



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Meccanica

Progetto delle superfici aerodinamiche di un'autovettura Formula SAE

Aerodynamic surfaces design of a Formula SAE car

Relatore: Chiar.mo

Prof. Renato Ricci

Tesi di Laurea di:

Ludovico Croce

Correlatore:

Dott. Matteo Falone

A.A. 2020 /2021

*A Nonnetta,
che spero di aver reso fiero di me e che mi auguro
possa continuare ad insegnarmi tanto anche da lassù*

Indice

Sommario

Indice.....	5
Sommario	9
Capitolo 1	11
Cos'è la Formula SAE	11
1.1 La competizione.....	11
1.2 Eventi statici.....	13
1.2.1 Business Plan Presentation Event.....	13
1.2.2 Cost and Manufacturing Event	13
1.2.3 Engineering Design Event	14
1.2.4 Punteggio degli eventi statici.....	14
1.3 Eventi dinamici	15
1.3.1 Acceleration Event.....	15
1.3.2 Skidpad Event	15
1.3.3 Autocross Event	16
1.3.4 Endurance Event.....	16
1.3.5 Efficiency Event.....	17
1.3.6 Punteggi degli eventi dinamici.....	17
1.4 Il Polimarche Racing Team.....	18
Capitolo 2	21
Cenni di aerodinamica.....	21
2.1 Le azioni aerodinamiche	22
2.2 I profili alari e i concetti fondamentali	23
2.3 Aerodinamica nelle vetture elettriche.....	27
Capitolo 3	31

Studio preliminare ala anteriore	31
3.1 Regolamento e limitazioni	31
3.1.1 Roll Rate e Pitch Angle	33
3.2 Velocità e numero di Reynolds	39
3.3 Parametri per la modifica della configurazione ala anteriore	40
3.3.1 Scelta del profilo per l'ala principale	40
3.3.2 Scelta del profilo per il flap	45
3.3.3 Lunghezza corde ala principale e flap	46
3.3.4 Tipo di accoppiamento Main-Flap	46
3.3.5 Posizione dei flap rispetto al profilo principale	46
3.3.6 Altezza del profilo da terra	47
3.3.7 Angolo di calettamento	49
Capitolo 4	53
Progettazione ala anteriore	53
4.1 Primo modello 3D	53
4.2 Secondo modello 3D (Main svergolato, flap non svergolati)	59
4.3 Terzo modello 3D (Main svergolato, flap svergolati)	62
Capitolo 5	66
Progettazione musetto, fondo e montanti per generazione Y250.....	66
5.1 Limiti regolamento	66
5.2 Musetto	67
5.2.1 Problemi di partenza della P4 Evoluzione	67
5.2.2 Progetto del nuovo musetto.....	68
5.3 Fondo	74
5.3.1 Introduzione del Tea-Tray.....	74
5.3.2 Progettazione del Tea-Tray.....	75

5.4 Montanti per la generazione di vortici Y250	83
5.4.1 Introduzione sul vortice Y250	83
5.4.2 Progettazione del nuovo montante.....	84
Capitolo 6	85
Conclusioni	85
Bibliografia	87
Ringraziamenti	91

Sommario

Questo studio si è incentrato sulla progettazione delle superfici aerodinamiche anteriori della futura vettura Formula SAE a trazione elettrica del Polimarche Racing Team.

Lo studio è avvenuto in collaborazione con il collega e amico Alessandro Cicchini, il quale ha fornito un aiuto fondamentale per il raggiungimento dei risultati.

La collaborazione tra lui e il sottoscritto ha fatto sì che il lavoro fosse complementare e ben integrato.

L'obiettivo del lavoro su cui è incentrata la tesi è stato quello di partire dall'auto precedente (chiamata P4 Evoluzione) con motore a combustione interna e creare una vettura che avesse delle prestazioni dal punto di vista aerodinamico adatte a una monoposto a trazione elettrica.

In particolare, si sono progettate i seguenti componenti:

- la nuova ala anteriore, concentrandoci più sulla massimizzazione dell'Efficienza piuttosto che della Lift;
- il nuovo musetto della vettura, cercando di ottenere il minimo valore di resistenza aerodinamica e di minimizzare la forza aerodinamica verso l'alto;
- la parte anteriore del fondo, progettandola in maniera tale da garantire un afflusso di aria maggiore possibile, allo scopo di aumentare il contributo di Downforce del fondo (fattore essenziale per una monoposto a trazione elettrica);
- i nuovi montanti per il fissaggio dell'ala anteriore.

Capitolo 1

Cos'è la Formula SAE

1.1 La competizione

La Formula SAE, è una competizione universitaria tra gli atenei di tutto il mondo che prevede la progettazione, costruzione e sviluppo di piccole vetture stile formula. L'obiettivo di questa competizione è quello di creare un ambiente universitario che replichi le condizioni che si hanno all'interno delle aziende, dando la possibilità allo studente di abituarsi alle condizioni che troverà nel mondo del lavoro e aumentando il suo bagaglio di conoscenze.

Il team stesso viene visto come una piccola azienda in un contesto di motorsport. È compito degli studenti concepire, progettare, produrre, testare, promuovere e valutare economicamente il prototipo.

La valutazione dell'operato avviene in sede di gara, dove il team viene valutato, tramite la vettura, in due macroaree che prendono il nome di Eventi Statici ed Eventi dinamici. Il campionato internazionale fu istituito nel 1981 dalla SAE, *Society of Automotive Engineers* e, ad oggi conta svariati eventi non ufficiali e 13 eventi ufficiali, validi per il piazzamento nella Formula Student World Ranking List, 3 in America, 7 in Europa e 3 in Asia – Oceania.



