse, una solidale al cupolino e l'altra mobile connessa alle forcelle

3.2 Allineamento presa d'aria

Tramite l'analisi CFD si è notato come la presa d'aria sia disallineata rispetto al flusso, ciò porta sicuramente a resistenze indesiderate nel condotto a valle e toglie qualsiasi effetto benefico dell'imbocco, dunque si è riprogettata anche questa zona aggiungendo in prototipazione rapida dei labbri posti alla giusta angolazione.

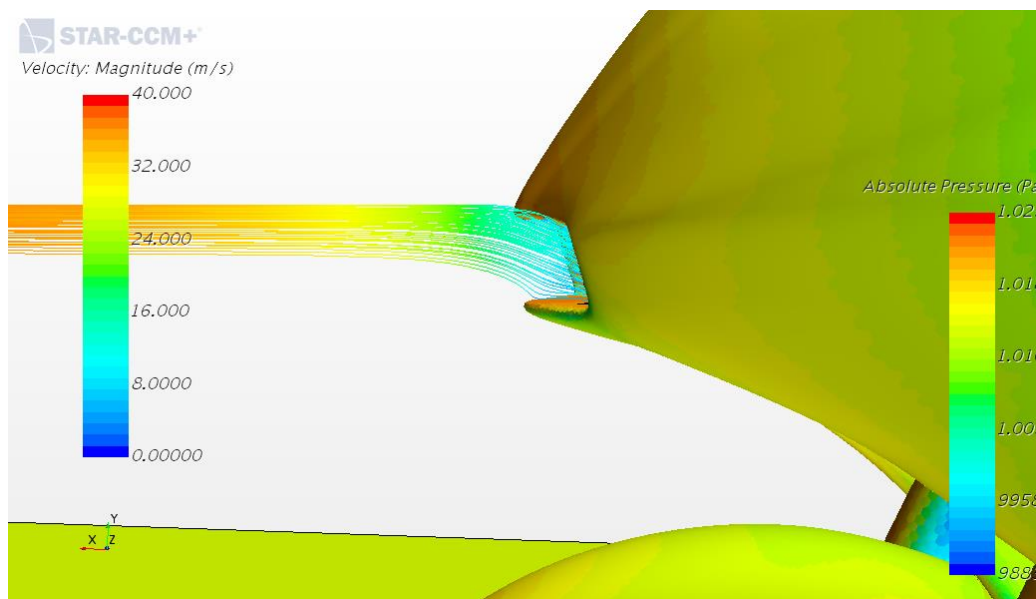


Figura 3-1 dettaglio della presa d'aria anteriore con le linee di flusso a indicare il cattivo orientamento della presa.

La soluzione a questo problema verrà inglobata nella carenatura della zona mani attraverso una bombatura del cupolino e l'aggiunta di un labbro stampato, che affronteremo nei capitoli successivi.

3.3 Cerchi lenticolari

le razze in rotazione studiate solitamente dal solo punto di vista strutturale potrebbero avere una influenza non trascurabile per quanto riguarda l'aerodinamica, la resistenza delle razze in rotazione infatti creano un momento resistente che si oppone al moto delle stesse.

Possibile dunque che la loro presenza influenzi negativamente il SCx del motociclo, soprattutto per quanto riguarda la ruota anteriore, ove la velocità è più alta non essendo in scia alla moto stessa

3.4 Carenatura zona mani

Come si nota in Figura 3-2, le mani del pilota sono investite fortemente dal flusso a monte, ciò crea un forte scia turbolenta che rende disuniforme la scia, oltre al fatto che i guanti e il braccio del pilota non sono assolutamente strutturati per minimizzare la resistenza aerodinamica.



Figura 3-2 superficie esterna allo strato limite (in blu) dove è possibile notare la grossa struttura vorticoso a valle della mano del pilota

Data la vicinanza delle tre parti (zona mani-presa d'aria) si è preferito studiare una soluzione che risolvesse e considerasse entrambe, questo perché la forma di una avrebbe comunque interferito con la geometria dell'altra.

La forma della nuova carenatura è dunque stata creata cercando di far sì che non disturbasse il flusso nella sua normale direzione di avanzamento, ma che soltanto lo dividesse evitandogli di impattare contro la mano.

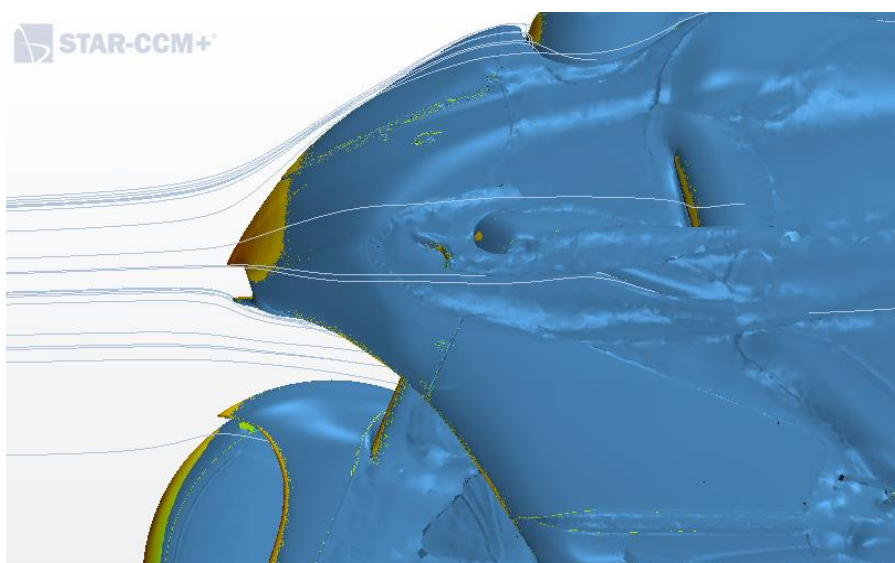


Figura 3-3 dettaglio laterale dell'esposizione del manubrio alla corrente esterna e il formarsi di grossi disturbi a valle.

L'idea è stata soggetta a modifiche durante le prove, adottando due diverse configurazioni, per questo si rimanda la descrizione del componente presa-paramani alla sezione test, è possibile comunque notare una vista frontale di una delle due configurazioni in figura 3-3 nella sezione 3.6.

3.5 Flusso posteriore al radiatore

Una volta che il flusso è uscito dal radiatore si trova, in condizione attuale, a impattare contro il motore. L'idea è dunque quella di deviarlo sui lati in maniera più pulita possibile, dove può percorrere lo spazio tra carena e telaio in maniera meno disturbata grazie alla presenza di minor numero di ostacoli su tale percorso.

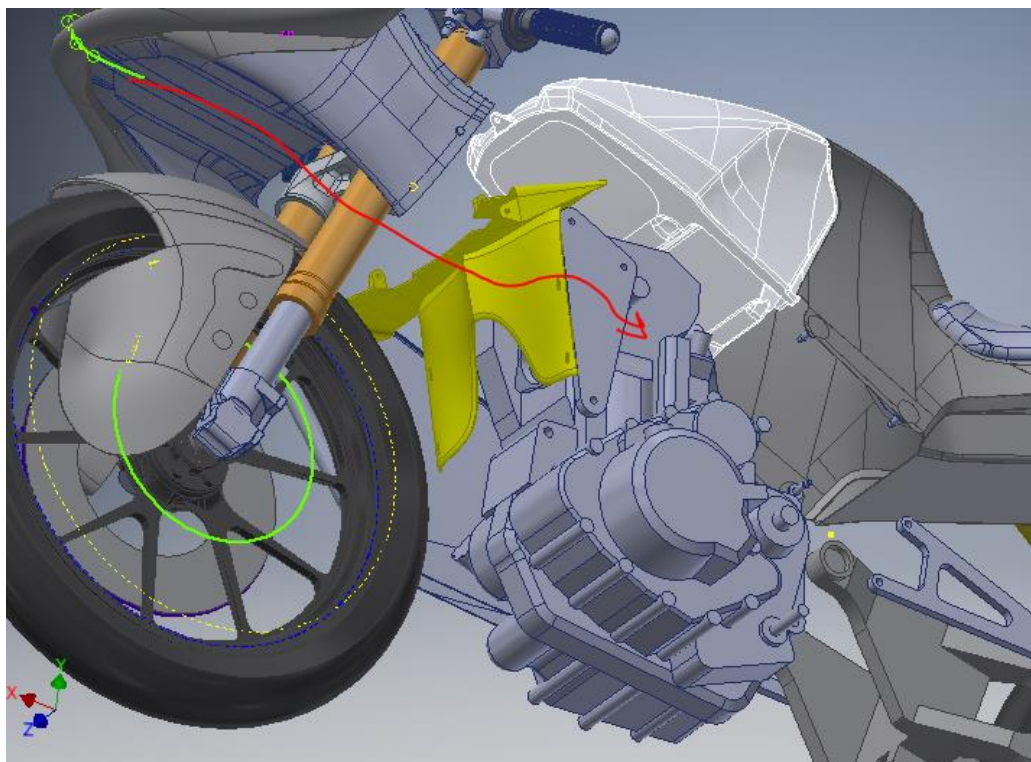


Figura 3-4 immagine di dettaglio della paratia motore in giallo, in rosso invece il percorso ipotetico che si vorrebbe come effetto della paratia, ossia evitare di impattare direttamente e velocità sostenuta conto il motore.

Con questa soluzione è anche impedito al flusso di deviare verso l'alto, riconducendosi al discorso fatto per la chiusura tra piastre e cupolino.

3.6 Parafango

Come è possibile notare in figura 3.6 v'è un grande spazio tra parafango e sezione frontale della ruota, il flusso d'aria in esso incanalato è soggetto ad alte perdite per attrito dovute all'inevitabile aumento della superficie bagnata con conseguente aumento di attrito, ulteriore massa d'aria che va poi in oltre a impattare contro la zona radiatore.

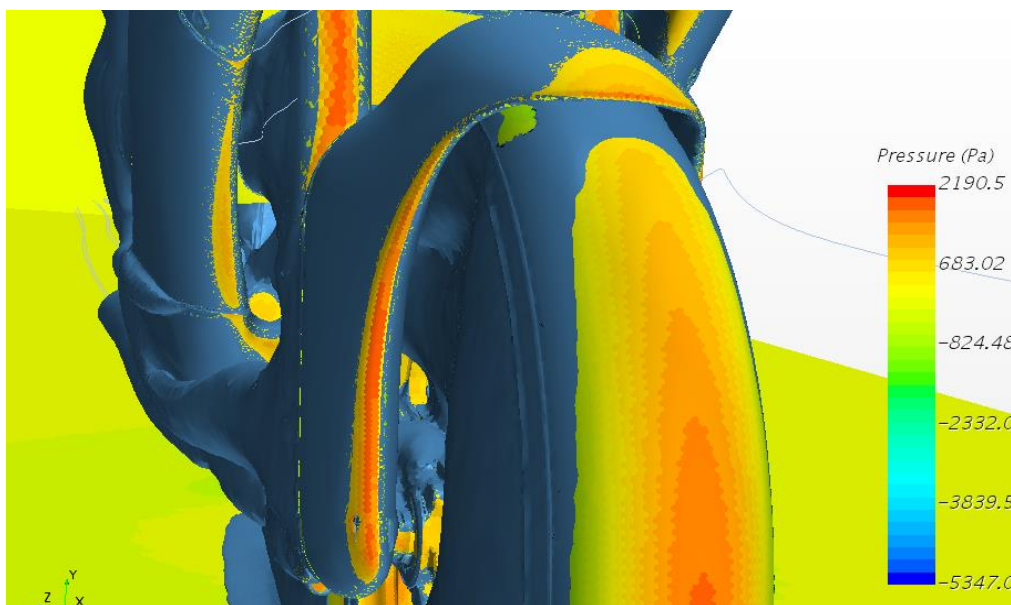


Figura 3-4 dettaglio del parafango anteriore, di come una grande massa di aria passi tra parafango e cerchio

Non essendo riscontrati problemi di raffreddamento, al contrario una ridondanza dello stesso, è preferibile deviare questa massa d'aria verso i lati onde evitare aggravii del SCx per quanto esposto sopra.

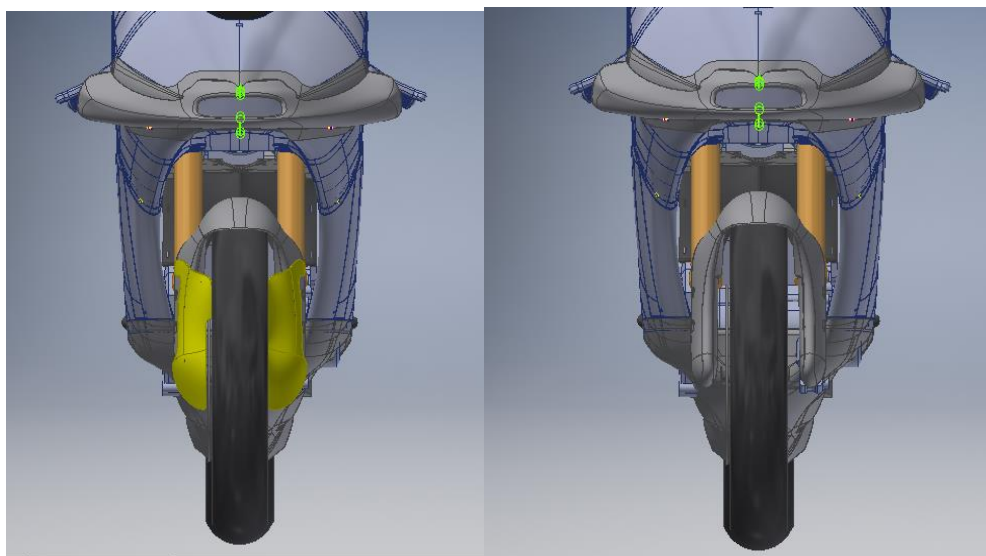


Figura 3-4 dettaglio in vista frontale del cover tra parafango e cerchio anteriore, con e senza.

Come si può notare nella figura soprastante la configurazione adottata è volta a modificare la forma del parafango occultando tale zona, in tal modo dunque dovremmo riuscire a deviare il flusso dal bagnare una buona parte del cerchione e parti meccaniche.

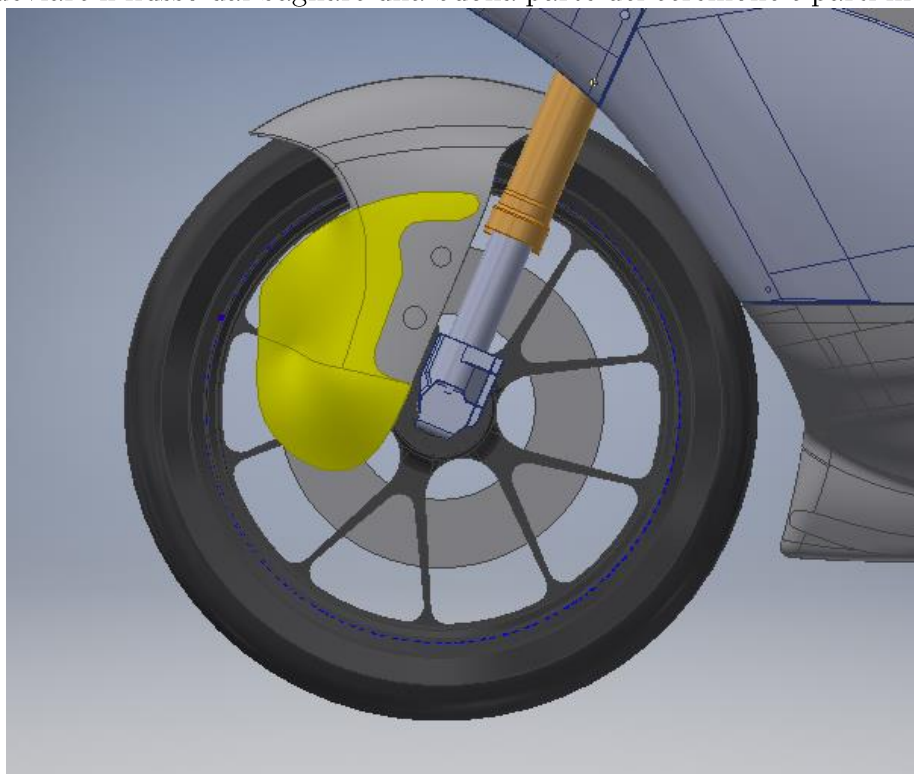


Figura 3-5 vista laterale dell'elongazione del parafango

Il regolamento prevede che il cerchio anteriore debba essere visibile al 100% escluso il parafango e forcelle, l'appendice nel caso dovesse essere considerata non inclusa nella

definizione di parafango, essa copre solo le razze e non il cerchio nella vista laterale, rimanendo dunque in quanto definito dal regolamento.

3.7 Riduzione scia tramite profili laterali

HEPIA si è occupata anni orsono della risoluzione di diverse problematiche di ottimizzazione per motocicli stradali. Una riduzione del c_x è stata riscontrata in seguito a questi studi apponendo dei profili aerodinamici lateralmente al codino del pilota in posizione verticale.

Lo scopo è quello di prendere flusso pulito all'esterno dello strato limite e inserirlo nella scia, così da ridurre il volume e aumentandone i valori di pressione media.

la soluzione dunque ingegnerizzata al caso del nostro motociclo, in accordo con il regolamento generale del campionato italiano e specifico moto3 è rappresentato dalla seguente soluzione in figura 3-6.

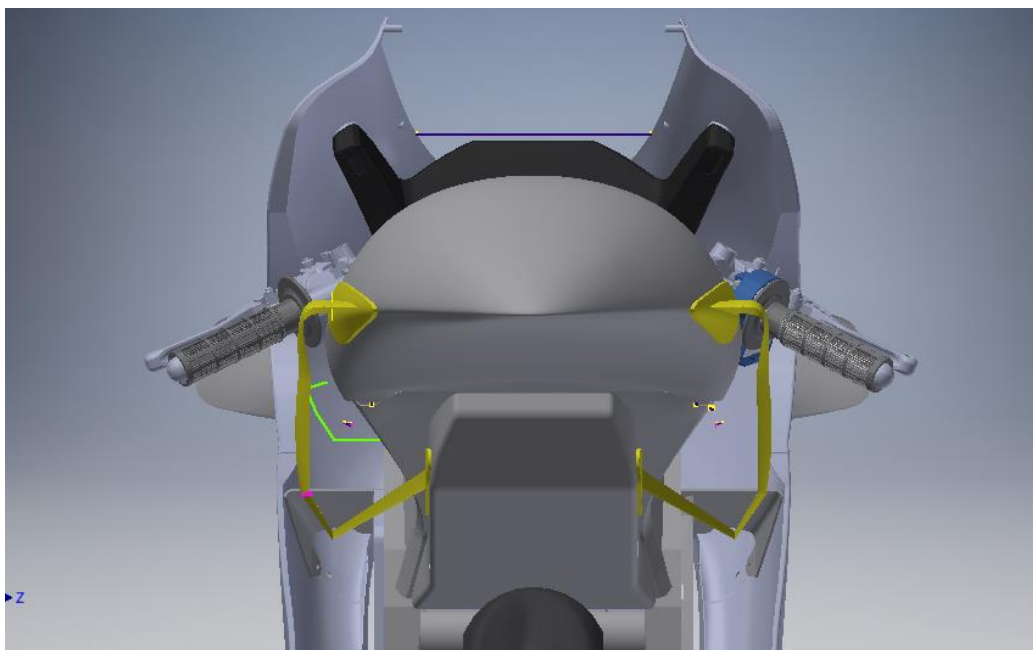


Figura 3-6 vista posteriore concettuale delle ali verticali posteriori il cui scopo sarà quello di richiudere il flusso appena dietro la motocicletta. Le superfici aerodinamiche sono consentite a patto che siano contenute nella superficie frontale delle carene.

Tramite precedenti studi condotti su motocicli simili, si è notata una perdita di efficacia del sistema a seconda di chi fosse a pilotarla, per poter trovare l'ottimo geometrico per ognuno si è dunque pensato di condurre lo studio con delle appendici che fossero variabili in calettamento.

La variazione angolare è affidata a dei servomotori connessi a un controllore azionabili direttamente a galleria accesa permettendo di effettuare ogni variazione a galleria accesa, con notevole risparmio in termini di tempistiche.

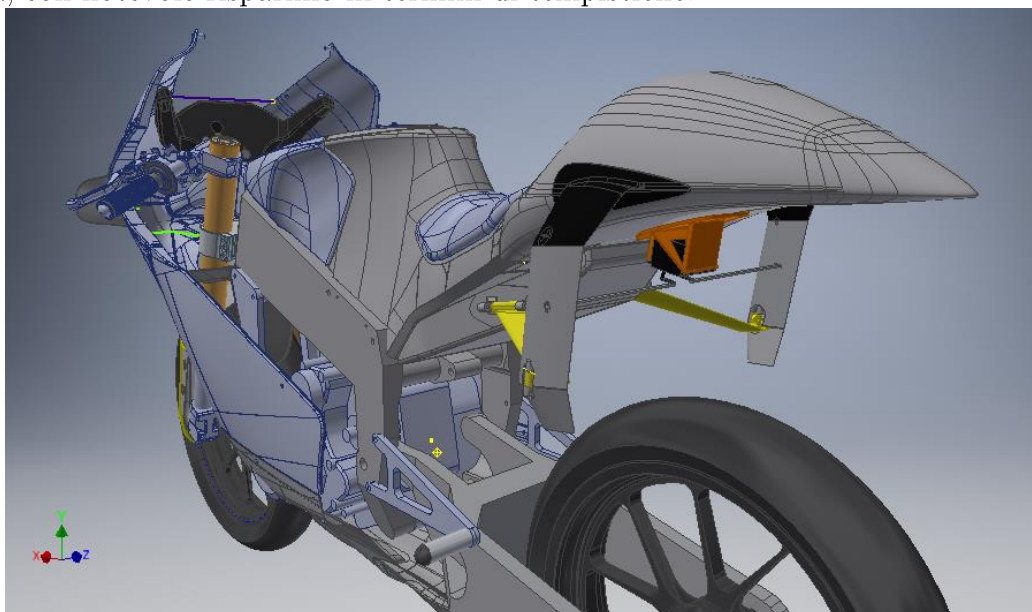


Figura 3-7 vista prospettica posteriore delle appendici alari posteriori variabili in calettamento tramite i servomotori montati nella struttura evidenziata in arancione

Entriamo ora nel merito di come sono state progettate tali appendici e la strumentazione per poterle movimentare a piacimento.

Tramite analisi CFD si è ricavata la velocità e la direzione del flusso in modo da scegliere rispettivamente, profilo, in base al numero di Reynolds, e incidenza dello stesso.

Di grande aiuto è stata la visualizzazione del flusso nella zona di posizionamento mediante le scene vettoriali rappresentate nelle figure seguenti

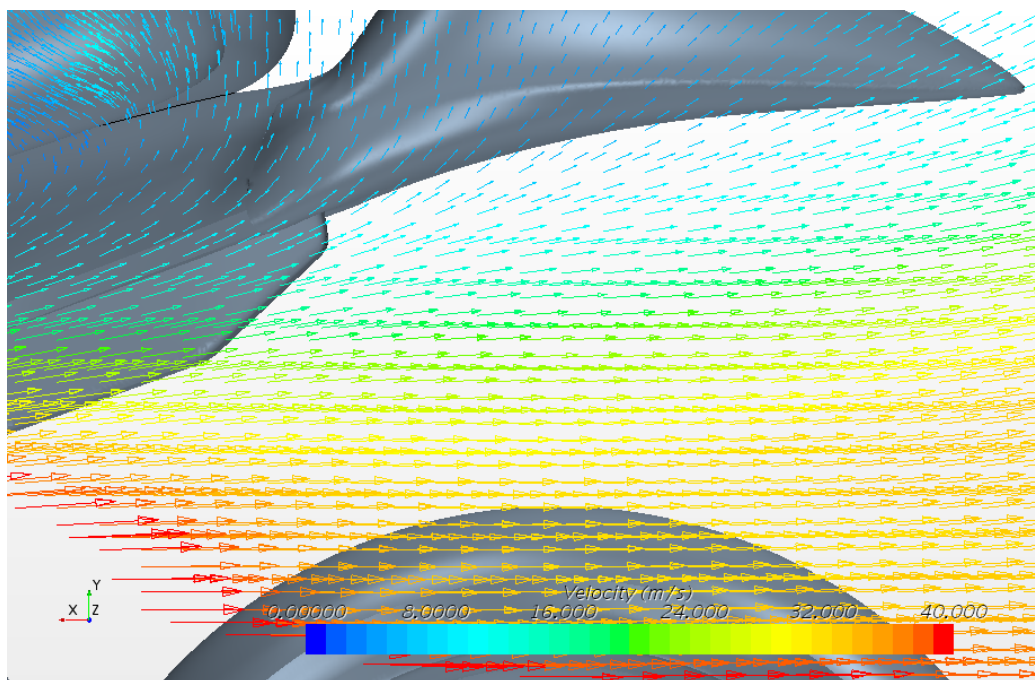


Figura 3-8 In questa ultima immagine è rappresentata la scena vettoriale di un piano posto nella zona di posizionamento dell'ala verticale per verificarne l'effettiva posizione rispetto la corrente esterna, di grande aiuto per la comprensione del flusso e fattibilità delle alette.

È possibile notare come su quasi tutta la zona di interesse vi sia una corrente molto energica, caratterizzata da velocità che vanno da 16 a 40 metri al secondo.

A seguito una visualizzazione vettoriale analoga ma con vista dall'alto con un piano di sezione orizzontale intermedio ella zona retrostante al pilota.

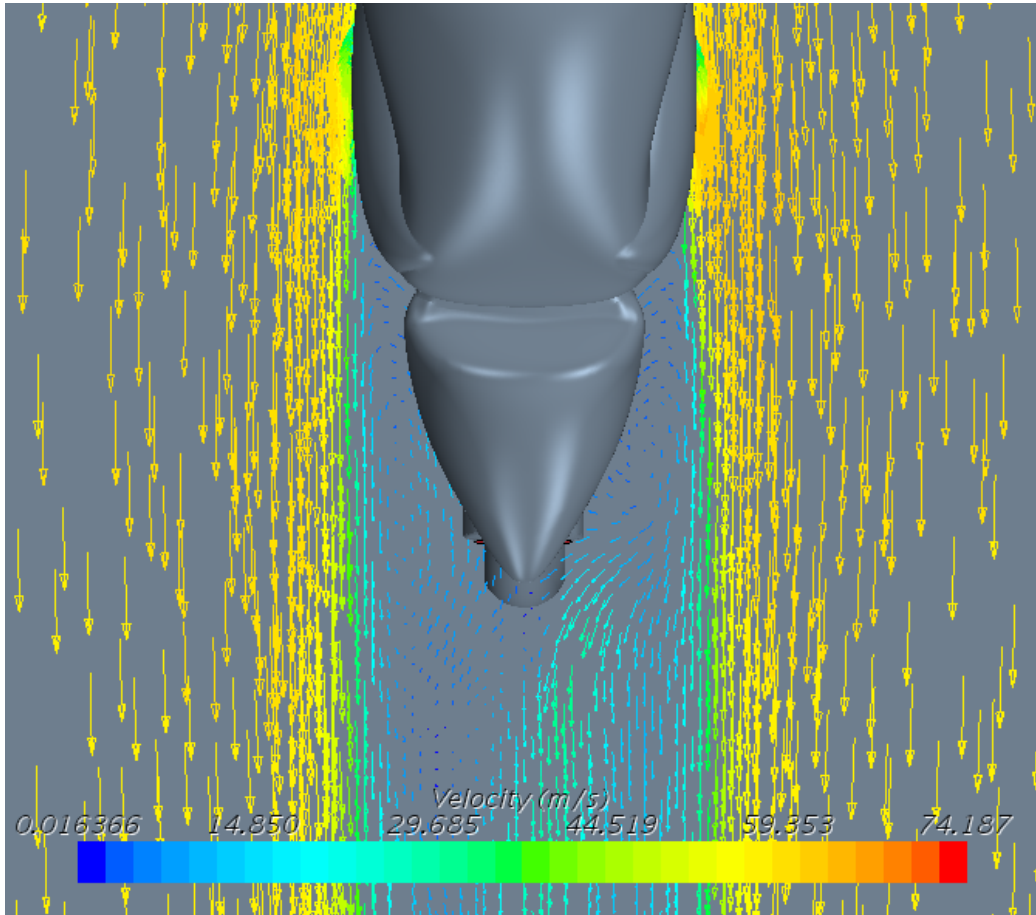


Figura 3-9 vector scene ricavata dall'analisi CFD del flusso esterno ad alta energia (velocità) che cercheremo di portare nella zona interna

La configurazione è stata scelta cercando di mettersi con un certo scarto di sicurezza dal regolamento, ma il più vicino possibile al flusso esterno, la zona dunque risulta avere una velocità di circa 14 m/s ed è praticamente allineato con la corrente a monte, ipotizzando in prima iterazione una corda del profilo pari a 5 cm e assumendo aria standard otteniamo:

$$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1,81 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} = 4.7 \cdot 10^5$$

Dopo una ricerca su AIRFOILS TOOLS e XFOIL si è dunque scelto di usare un profilo NACA 4412 per la sua alta efficienza al Reynolds richiesto e in un ampio margine di incidenze di attacco dai 5 ai 10 gradi. Non risulta in oltre troppo appuntito e

sottile in modo da poter esser facilmente raccordato al bordo di fuga in accordo con il regolamento.

Se ne riportano dunque le caratteristiche aerodinamiche 2D:

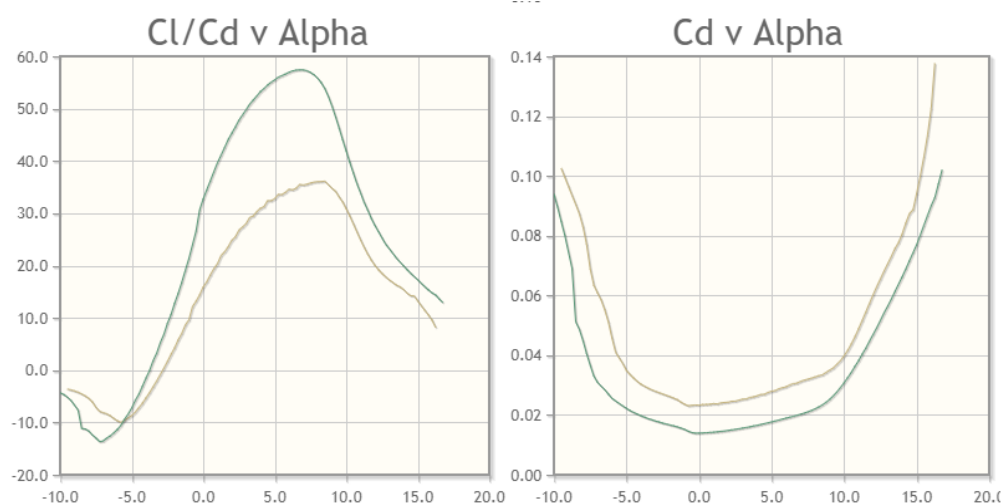


Figura 3-10 caratteristica di efficienza (a sinistra) e resistenza (a destra) al variare dell'angolo di attacco (α) del profilo (naca 4412) utilizzato in studio bidimensionale.

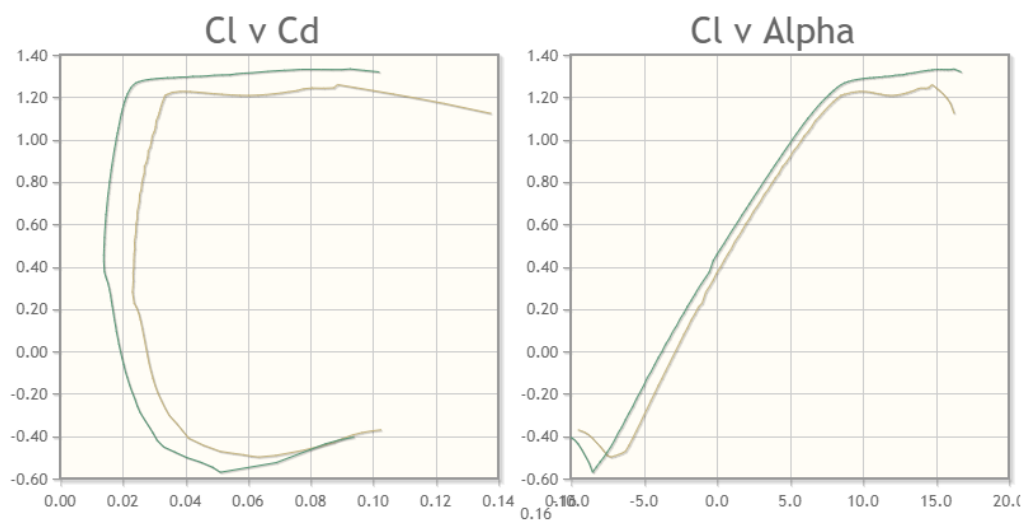


Figura 3-11 curve Cl - Cd e curve Cl α del profilo naca 4412

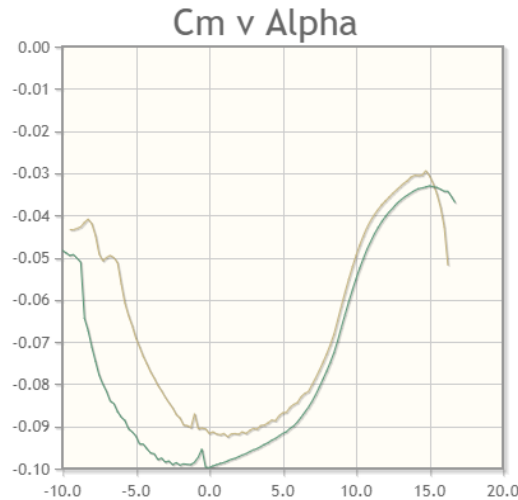


Figura 3-12 curve C_m -alpha del profilo naca 4412 utili a ricavare la coppia necessaria al servo per la sua movimentazione

$$M_{max} = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot C_{m_{max}} \cdot S \cdot c$$

$$S = 0.05 \cdot 0.15$$

$$C_{m_{max}} = -0.10$$

Assumo come condizioni peggiori quelle in cui la corrente esterna investe l'ala, considerando che la natura instazionaria del problema è plausibile che grandi strutture turbolente trasportino a tratti corrente più veloce dall'esterno.

$$V = 55 \text{ m/s}$$

Con i seguenti dati dunque

$$M_{max} = -0.0695 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Dal datasheet del servomotore ricaviamo che la coppia minima di stallo di questo è pari a $9.4 \text{ KgF} \cdot \text{cm}$ ossia $0.9221 \text{ N} \cdot \text{m}$.

Il servo è dunque in grado di pilotare il flap con ampio margine di coppia.

Ora bisogna considerare il rod di collegamento e capire se è in grado di resistere alle forze risultanti, analizzando lo schema seguente dunque dobbiamo calcolare la forza F .

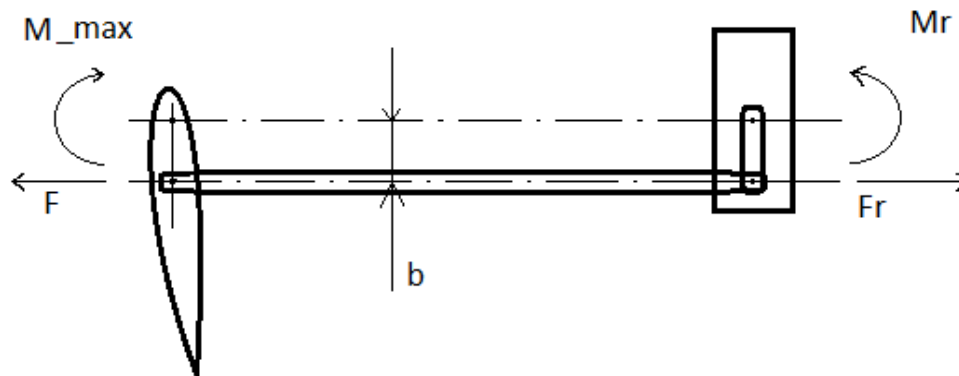


Figura 3-13 schematizzazione 2d di una sola ala comandata dal servomotore, con coppie e forze di riferimento

Il momento M_{max} è già messo in accordo con il verso negativo calcolato in precedenza, il momento di reazione in uscita dal servomotore dunque sarà diretto in senso opposto esercitando Fr sull'asta.

Il cinematisma è stato pensato appositamente per avere uno sforzo di trazione sul rood in ogni regime di funzionamento così da non incorrere in instabilità euleriana nell'asta.

Considerando $b = 0.015 \text{ m}$ la forza risultante è pari a $F = Fr = 61,7 \text{ N}$

Si tratta di un rood in fibra di carbonio dal diametro di 2 mm non occorre dunque effettuare ulteriori calcoli se consideriamo che il materiale utilizzato ha circa 4000 N/mm^2 .

3.8 Modifica codino

Una delle problematiche riscontrate dal cfd è una tendenza della moto ad alleggerirsi man mano che la velocità aumenta, ossia è di caratteristica leggermente portate, ciò è sgradito sia dal punto di vista della stabilità del motociclo ad alte velocità, sia per l'introduzione di drag indotto.

Una chiara visione di ciò la si ha analizzando un piano di sezione in scia al motociclo.

È infatti facile notare in figura come sia presente una grande zona di down wash individuata dalle due strutture vorticosi posteriori al codino.

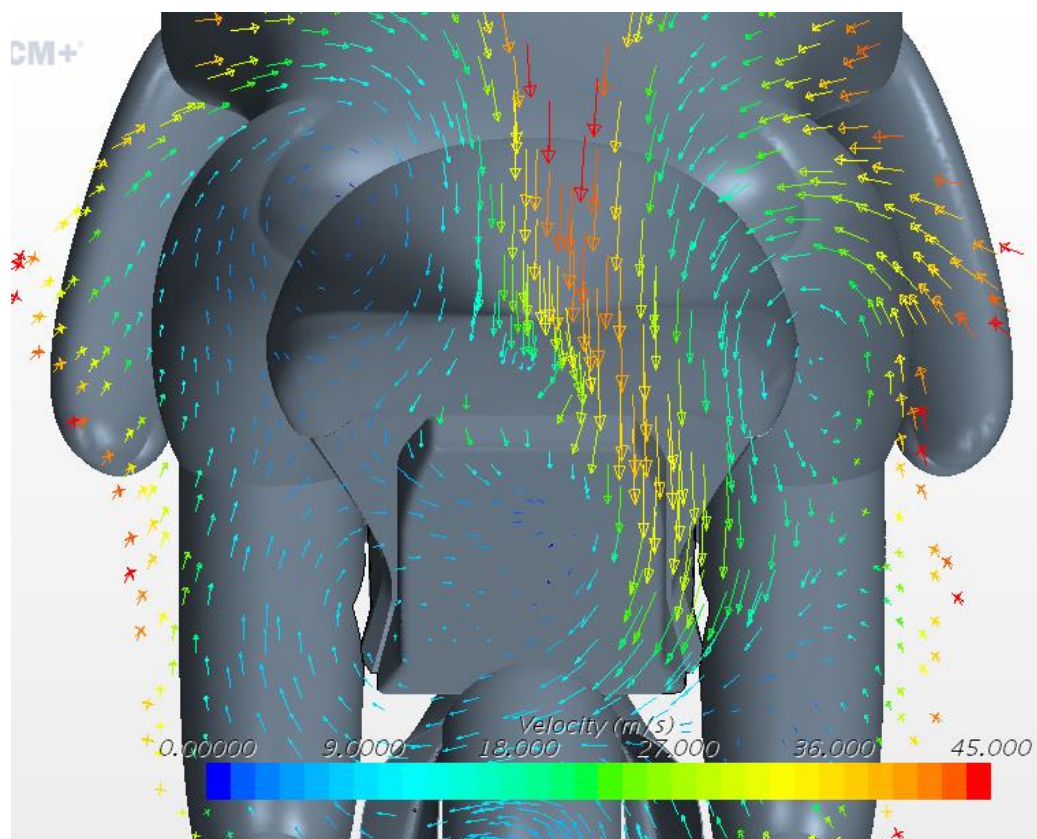


Figura 3-14 Scena vettoriale di un piano perpendicolare alla direzione di moto posteriormente al bordo di fuga.

Da qui l'idea dunque di inserire due ulteriori ali posteriori il cui compito ideale è raddrizzare la corrente discendente posteriore, evitando la formazione di vortici e recuperando dunque tale quantità di moto sotto forma di forze aerodinamiche sul profilo e componenti aerodinamici limitrofi e non.

Una chiara rappresentazione di ciò che è stato montato la si evince dalla seguente immagine.



Figura 3-15 fotografia laterale del profilo installato nella parte terminale del codino

Il profilo è montato dunque posteriormente e non esce lateralmente dalle dimensioni del codino, in accordo con il regolamento

3.9 Analisi al variare dell'angolo di picchiata

Inclinando la moto anteriormente e cioè variandone l'angolo di incidenza, influenza in misura abbastanza ampia i valori di resistenza all'avanzamento.

Ciò non è utile solo allo scopo di trovare l'assetto ottimo aerodinamico della carena, ma indispensabile se si vuole capire nel reale se tale condizione si verifica davvero perché la moto a differenza dell'installazione in galleria è libera di cambiare assetto sotto l'azione dei carichi esterni aerodinamici (e inerziali).

Se si considera la moto modellizzata aeroelasticamente, ossia come un oggetto investito da una corrente fissato al terreno tramite due molle (le sospensioni).

Aerodinamicamente parando più la moto tende a cabrare, più la resistenza aumenta attorno all'ottimo, ed è questo che verificheremo, l'aggiunta di ali anteriori potrebbero avere nel reale dunque effetti benefici sul SC_x stavolta indirettamente, perché la loro influenza positiva sul SC_m e SC_z della moto potrebbe cambiarne l'assetto, ossia il suo angolo di picchiata giustificandone l'installazione (l'aumento in galleria del SC_x).

Per tale motivo dunque nonostante in galleria queste aggiungano resistenza, andremo comunque a ricavare la loro influenza sul SCm e SCz, così da avere i dati necessari nel caso in futuro volessimo sviluppare il modello aeroelastico statico.

3.10 Elette anteriori

La tendenza aerodinamica cabrante ad alte velocità dei motocicli stradali è oramai un dato di fatto assieme alla caratteristica leggermente portante, come sarà possibile riscontrare sia nei dati CFD che sperimentali per quanto concerne al nostro prototipo.

L'unica soluzione a questo problema, se non quella di stravolgere completamente la forma del motociclo, è dunque inserire profili aerodinamici in modo tale che sia possibile cambiare o annullare questa tendenza.

Esprimendo in un modello analitico semplificato 2D il motociclo tramite le forze e momenti meccanici e aerodinamici agenti su di esso è possibile evincere quali debbano essere le caratteristiche delle appendici in questione.

Già anche solo intuitivamente dunque e come suggerito dalla maggior parte dei motocicli dotati di alette attualmente, il miglior modo per ottenere un momento picchiante e ovviando in parte il problema della moto leggermente portante è dunque quello di posizionare la più grande quantità di superficie deportante il più anteriormente possibile al mezzo.

Partendo dunque da tale base possiamo pervenire al seguente modello

Studio equilibrio statico longitudinale rigido

Si vogliono studiare i soli effetti aerodinamici, in condizione stazionaria così da riuscire a ricavare il carico richiesto dalla aletta anteriore per avere un momento costante e ancora meglio nullo ad alte velocità, il che dovrebbe garantire sensazioni altrettanto costanti al pilota in tutto il range di funzionamento, ossia evitare l'insorgere di alleggerimenti dell'avantreno ad alte velocità per esempio.

Ipotizzando una sospensione rigida posteriormente, calcoliamo il sistema di forze e momenti agenti prendendo come riferimento il punto di contatto tra terreno e la ruota posteriore (cir del sistema sotto queste ipotesi).

Le forze body sono ricavate secondo il baricentro del motociclo $x_{G\ body}$ $y_{G\ body}$ dal contatto ruota posteriore terreno. Mentre le appendici iesime avranno proprie coordinate x_{wing_i} y_{wing_i}

$$\begin{cases} L_{body} + L_{wing1} = L_{tot} \\ D_{body} + D_{wing1} + Trust = 0 \\ -L_{body} \cdot 0 - L_{wing1} \cdot x_{wing1} + D_{body} \cdot 0 + D_{wing1} \cdot y_{wing1} + M_{body} + M_{wing1} + \\ + Trust \cdot y_{wheel\ contact} = M_{tot} \end{cases}$$

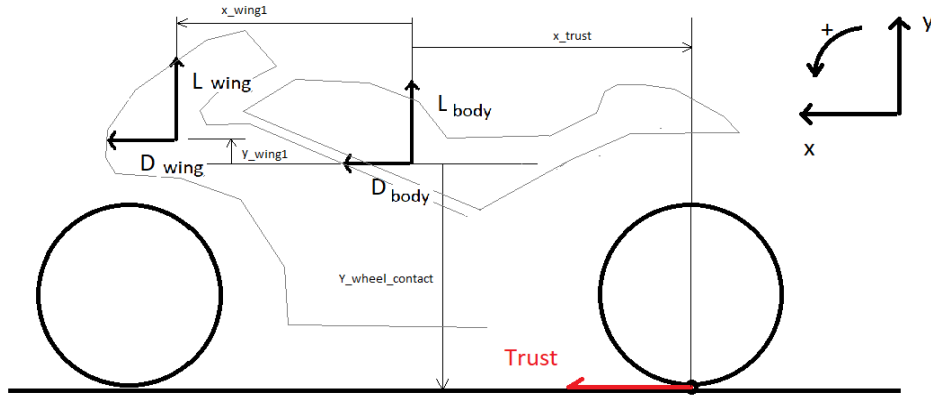


Figura 3-16 schematizzazione aeromeccanica longitudinale del motociclo, di riferimento per le equazioni soprastanti.

I vari drag sono ricavati dal modello numerico secondo il sistema di riferimento indicato in figura, no bisogna dunque stupirsi se nella stessa sono indicati i drag anti intuitivamente in avanti rispetto la direzione del vento, tali valori assumeranno dunque valori negativi invertendone dunque il segno (di conseguenza la direzione) nell' equazione.

Per ricavare valori di design delle appendici alari l'equazione di nostro interesse è la terza, ossia:

$$-L_{wing1} \cdot x_{wing1} + D_{wing1} \cdot y_{wing1} + M_{body} + M_{wing1} + Trust \cdot y_{wheel\ contact} = M_{tot}$$

E per quanto detto cercheremo di mantenere $M_{tot} = 0$ per ottenere la neutralità di assetto aerodinamica, la componente $L_{body} + L_{wing1} = L_{tot}$ corrisponderà all'ammontare di carico aerodinamico applicato dunque nel baricentro del motociclo, ma per ora non ci occuperemo di quanto carico fare ma solo di bilanciarlo.

$$-L_{wing1} \cdot x_{wing1} + D_{wing1} \cdot y_{wing1} + M_{body} + M_{wing1} + Trust \cdot y_{wheel\ contact} = 0$$

$$L_{wing1} \cdot x_{wing1} - D_{wing1} \cdot y_{wing1} = Trust \cdot y_{wheel\ contact} + M_{body} + M_{wing1}$$

Se y_{wing1} lo supponiamo trascurabile, cioè l'aletta è calettata a una y prossima a quella del baricentro

Possiamo scrivere:

$$L_{wing_1} = \frac{+Trust \cdot y_{wheel\ contact} + M_{body} + M_{wing_1}}{x_{wing_1}}$$

$$L_{wing_1} \cdot x_{wing_1} \gg D_{wing_1} \cdot y_{wing_1}$$

Ipotizzando :

$$\frac{L_{wing_1}}{D_{wing_1}} \approx o(10)$$

Come dire che cercheremo di lavorare a una efficienza della sola aletta nell'ordine di 10, valore del tutto plausibile dato il numero di Reynolds a cui ci troviamo a lavorare.

Assumiamo poi:

$$\frac{y_{wing_1}}{x_{wing_1}} = O(0.1)$$

Cioè cercheremo di tenere il rapporto tra le distanze ala-baricentro, in altezza e lunghezza, nell'ordine di 0.1 . sarà molto facile ottenere ciò dato che il cupolino ove metteremo le alette ha molto braccio in x ma non in y rispetto al baricentro

$$\frac{L_{wing_1}}{D_{wing_1}} \gg \frac{y_{wing_1}}{x_{wing_1}} \Rightarrow o(10) \gg O(0.1) \Rightarrow L_{wing_1} \cdot x_{wing_1} \gg D_{wing_1} \cdot y_{wing_1}$$

Ricaviamo dunque alternativamente lo stesso risultato:

$$L_{wing_1} = \frac{+Trust \cdot y_{wheel\ contact} + M_{body} + M_{wing_1}}{x_{wing_1}}$$

Ora ragioniamo sul valore di **Trust**: dall' equilibrio di forze lungo x abbiamo

$$D_{body} + D_{wing_1} + Trust = 0$$

Dunque ricavando e ipotizzando che $D_{body} \gg D_{wing_1}$

$$Trust = -D_{body}$$

Sostituendo

$$L_{wing_1} = \frac{-D_{body} \cdot y_{wheel\ contact} + M_{body} + M_{wing_1}}{x_{wing_1}}$$

Possiamo cercare di togliere la dipendenza dalla aletta a secondo membro ragionando sugli ordini di grandezza $M_{body} + D_{body} \cdot y_{wheel\ contact}$ e M_{wing_1} :

$$M_{body} - D_{body} \cdot y_{wheel\ contact} \gg M_{wing_1}$$

Ipotesi da verificare una volta fatta la scelta del profilo, ma è molto plausibile che M_{wing_1} sia trascurabile rispetto agli altri due termini dato che uno ha braggio molto altoripetto al baricentro e il secondo interessa una superficie che ha almeno 2 ordini di grandezza in più della aletta.

Otteniamo dunque:

$$L_{wing_1} = \frac{-D_{body} \cdot y_{wheel\ contact} + M_{body}}{x_{wing_1}} \quad (1)$$

D_{body} secondo il nostro sistema di riferimento sarà sicuramente negativo, questo determina di fatto il valore negativo di L_{wing_1} come plausibile dunque per cancellare l'effetto di beccheggio abbiamo bisogno di deportanza.

Definendo e passando ai coefficienti di portanza $C_{D\ body}$ $C_{L\ wing}$

$$C_{D\ body} = \frac{-D_{body}}{\frac{1}{2} * A_{frontal} \cdot \rho_{\infty} \cdot V_{\infty}^2} \text{ che non useremo per ora}$$

$$C_{L\ wing} = \frac{-L_{wing_1}}{\frac{1}{2} * S_{wing} \cdot \rho_{\infty} \cdot V_{\infty}^2}$$

$$C_{L\ wing} = \frac{-L_{wing_1}}{\frac{1}{2} * S_{wing} \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2} = \frac{-D_{body} \cdot y_{wheel\ contact} + M_{body}}{x_{wing_1} \cdot \frac{1}{2} * S_{wing} \cdot \rho_{\infty} \cdot V_{\infty}^2} \text{ dalla (1)}$$

D_{body} e M_{body} sono funzioni di V_{∞} e ρ_{∞} ma la dipendenza da ρ_{∞} in $C_{L\ wing}$ dato che dividiamo per tale valore, ricavando dunque le due funzioni seguenti indipendentemente dalla densità da valori sperimentali o cfd

$$\begin{aligned} D_{body}(V_{\infty}) \\ M_{body}(V_{\infty}) \end{aligned}$$

siamo in grado di ricavare la funzione

$$C_{L\ wing}(V_{\infty})$$

Se tale valore non si manterrà costante al variare di V_∞ allora l'ipotesi della necessità di un sistema a calettamento variabile è fortemente verificata, in caso contrario passeremo comunque al secondo step della controllo dei risultati alla ricerca di altri effetti che possano comunque giustificare la scelta, ossia effetti di ordine superiore, quali influenza del Reynolds sullo stallo e sul cl_alpha , dunque verifica della robustezza del sistema nell'intero inviluppo di funzionamento.

Analisi cfd per ricavare D_{body} $C_{L\ wing}$ M_{body}

L'analisi CFD della moto con profili alari è fatta dividendo in regioni con i volumi rotanti, in modo tale da poter ricavare i valori al variare dell'incidenza, senza dover rielaborare il CAD nel modello. Ciò premette di risparmiare notevolmente tempo.

Una volta raggiunta la convergenza della simulazione si ricavano tramite report di integrazione sul dominio i valori di D_{body} $C_{L\ wing}$ M_{body} al variare delle incidenze.

Come da ipotesi nel modello statico longitudinale la CFD conferma che la variazione di incidenza influisce in minima misura sulla variazione del cd, una volta dunque ricavato il valore zero D_{body} , lo si può supporre praticamente costante, giustificando le semplificazioni fatte al modello.

Nel modello implementato in MatLab per ricavare le mappe di funzionamento, D_{body} verrà comunque preso dai valori tabulati ricavati dal CFD, dato che lavorando con le matrici era più semplice utilizzare i valori puntuali nel calcolo, piuttosto che utilizzare un valore costante.

Analisi risultati

Con la premessa di completare con una quantità di punti maggiore al variare di α dell'aletta e costruire le polari dell'aletta per altre velocità (attualmente $[0,7,10,20]$ deg e $[30,40]$ m/s), Post-processando i dati e passando ai coefficienti aerodinamici $C_{L\ wing}$ possiamo costruire le seguenti mappe:

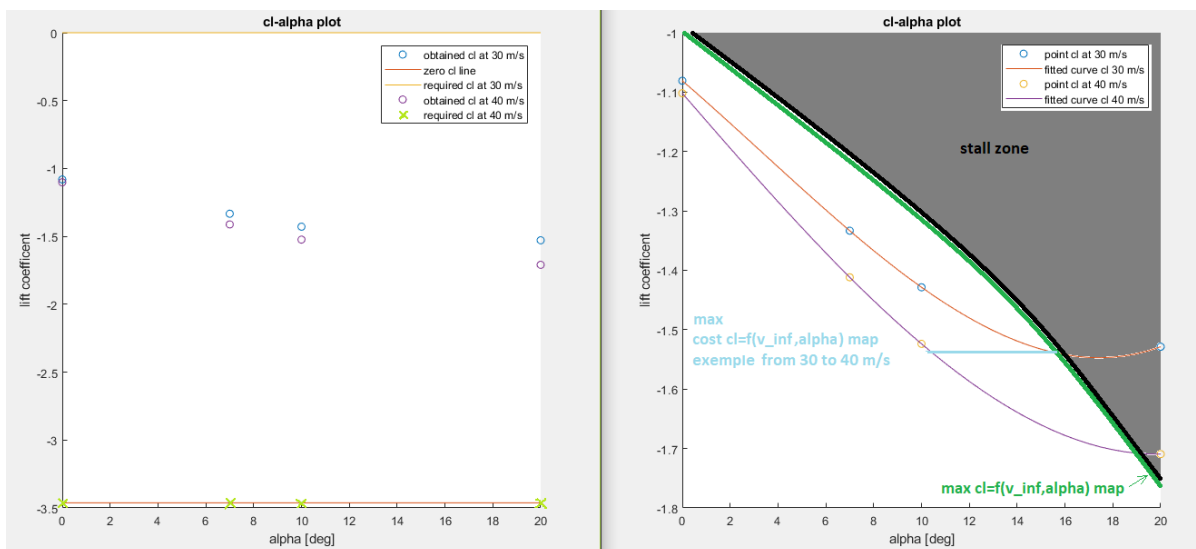


Figura 3-17 dati computazionali puntuali a sinistra e dati ricostruiti a destra.

Nella prima immagine di sinistra vengono solo illustrati i risultati puntuali e si nota tramite la sovrapposizione delle crocette verdi alla linea rossa come con le approssimazioni fatte al modello aerodinamico aletta-moto, il Cl richiesto al variare della velocità rimanga costante, il che semplifica notevolmente lo studio. Notiamo in oltre un altro importante fatto, il Cl richiesto risulta essere notevolmente alto per la superficie messa a disposizione. Non è possibile dunque con sole due alette bilanciare completamente la moto, ma è possibile comunque migliorarne gli effetti di circa il 40% se si viaggia a velocità moderatamente alte. Si potrebbe ovviare ciò aumentando la superficie alare del 60% aggiungendo altre alette e maggiorando quelle installate.

A seconda della scelta progettuale di aggiungere altre appendici, la trattazione che stiamo per affrontare non cambia, perché nelle mappe sopra indicate le polari risulterebbero almeno in prima approssimazione solo traslate verso il basso e/o verso sinistra a seconda se anche esse sono a calettamento variabile o fisso.

Ragionando sul grafico della mappa ingrandita e contestualizzata è possibile dunque individuare le linee verde e azzurro:

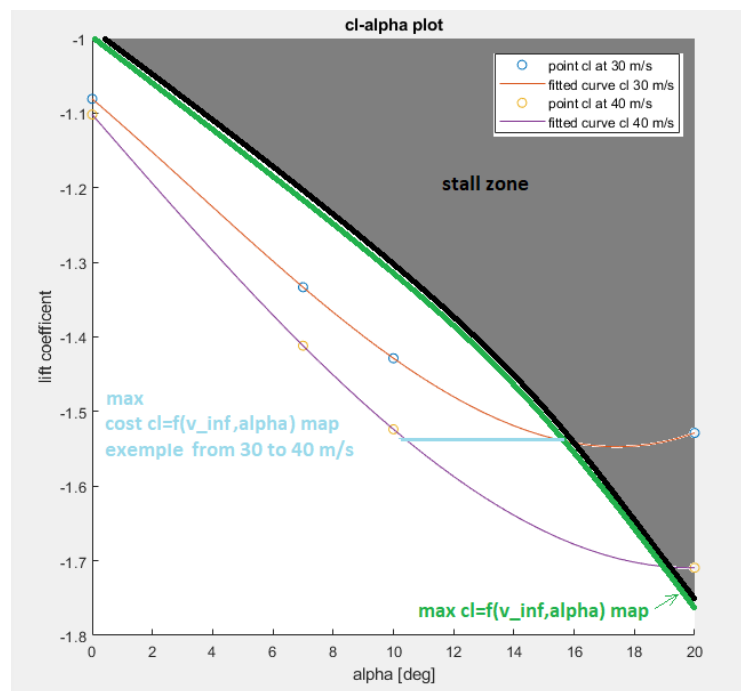


Figura 3-18 dettaglio del grafico di funzionamento delle ali anteriori al variare della velocità, calettamento e Cl ottenuto

-La mappa verde implementa il concetto della massima mitigazione del fenomeno a tutte le velocità, dunque una volta misurata la velocità di funzionamento V_∞ si scorre la polare del profilo a tale velocità individuando l'alpha di cl massimo tenendo a distanza dallo stallo. Questa soluzione potrebbe, variando il momento aerodinamico al variare della velocità, dare sensazioni non lineari al pilota al variare della velocità

-La mappa azzurra invece mantiene la mitigazione dei momenti pari a costante tenendo proprio il cl costante a un livello definito in un intervallo del range di funzionamento V_∞ minima e V_∞ massima. La geometria attuale non raggiungerebbe il requisito di bilanciamento totale nemmeno nelle competizioni di cilindrata superiore, questo spiega infatti come mai anche su tali motocicli siano presenti più e più appendici, per aumentare come detto prima la superficie alare. Nel nostro caso un miglioramento generale del 45-45% rimane comunque un risultato che sicuramente può influenzare in positivo il feeling ad alte velocità.

-rimane poi una ultima mappa non indicata ma semplice da individuare immaginare, quella ad alpha di calettamento costante, per individuarla basta intersecare qualsiasi asse parallelo alle ascisse passante per l'angolo scelto, questa mappa presenta un solo punto di ottimo in tutto il range, oltre a lavorare spesso in zona stallata quando si vuole lavorare ad alti alpha per avere il punto di ottimo molto in alto, con ripercussioni sulla resistenza all'avanzamento non più trascurabile.

Il sistema a calettamento variabile permette di implementare nel controllore tutte queste mappe e far decidere al pilota quale usare, addirittura è anche possibile creare una mappa personalizzata a seconda di pilota e tracciato, senza contare la possibilità di controllare real-time il livellamento della stessa rispetto i movimenti di pitch della moto.

Ciò non è consentito nelle competizioni del campionato italiano, ma non è espressamente vietato al contrario nelle competizioni studentesche.

Configurazione dell'aletta

Una volta eseguita l'analisi 2d del profilo si è passati alla configurazione 3d direttamente sulla moto, aggiungendo un endplate per ridurre i vortici di estremità e diminuire il drag indotto ad alti angoli di attacco, incrementando poi la corda centrale, notata una particolare propensione del flusso a rimanere comunque attaccato in tale zona.

Il profilo è calettato in modo avanzato in modo da creare il così detto “dogtooth leading edge”, il cui scopo è creare un vortice strategico sul dorso del profilo evitandone uno stallo brusco ad alti angoli di attacco.

Successivamente si riportano alcune visualizzazioni scalari ricavati dalla analisi CFD delle suddette alette inserite nel modello di moto completo. Le superfici blu sono superfici costruite per di iso-pressione totale, settando il valore corretto se e ricava una visualizzazione intuitiva e rappresentativa dell'andamento dello strato limite.

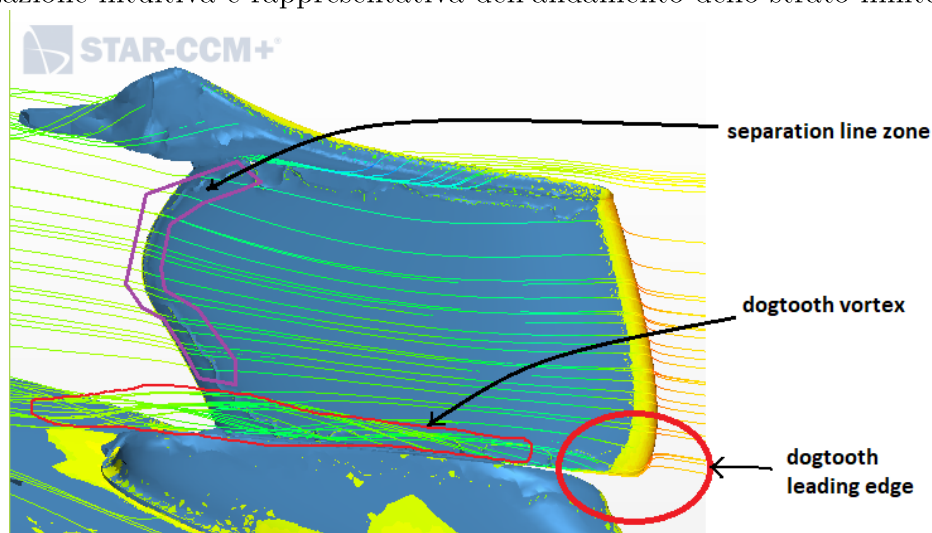


Figura 3-19 dettaglio in vista dal basso dell'aletta anteriore completa di: isosurface appena all'esterno dello strato limite e streamline onde evidenziare le zone di separazione e di generazione dei vortici

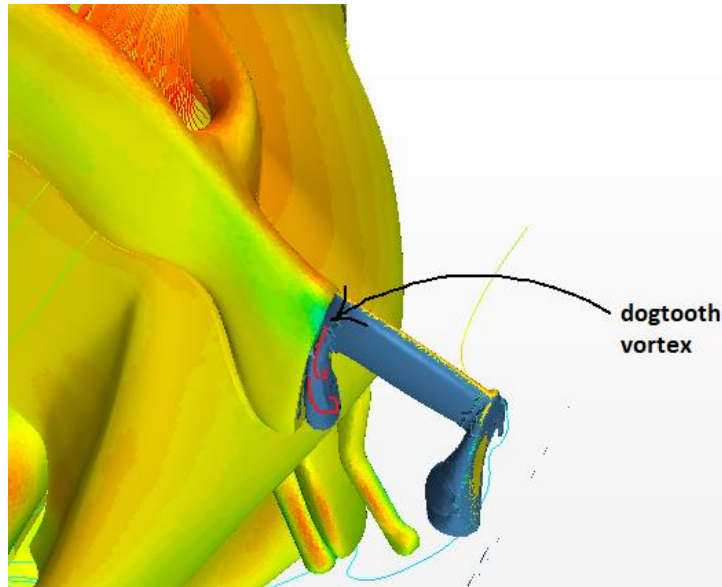


Figura 3-20 vista quasi analoga alla precedente ma ad elevato angolo di attacco, si nota come anche ad alte incidenze l'o stallo tarda ad arrivare.

Endplate optimization

Si vuole cercare di ridurre alcune criticità riscontrate nella precedente versione di alette in particolare cercare di ridurre l'intensità del vortice al bordo dell'endplate.

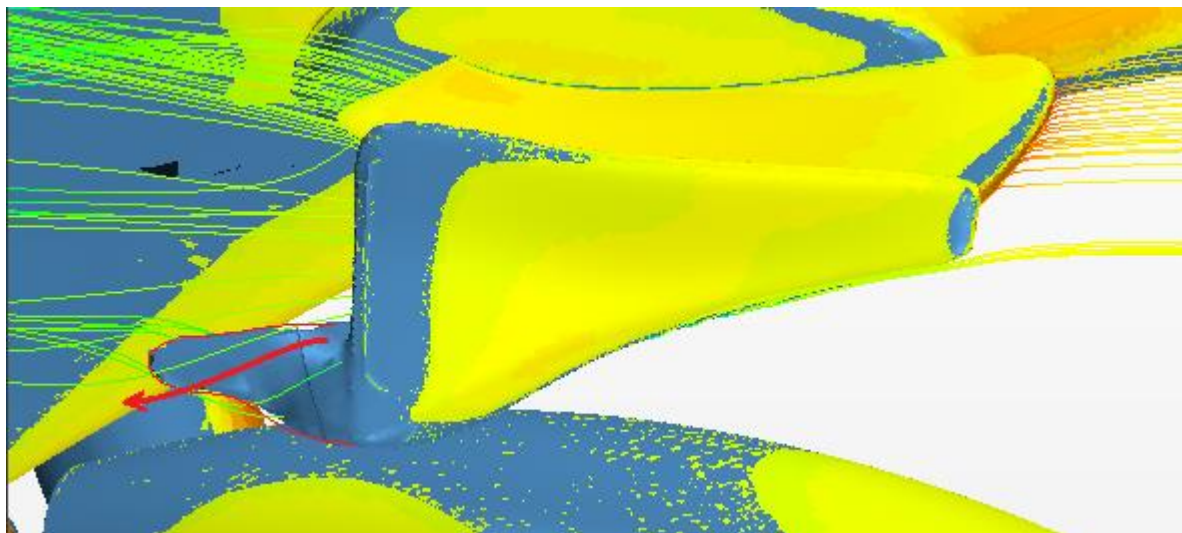


Figura 3-21 dettaglio del vortice a valle dell'enplate

Con la precedente visualizzazione è possibile notare come all'estremità a valle dell'endplate installato si abbia un vortice abbastanza intenso, si è pensato dunque di inserire un'appendice interamente volta a recuperare down-force deviando la direzione del flusso indicato dalla freccia rossa nell'immagine precedente.

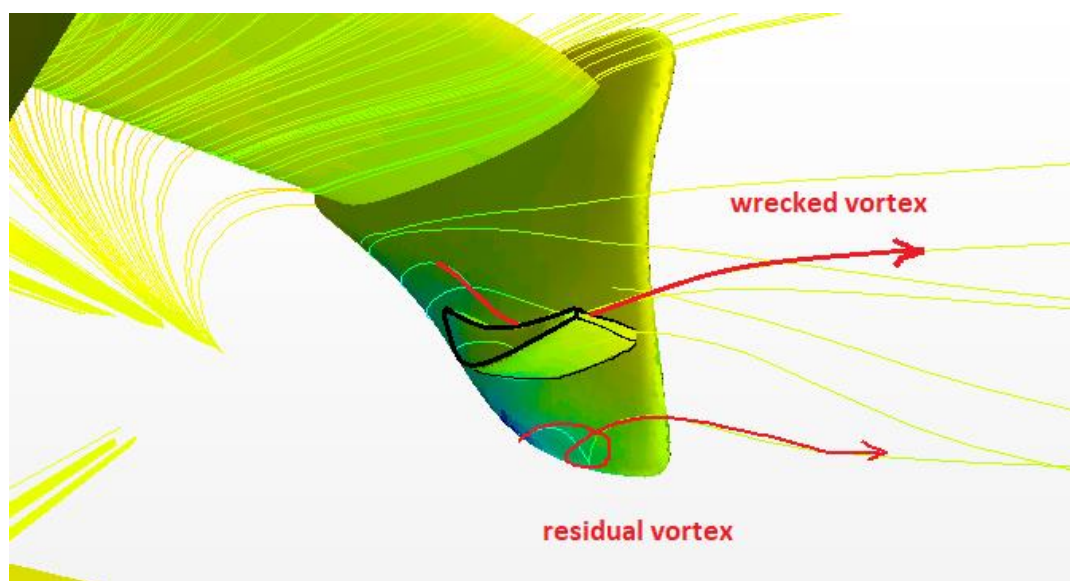


Figura 3-22 dettaglio dell'appendice inserita per limitare il vortice

Nell'immagine seguente è dunque possibile visualizzare il risultato atteso: il vortice è diminuito visibilmente di intensità e i dati CFD confermano registrandone il sinonimo aumento del c_l .

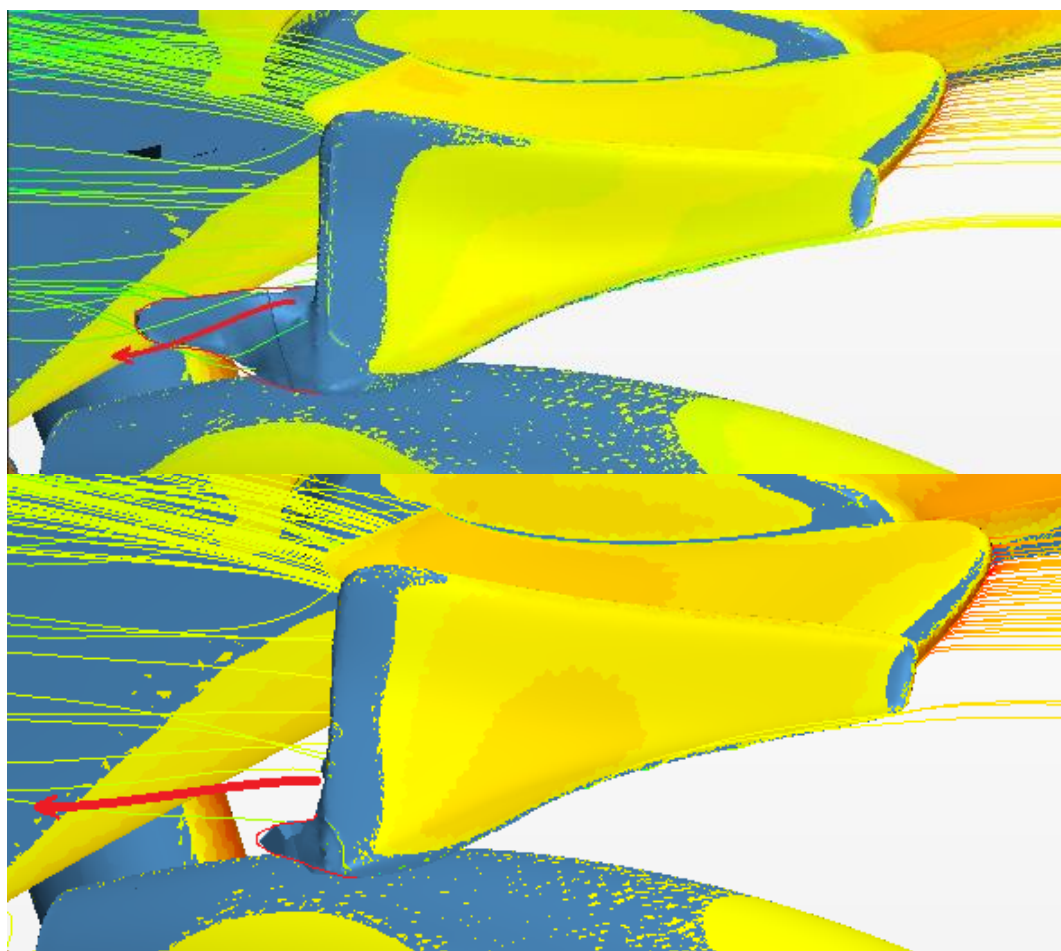


Figura 3-23 dettaglio del prima e dopo la limitazione del vortice

Tutti gli accorgimenti inseriti nella configurazione attuale hanno portato a un effettivo aumento del C_l e a una maggiore robustezza del sistema, lo stallo è infatti diventato meno brusco del caso 2d e ritardato da 14 a circa i 20 gradi di incidenza.

La rotazione del profilo è stata scelta in prima iterazione a un quarto anteriore del bordo di attacco del profilo, ove da letteratura il coefficiente di momento dovrebbe rimanere costante al variare dell'incidenza e semplificare i calcoli della coppia richiesta dal meccanismo. Quest'ultimo usò la movimentazione del calettamento da remoto. Si è dunque trascurata la forma variabile dell'ala e le differenze di passaggio dal 2d al 3d per la scelta di tale asse di rotazione.

4 [3]Test in galleria

Si è deciso di mostrare il percorso di ottimizzazione svolto direttamente in galleria, dove per ottimizzazione, si intende l'iter con cui le parti precedentemente pensate e costruite vengono applicate al motociclo e scartate o tenute per le prove successive in base al risultato ottenuto, ossia positivo o negativo sul SCx .

Consideriamo questo coefficiente ossia superficie frontale moltiplicata per il C_x , perché la superficie non è un parametro del nostro problema, ossia aumenti o abbassamenti di essa non sono di nostro interesse se non che rimangano nei limiti del regolamento

la galleria permette tramite Labview di visualizzare immediatamente i valori della prova, si sono effettuate 3 misure, ossia 3 volte accensione della galleria, salvataggio della misura e spegnimento, talvolta in caso i tre valori fossero stati troppo discordanti si sono aggiunte una o due misure.

4.1 Inizio test e primi risultati

La prima giornata è stata sicuramente una delle più impegnative, questo perché appena svolti i primi test, in fase di ritorno alla configurazione iniziale non si aveva un riscontro dei valori, e nessuna delle componenti installate sembrava funzionare.

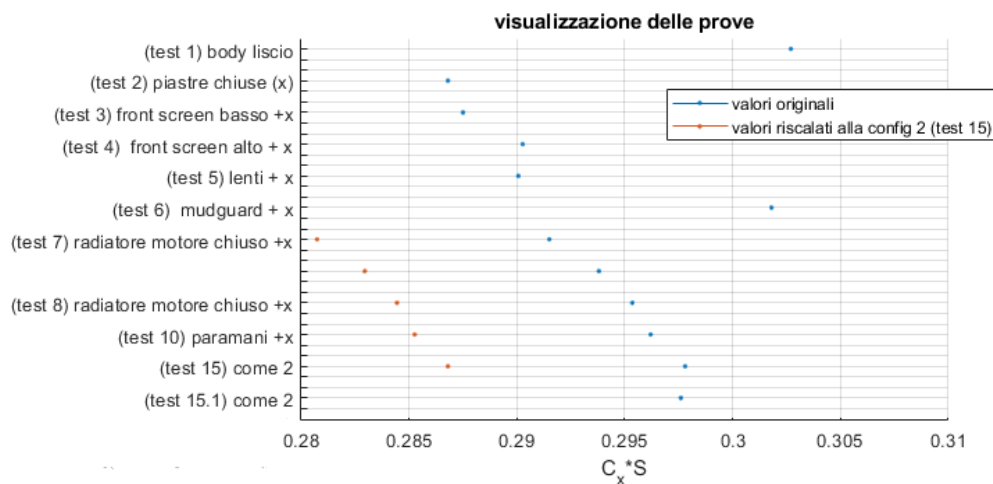


Figura 4-1 rappresentazione grafica dei valori della prima parte di giornata di test

Si è deciso dunque di ripercorrere all'indietro il percorso smontando componenti fino al ritorno alla configurazione di ottimo raggiunta, ossia quella con la paratia sulle piastre (test 2). Giunti fin qui si è dunque capito che qualcosa non andava effettivamente, vista la forte discrepanza dai valori precedenti.

Dopo qualche ora di analisi e smontaggio dei componenti si è finalmente capito che il problema era emerso dal test 7, ossia quando si è smontata la tutta la parte frontale per montare la carenatura al motore per regolare i flussi interni. In questa fase durante il rimontaggio il radiatore è andato fuori posizione inclinandosi nella parte bassa, inoltre anche la chiusura delle piastre e il manubrio risultava fuori posizione.

Ciò si può evincere infatti se si ricalano i valori dopo il test 7 usando come scale i valori del test 2, lasciando dunque intendere che le configurazioni dal test 7 al test 10 sono tutt'altro che da scartare.

Le modifica fatte al front screen, al mudguard e al cerchione, quest'ultima in figura seguente, non hanno prodotto i risultati sperati e sembrano invece aggravare la situazione.

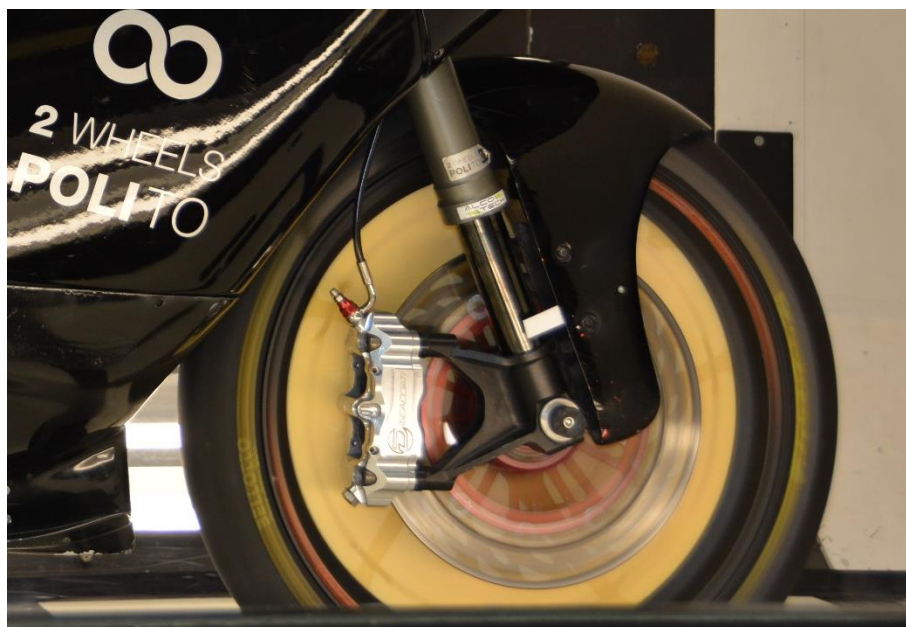


Figura 4-2 Dettaglio della ruota anteriore in rotazione, con montate le coperture sulle razze.

Posizione in sella

Una volta risolto dunque il problema, con il tempo rimasto si è deciso di continuare i test studiando come la posizione del pilota influenza il C_x .

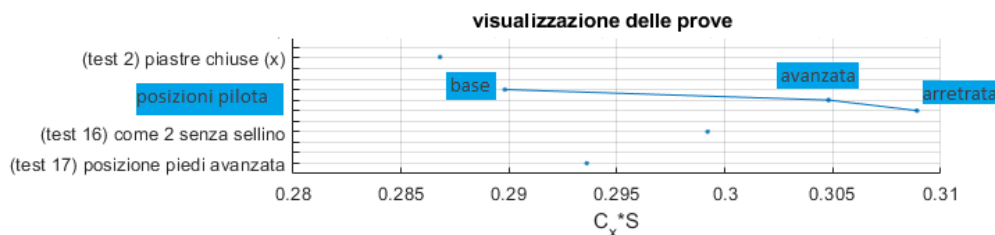


Figura 4-3 rappresentazione grafica della seconda parte della prima giornata di test, sottolineato in blu è possibile notare l'influenza della posizione del pilota tra avanzata, base e arretrata.

Dal grafico soprastante si può notare come la posizione del pilota influenzi la misura in maniera considerevole, facendo spostare in avanti e in dietro sulla sella il pilota fino ai casi limite si nota infatti come appena ci si sposti dalla configurazione base, i valori di drag aumentano considerevolmente.

Successivamente si sono provate altre due configurazioni con esito negativo cercando di spostare piedi e altezza della sella.

Sommario primo giorno:

Per quanto riguarda le configurazioni scartate, ad esempio i cerchi lenticolari, si potrebbe imputare il fallimento all'aumento considerevole di superficie bagnata attuata dalla copertura, aggravata dalla rugosità superficiale delle stesse che non possiamo sicuramente definire ottimale.

la configurazione vincente che sarà poi punto di partenza per le analisi del giorno successivo è dunque la configurazione del TEST2, ne riportiamo il valori a seguito.

$$S \cdot Cx_{\text{minimo ottenuto}} = 0,2868 \text{ guadagno pari al } 5\%$$



Figura 4-4 dettaglio della chiusura attuata al di sotto delle piastre sterzo, ossia la configurazione migliore della giornata 1

In figura possibile vedere almeno esternamente in cosa consiste il componente utilizzato per chiudere al di sotto delle piastre, è presente del nastro isolante per chiudere ermeticamente il collegamento delle parti

4.2 Test seconda giornata

Il secondo giorno e successivi sfortunatamente il pilota ufficiale era disponibile, mi sono dunque occupato oltre che del montaggio-smontaggio, elaborazione dei dati, anche di prendere le vesti del pilota, ovviamente rinunciando al ruolo di accensione e spegnimento della galleria.

Questo fatto mi ha permesso di avere una comprensione maggiore sui risultati, togliendo di fatto ogni incertezza di errore di posizionamento del pilota.

Ad eccezione dei primi 4 test dunque, in cui ho perfezionato gradualmente la posizione in sella, posso affermare quanto segue nel prossimo paragrafo.

Posizionandomi metodologicamente in moto, la ripetibilità delle misure era così alta rispetto al giorno precedente da non richiedere mai la 4 misura, addirittura in tre casi di fermarci alla seconda, con differenze massime del 0.3% tra una misura e la successiva.

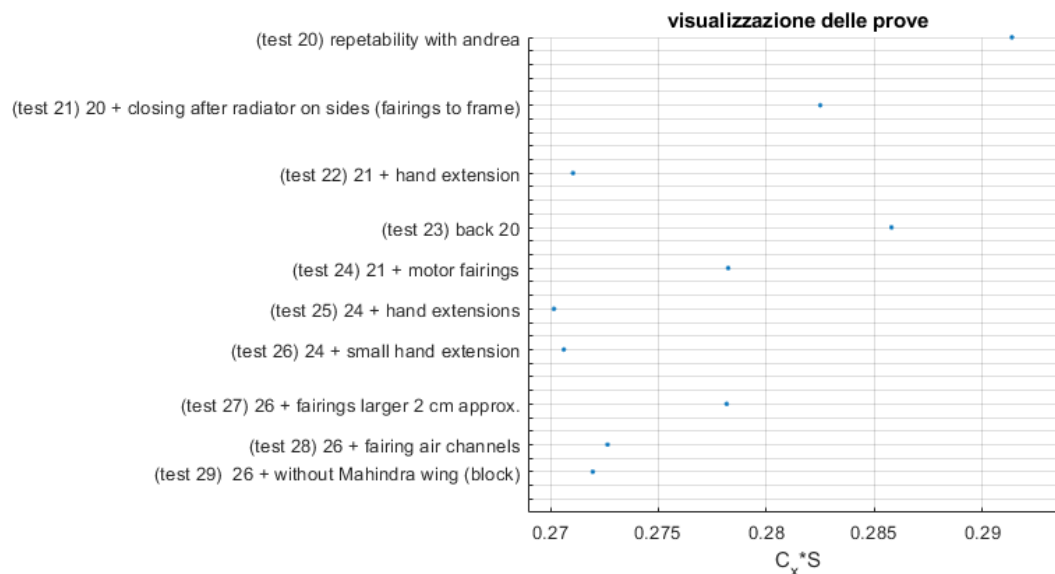


Figura 4-5 rappresentazione grafica dei valori della seconda giornata di test

Se si osserva il grafico del secondo giorno si può notare come tra TEST 20 e TEST 23 ci siano delle differenze a parità di configurazione, questo è proprio dovuto a quanto prima asserito, ossia la posizione pilota è stata migliorata, fortunatamente non abbastanza da escludere le migliorie precedenti. Questa operazione è stata fatta proprio perché vedendo che i valori diminuivano drasticamente il sospetto era proprio che la posizione fosse cambiata in meglio.

Controllo dei flussi interni

Ripartendo dal TEST 23 come valore di riferimento passiamo direttamente al TEST 25 che ci informa di quanto, in questa configurazione si è canalizzato tutto il flusso uscente dai radiatori fino ai piedi del pilota e si sono aggiunti i paramani aerodinamici con notevoli guadagni in termini aerodinamici.



Figura 4-6 dettaglio della configurazione chiusa tra radiatore motore e carene fino alla zona piedi, i tubi in blu sono quelli necessari a portare e sottrarre il flusso di acqua calda ai radiatori per la validazione termica delle configurazioni.

Paratie in plastica bianca che deviano il flusso uscente dal radiatore dallo scontrarsi con tutte le parti meccaniche interne, spostandolo ed espellendolo ai lati, più precisamente nella zona piedi

Paramani a scopi aerodinamici



Figura 4-7 Dettaglio del paramano in questione, che modifica sostanzialmente la parte anteriore della carena

Secondariamente vista l'imponenza dei paramani anteriori nella configurazione TEST 25 si è deciso di provare a costruire a mano delle bombatura, tramite dei fogli flessibili di poliuretano plasmati in modo meno sporgente dalla carena.

I risultati di tale bombatura sono simili alla configurazione precedente, è plausibile dunque che l'ottimo stia nel mezzo, ossia una aggiunta alla carenatura che stia tra i 2 e i 5 cm di larghezza aggiuntiva nella zona manopole

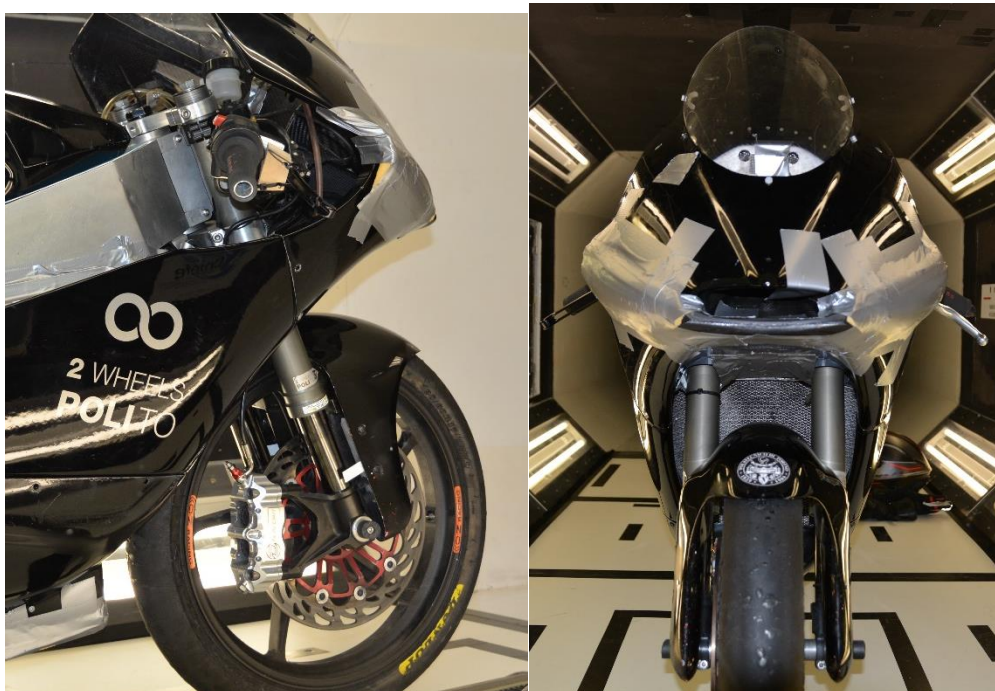


Figura 4-8 dettaglio laterale e frontale della bombatura applicata sulla carena con il nastro adesivo, raccordata alla presa d'aria precedentemente installata.

Modifiche ai fianchi della carena

La parte finale della giornata di test è stata volta poi ad altre piccole modifiche alla carena, ma con esiti negativi come si può evincere nella parte finale del grafico ripreso a seguito.

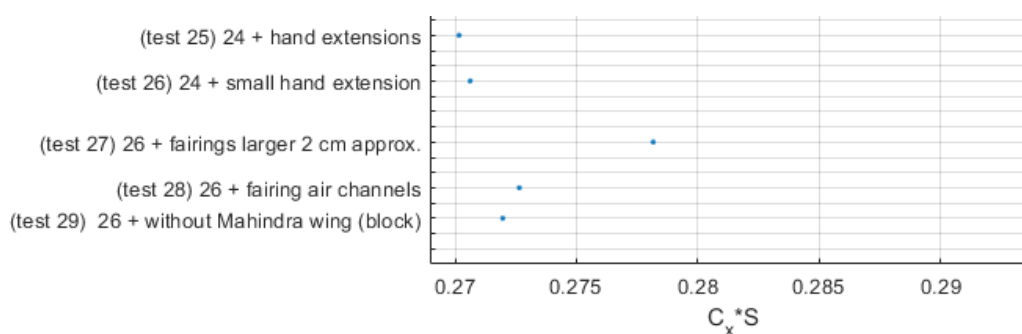


Figura 4-9 dettaglio della seconda parte di test

Le modifiche provate e poi scartate sono state: allargare leggermente la carenatura laterale agendo sui punti di fissaggio, deviare il flusso canalizzato dal radiatore verso l'interno e in fine eliminare una piccola appendice alare posizionata sul puntale della carena

Sposterei anzitutto l'attenzione sull'esito fallimentare dell'allargamento della carena laterale, ossia il TEST 27, dalle immagini seguenti è possibile infatti notare che, allargando la carenatura laterale viene ad allargarsi anche il condotto dei flussi interni. Dunque si decrementa il rifiuto della presa d'aria dei radiatori, ossia si ha una maggiore quantità di aria passante nel mezzo radiante.

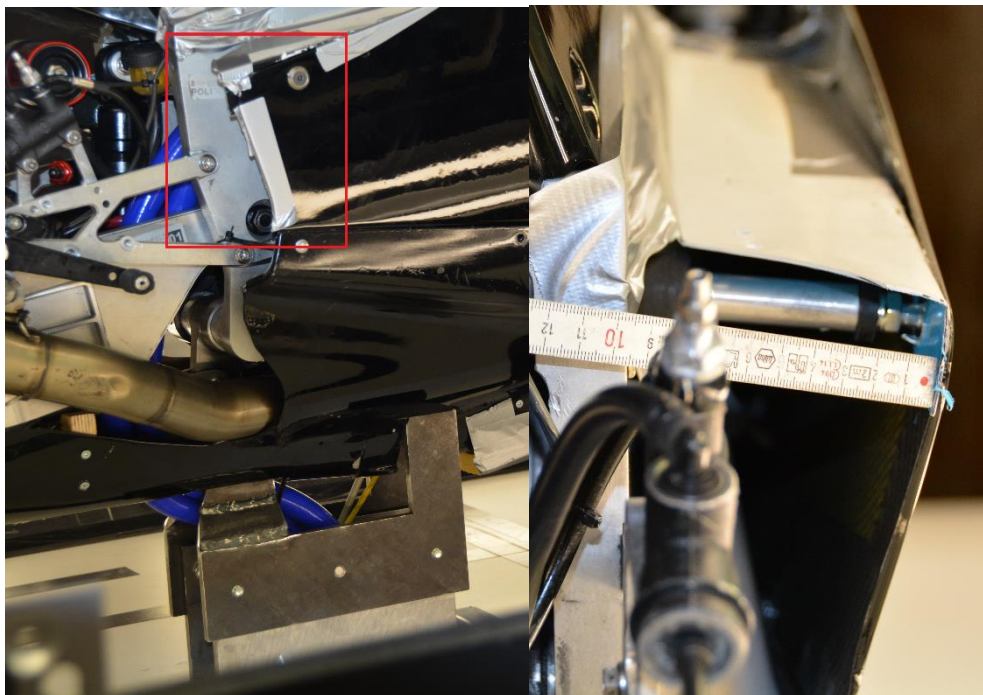


Figura 4-10 Vista laterale e posteriore dell'attacco carenatura, ossia l'apertura da cui fuoriesce il flusso d'aria passato attraverso i radiatori.

Ciò non è un problema anzi una necessita nel caso si voglia raffreddare maggiormente il motore, pagando in resistenza aerodinamica dovuta al passaggio nel radiatore, ma non è questo il caso.

La moto attualmente configurata non soffre infatti di problemi di surriscaldamento.

In seconda iterazione dunque, se si dovesse ritentare questo tipo di soluzione cercheremmo di allargare la carenatura slegando la sua influenza sui flussi interni. Magari aggiungendo una bombatura esterna, oppure non utilizzando la carena come parete del condotto per i flussi interni.

Sommario secondo giorno

L'idea di proteggere di controllare i flussi interni canalizzandoli in zone strategiche e di proteggere le zone sensibili sporgenti dalla carena con paramani, ha prodotto dunque

come configurazione vincente del secondo giorno quella del TEST 25-26, ossia, sotto piastra chiuso con paramani e condotti interni.

Riportiamo il valori ottenuti a seguito.

$$S \cdot Cx_{\text{minimo ottenuto}} = \mathbf{0,2702} \text{ guadagno pari al } 9.9\% \text{ (dalla configurazione base)}$$

Tramite l'analisi termica della potenza dissipata dai radiatori non se ne sono riscontrate diminuzioni, dunque le soluzioni adottate non interferiscono con il buon funzionamento del mezzo radiante.

L'esito positivo di questa verifica è di assolutamente indispensabile soprattutto nel momento in cui si va a intervenire nelle zone interessate i radiatori.

4.3 Test terza giornata

Negli ultimi giorni di prove ci si è concentrati su ciò che rimaneva di meno convenzionale e a idee avute praticamente sul momento.

In particolare nel day 3 sono state provate le appendici alari posteriori e anteriori. Le posteriori agiscono direttamente sulla diminuzione della resistenza diminuendo la scia e recuperando pressione sulle superfici al posteriori. Quelle anteriori come detto nei precedenti capitoli hanno una funzione più delicata e meno scontata. I dati sono stati presi dunque al solo scopo di esser utilizzati in un futuro nel modello aeroelastico statico.

Ali verticali posteriori

Come anticipato nei capitoli precedenti si tratta di alette posizionate posteriormente il cui scopo è quello di cercare di richiudere il flusso posteriore riducendo la scia del nostro corpo in esame.

Nelle seguenti visualizzazioni è possibile vedere la configurazione vista nei precedenti capitoli, sta volta nel reale.

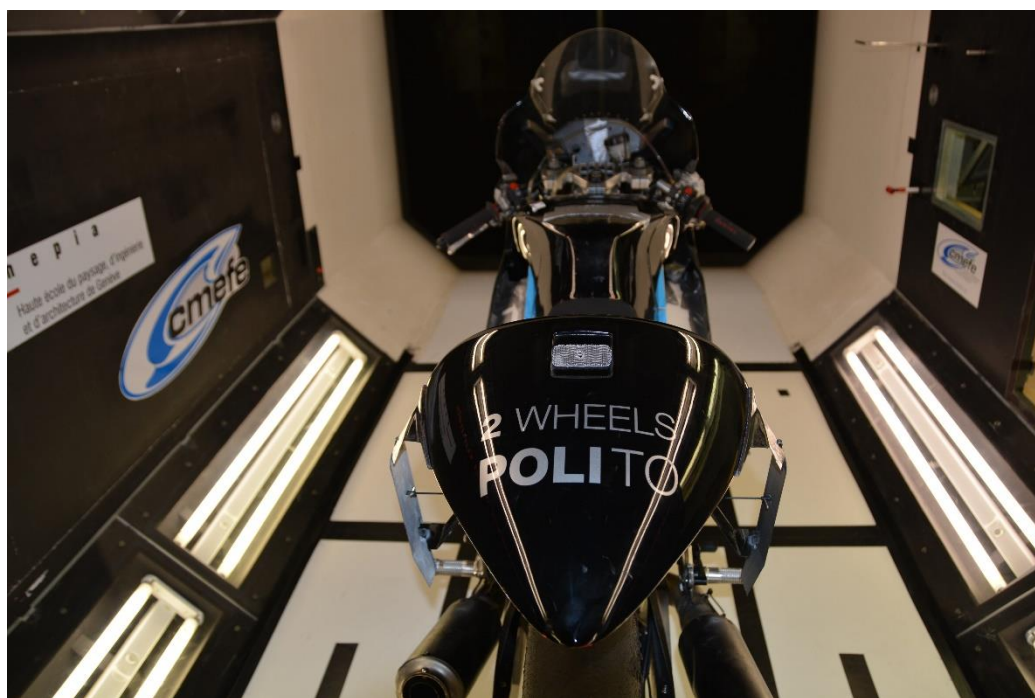


Figura 4-11 Vista dal retro delle alette verticali posteriori con il sistema a due rood per la variazione del calettamento da remoto.



Figura 4-12 Dettaglio laterale delle alette verticali posteriori

Le prime prove a distanza dal regolamento non hanno dato i risultati sperati, si veda nel grafico della pagina successiva i test da 31-34, registrando aumenti lievi della resistenza, interessante però notare come ai 15 gradi di inclinazione queste comincino a fare il loro lavoro, riabbassando il C_x , anche se non abbastanza in tale setup (test 33-34).

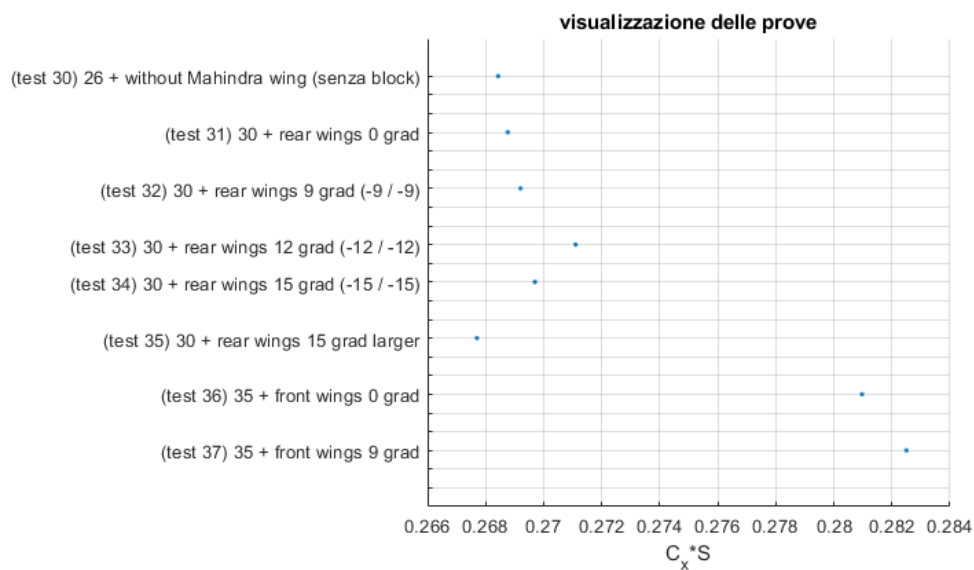


Figura 4-13 Visualizzazione delle prove: test ali posteriori, da test 31 a 35 e delle anteriori al test 36 e 37.

Si è deciso allora di spostare le alette più esternamente, portandosi al limite previsto a progetto, variando dunque il calettamento delle ali all'esterno di 10 mm, ottenendo i risultati sperati.

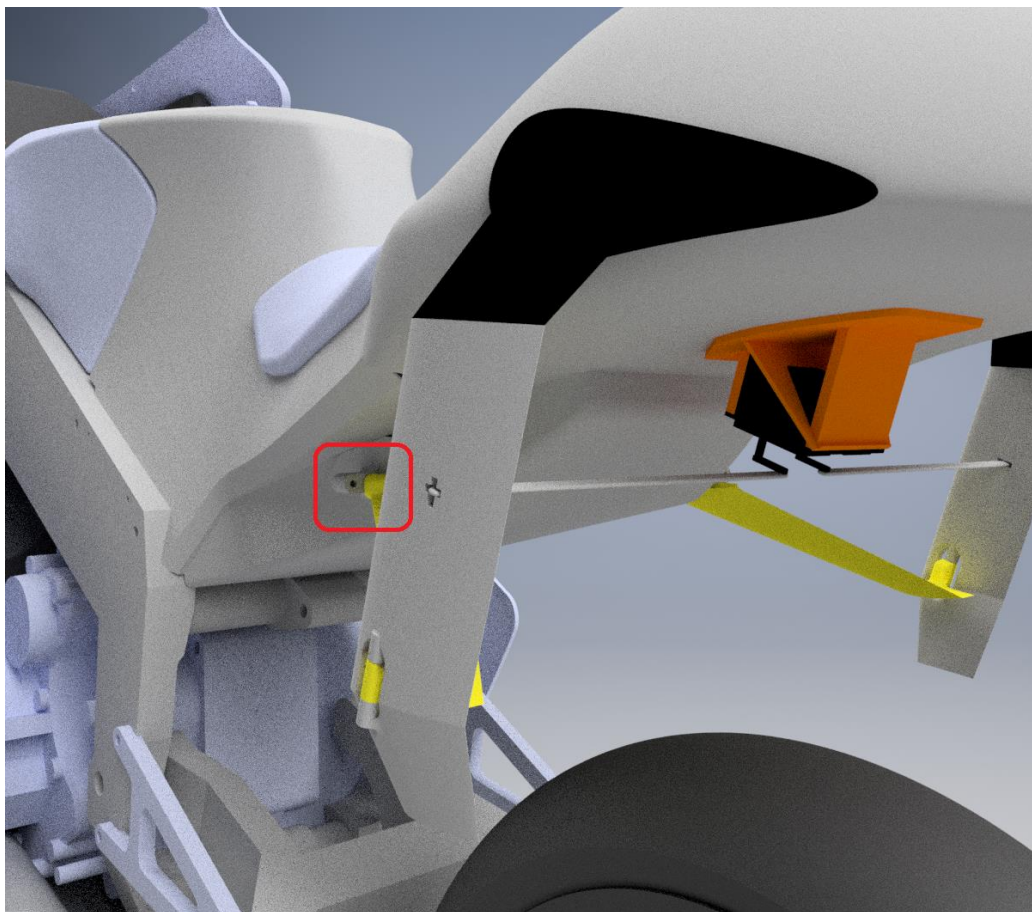


Figura 4-14 Dettaglio dell'attacco posteriore per l'allargamento delle alette, spostando il bullone sul foro cerchiato in rosso, il calettamento si allarga di un centimetro dalla posizione iniziale.

Ali anteriori

Per quanto riguarda le ali anteriori non siamo riusciti a spingerci oltre ai 9 gradi angolo di attacco a causa del cedimento dei servomotori utilizzati, le forze aerodinamiche andarono oltre la coppia di stallo degli stessi.

Nelle figure successive si possono osservare le ali stampate in 3D montate in moto.

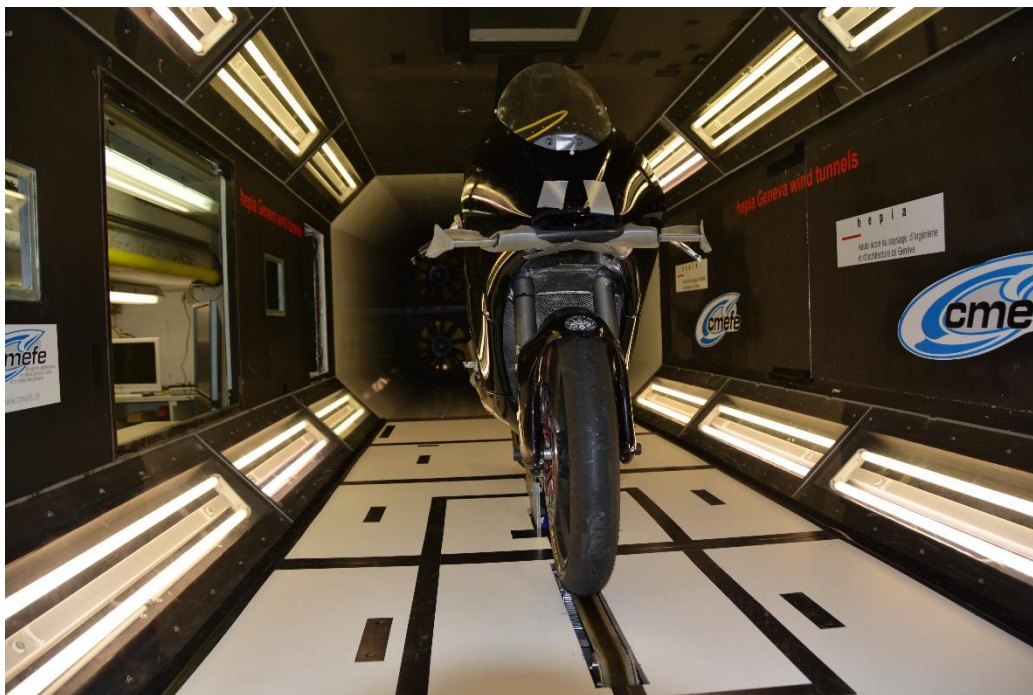


Figura 4-15 Vista anteriore delle alette anteriori, con presa d'aria modificata e alloggiamento dei servomotori per la variazione del calettamento da remoto.

È possibile notare come la loro aggiunta porti la resistenza ai valori originali, ma registriamo una diminuzione di due terzi del C_z e del 3% del C_m (coefficiente di momento cabrante).

Sommario terzo giorno:

L'aggiunta delle ali orizzontali posteriori alla configurazione precedente ci ha permesso dunque di arrivare al seguente risultato con una ottimizzazione di quasi il 2%:

$$S \cdot C_{x_{\text{minimo ottenuto}}} = \mathbf{0,2677} \text{ guadagno al } 11,6\% \text{ (dalla configurazione base)}$$

4.4 Test quarta giornata

Nella quarta e ultima giornata di test, partendo ovviamente sempre dalla migliore configurazione ottenuta, si è andati dapprima a cercare di capire come l'angolo di inclinazione della moto influisca sulla resistenza all'avanzamento, passando poi all'aggiunta di due nuove appendici aerodinamiche e attuazione di modifiche all'airbox.

Variazione angolo di pitch

L'angolo di inclinazione della moto viene eseguito tramite una livella elettronica posta su un piano di riferimento solidale alla moto, in questo caso una superficie piatta sul telaio.

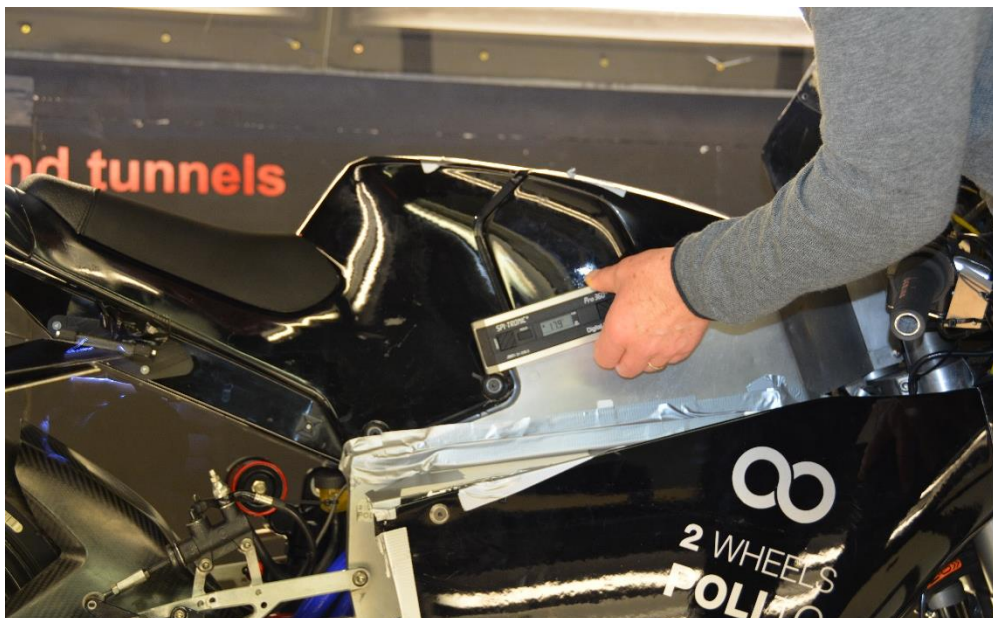


Figura 4-16 Piano di riferimento su cui viene misurato l'angolo di inclinazione tra prove successive.

Si è partiti dunque misurando l'angolo di inclinazione del telaio del giorno precedente, di valore pari a 20.5° e ripetendo la misura (test 38 nella Figura 4-17).

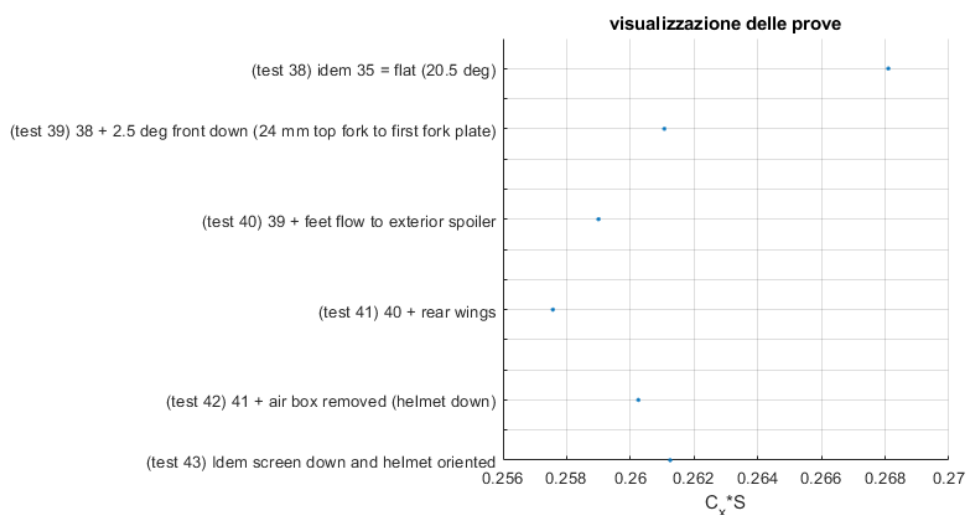


Figura 4-18 rappresentazione grafica dei valori della quarta giornata di test

Dopo di che si è passati a una inclinazione di 18° ossia inclinando in avanti (abbassando il fronte) di 2.5° , i guadagni di questa configurazione sono visibilmente alti, si registra una diminuzione del 2% rispetto alla configurazione precedente.

Deviazione del flusso a valle dei radiatori (test 40)

Avendo deviato il flusso d'aria in uscita dai radiatori lateralmente al motociclo, questo viene scaricato nella zona pedane, sottoponendo a una corrente abbastanza energica una gran quantità di componenti meccanici e gli stivali.

Essendo io stesso a condurre le prove come pilota e sentendo una pressione effettivamente alta sui piedi decisi di provare a deviare questo flusso all'esterno così da evitare che bagnasse tutte le superfici esposte alla corrente in quella zona.

La soluzione adottata dunque consta di uno spoiler (molto grezzamente costruito con del PVC) atto allo scopo.

Nelle immagini seguenti è possibile avere una chiara rappresentazione di dello spoiler in questione.

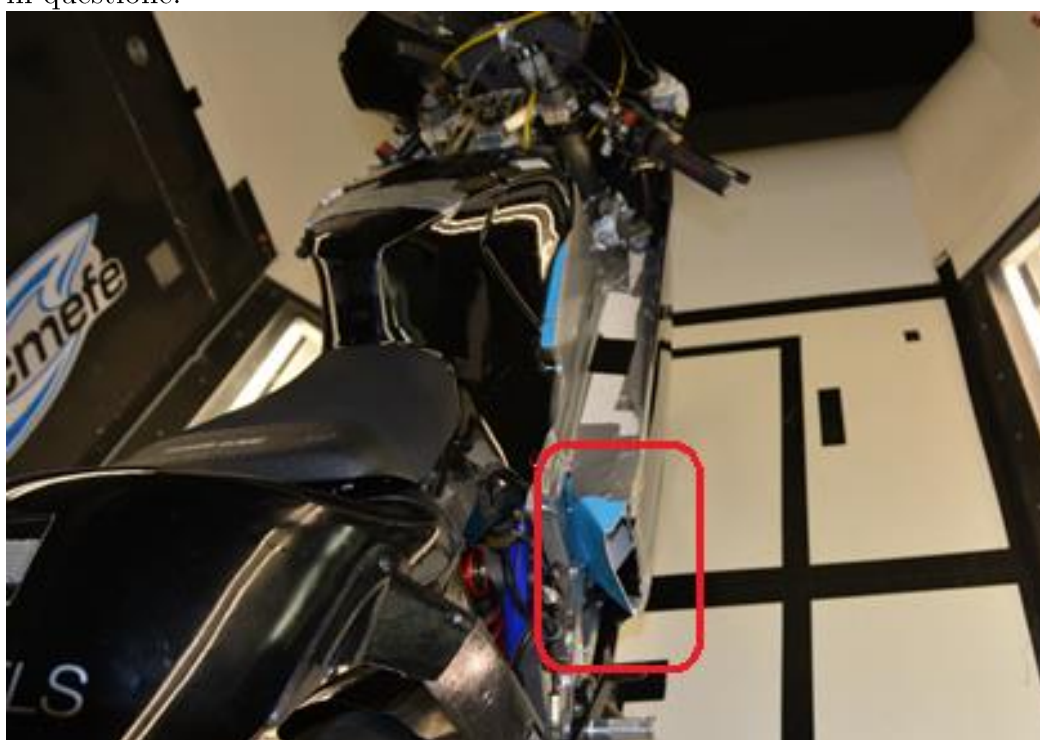


Figura 4-19 Dettaglio dello spoiler all'uscita del radiatore, tra le carenature interne ed esterne.

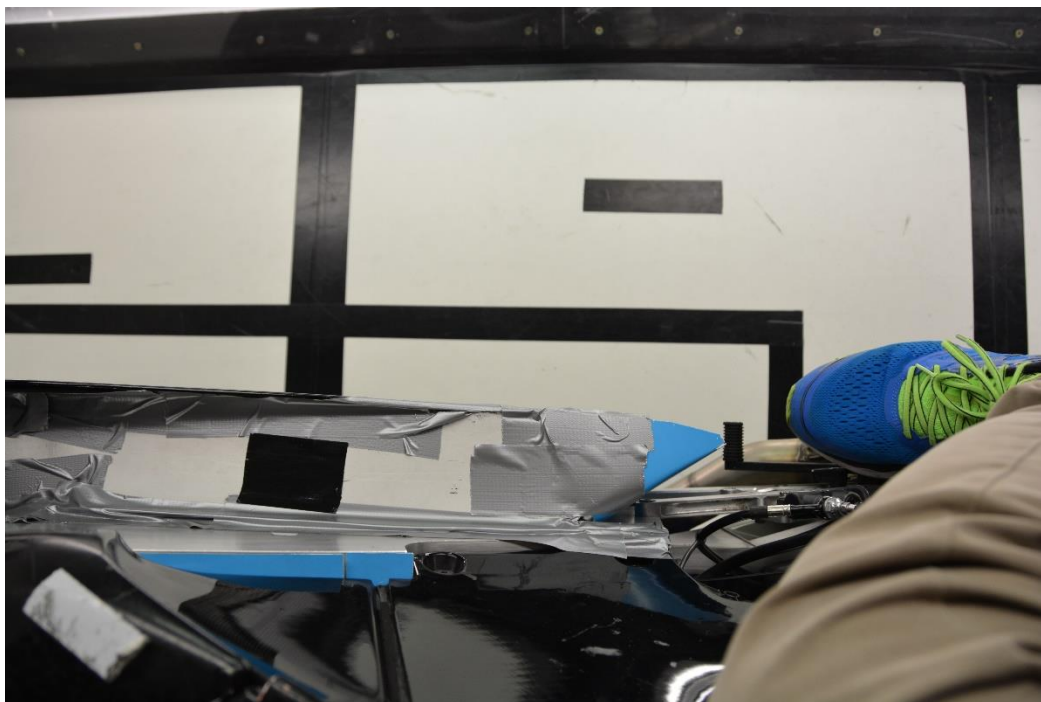


Figura 4-20 Vista dall'alto dello spoiler

Anche con questa piccola modifica si è riscontrato un leggero miglioramento dello 0.6% dell' SCx

Appendici orizzontali posteriori (test 41)

Come già precedentemente anticipato nella sezione 3.8 “modifica codino”, si voleva contrastare la tendenza del flusso posteriore al creare un forte down-wash cercando dunque di raddrizzare questa corrente recuperando la pressione sul codino.

Si è attuato ciò inserendo delle appendici alari che raccordassero il flusso a un piano parallelo al terreno.

Sebbene dall'analisi CFD di tale configurazione non si fossero riscontrati risultati tangibili, forse a causa del modello di turbolenza utilizzato e dal modello di pilota, si è deciso comunque di realizzare e provare tali appendici.



Figura 4-21 Dettaglio laterale del profilo orizzontale

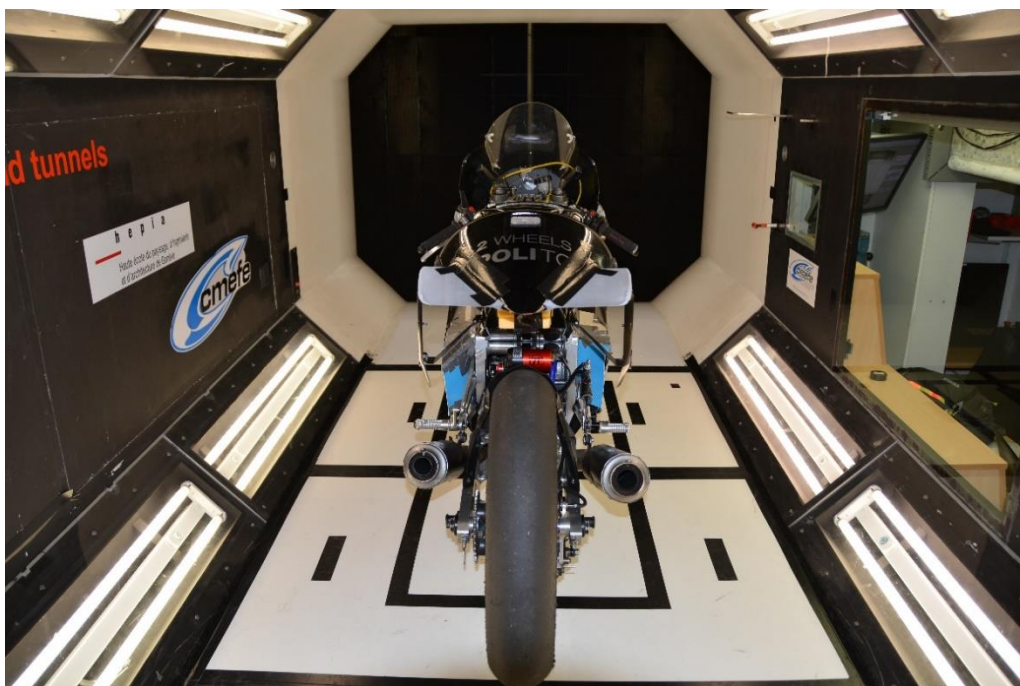


Figura 4-22 Le ali orizzontali, in grigio, viste posteriormente.

Anche in questo caso si riscontra sperimentalmente una diminuzione del' SCx, come si evince nel grafico sottostante con l'andamento delle prove dall'esito positivo tra test 40 test 41.

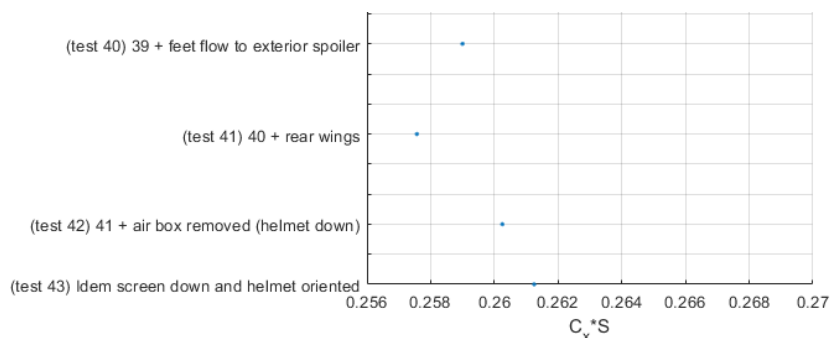


Figura 4-23 Visualizzazione grafica dell'ultima parte di giornata di test.

Successivamente si sono provate altre modifiche sostanziali all'airbox cercando di abbassare il più possibile il corpo del pilota, ma ciò instaurava scorretti orientamenti della gobba posteriore e del casco interferendo in negativo. Esponendo infatti tutta la schiena del pilota al flusso d'aria esterno, aumentando indubbiamente la superficie bagnata costantemente dal flusso esterno, si aggravava l'SCx (test 42-43), ciò ci ha spinto ad abbandonare tale configurazione.





Figura 4-24 Differenza di posizione del pilota dopo e prima della rimozione dell'air-box, cerchiata in rosso nella prima immagine si può notare la differenza tra le posizioni del mento del pilota una volta tolta la copertura nera dell'airbox originale e sostituita con una copertura più bassa in pvc bianco.

4.5 Sommario finale

L'insieme delle configurazioni precedenti accoppiate allo spoiler e all'ala posteriore hanno permesso il raggiungimento del risultato finale sotto riportato.

$S \cdot Cx_{\text{minimo ottenuto}} = 0,2576$ guadagno al 14,9% (dalla configurazione base)

La configurazione finale dunque consta dei seguenti miglioramenti:

- chiusura meccanizzata del foro tra forcelle e carena.
- modifica bombatura del cupolino in zona mani e del labbro ella presa.
- canalizzazione dei flussi interni sino allo stivaletto con aggiunta dello spoiler.
- complesso ali posteriori orizzontali e verticali.
- assetto della moto (o carenature) inclinate in avanti.

5 Conclusioni

Nonostante le varie miglirie appurate, non tutte la soluzione verranno poi installate in moto. Le componenti anche se solo visivamente invasive tendono ad essere bocciate dai tecnici ai quali spetta comunque l'ultima parola, in oltre è stata vietata in una seconda review del regolamento la presa d'aria dinamica, costringendo non solo ad escludere le miglirie alla presa d'aria, ma anche a chiudere tale bocca ridisegnando un'opportuna copertura.

Un fatto che ritengo importante sottolineare, osservato durante le prove è l'utilizzo delle geometrie variabili.

Ho riscontrato che qualsiasi punto critico aerodinamico è più velocemente ottimizzabile se si prevede a progetto la possibilità di variare angolazioni e posizioni di appendici e coperture. Una volta trovata dunque la combinazione di posizioni migliore si passa poi alla progettazione e validazione del componente a geometria fissa.

Altro punto su cui soffermerei l'attenzione è la qualità delle parti provate in galleria.

Molte di queste soluzioni sono state prodotte sul momento a mano utilizzando fogli di plastica e fissate con prevalenza di nastro adesivo e fascette, non escluderei dunque che una produzione più attenta di queste parti possa produrre in futuro risultati migliori di quelli osservati. Stesso discorso vale per le parti realizzate in stampa 3D.

I valori ricavati in galleria è importante sottolineare che non corrispondono al vero a meno di un coefficiente correttivo. Questo perché la galleria per come concepita non corrisponde di fatto al vero con molteplici effetti sistematici che ne concernono, l'effetto chiusura per fare un esempio. È possibile ricavare tale correzione tramite gli storici di test in pista e in galleria di precedenti motocicli, anche con l'aiuto di analisi CFD. Tali coefficienti sono dunque noti, ma rappresentano dati sensibili a causa della dipendenza di questi da test condotti in sede da altre case costruttrici, non verranno dunque riportati in questa trattazione. Essendo solo un coefficiente correttivo ovviamente ciò non inficia i ragionamenti fatti sin ora, soprattutto se si parla in guadagni percentuali.

5.1 Sviluppi futuri

Un aspetto che sicuramente bisognerà considerare e portare avanti in futuro è un modello aero-meccanico (statico almeno) comprensivo delle rigidità delle sospensioni per lo studio dell'esistenza di un ottimo tra presenza di ali frontali e minimo della resistenza al variare dell'angolo di pitch, visto il forte accoppiamento di quest'ultimo sul valore di resistenza all'avanzamento.

Sempre a parer mio si potrebbe lavorare molto sull'abbigliamento del pilota quali la tuta e stivali, ritengo infatti che molte delle criticità ed inefficienze del complesso moto pilota sia proprio la non presa in considerazione di ciò, né da chi progetta le carene, né da chi si occupa di abbigliamento.

Giunti dunque poi al massimo di capacità penetrante del motociclo l'evoluzione ultima sarà quella di cercare di aumentare il carico aerodinamico in curva per aumentare la velocità di percorrenza. Per far ciò un ottimo punto di partenza sarà quello proposto da Vojtech Sedlak [1] dove presenta anzi tutto come il carico aerodinamico

influisca positivamente sulle prestazioni in curva e come evolvere le alette a tale scopo, grazie all'interferenza con il pilota

6 Bibliography

- [1] V. Sedlak, «Motorcycle Cornering Improvement: An Aerodynamical Approach based on Flow Interference,» Royal Institute of Technology KTH 2012, 2012.
- [2] Giorgio Pagliara and Giuseppe Ganio, «Aerodynamic Analysis of a Motorcycle and Rider on a high speed corner,» in *dynamicsv201_0*.
- [3] H. Patrick, «A CFD approach to improve wind tunnel tests-moto2 aerodynamics the hepia global methodology,» HEPIA.