Figura 1.1 Foto panoramica Formula Student East 2021

Prima di poter accedere agli eventi dinamici l'auto deve superare diverse ispezioni tecniche:

- *Pre-inspection*: pre-ispezione dove va presentato tutto l'equipaggiamento piloti, che deve rispettare i requisiti di sicurezza, 2 estintori non usati e in corso di validità, 2 set di gomme, uno per l'asciutto e uno per il bagnato, a cui poi segue l'egress test, nel quale il pilota deve eseguire l'uscita in caso di emergenza in meno di 5 secondi;
- *Mechanical Inspection*: ispezione delle componenti della vettura, compreso il cablaggio elettrico;
- *Tilt test* nel quale la vettura viene inclinata lateralmente prima di 45 poi di 60 gradi per controllare la stabilità a ribaltamento e la fuoriuscita di liquidi;
- *Rain Test* nel quale la vettura viene sottoposta a getti d'acqua che simulano la pioggia battente ed ha lo scopo di verificare la tenuta stagna delle componenti elettriche;
- *Vehicle Weighting*: pesa del veicolo;
- *Brake Test*: prova di frenata nel quale il veicolo, dopo una breve accelerazione rettilinea, deve bloccare contemporaneamente tutte e quattro le ruote.

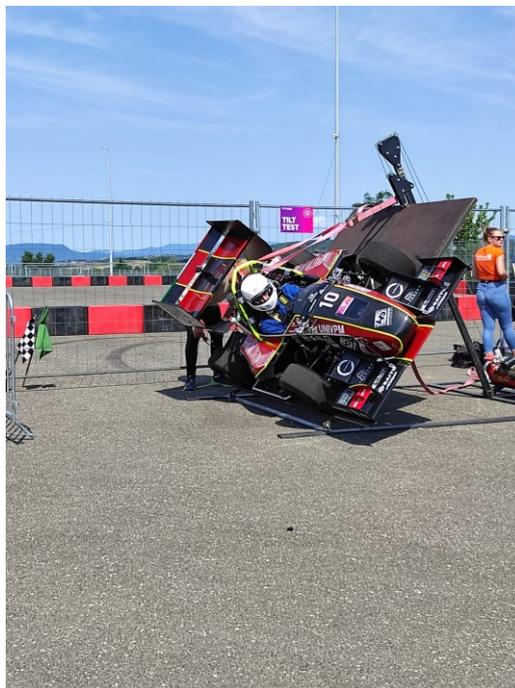


Figura 1.2 P4 Evoluzione durante il Tilt Test

1.2 Eventi statici

1.2.1 Business Plan Presentation Event

L'obiettivo del Business Plan Presentation è valutare l'abilità del team nello sviluppare un'idea di business basata sul proprio prodotto, ossia il prototipo di un'auto da corsa, e rendere appetibile tale idea a dei possibili investitori. I giudici vestono i panni di possibili investitori e partners interessati ad investire nell'idea di business presentata dal team. In questo evento non si giudica la performance della vettura sul tracciato.

1.2.2 Cost and Manufacturing Event

Il Cost and Manufacturing Event valuta la capacità del team nel comprendere il processo produttivo e i relativi costi associati. Si valuta la capacità di gestire i fondi e le risorse a disposizione nel migliore dei modi possibili includendo anche tutte le considerazioni da fare quando si parla di compromessi, make or buy. Negli ultimi anni viene posta l'attenzione anche sulla gestione degli scarti e degli sprechi di produzione oltre che sull'adozione di soluzioni sostenibili dal punto di vista ambientale.



Figura 1.3 Cost Manufacturing Event Formula Student East 2021

1.2.3 Engineering Design Event

L'obiettivo dell'Engineering Design Event è valutare le scelte ingegneristiche effettuate dal team nella progettazione e validazione delle componenti della vettura. I giudici valutano le scelte fatte in termini di progettazione e utilizzo di componenti non direttamente progettati dagli studenti ed ogni scelta deve essere motivata attraverso dati e validazioni preparati dal team.



Figura 1.4 Design Event Formula Student East 2021

1.2.4 Punteggio degli eventi statici

Lo scoring per gli eventi sopra citati è il seguente:

Evento	Punteggio
Business Plan Presentation	75
Cost and Manufacturing	100
Engineering Design	150

Tabella 1.1 Punteggio Eventi statici

1.3 Eventi dinamici

1.3.1 Acceleration Event

La prova si svolge su un percorso rettilineo lungo 75 m e largo 5 m, prevede una partenza da fermo con successiva accelerazione lungo tutto il rettilineo. Deve essere effettuata da due piloti diversi e ciascun pilota ha a disposizione due tentativi. Il punteggio viene calcolato in base alla seguente formula:

$$ACCELERATION \ SCORE = 71.5 \left(\frac{T_{max} - 1}{0.5} \right)$$

dove T_{team} è il miglior tempo del team incluse le penalità e T_{max} è 1,5 volte il miglior tempo tra tutti i team incluse le penalità.

1.3.2 Skidpad Event

La prova si svolge su un percorso a forma di 8, con due cerchi concentrici (due per lato) indicanti i limiti della carreggiata, che è di 5 m. Il diametro del cerchio piccolo è di 15,25 m e la distanza tra i due centri è pari a 18,25 m. La prova, come per l'Acceleration, deve essere effettuata da due piloti ed ogni pilota ha a disposizione due tentativi. Il pilota, una volta entrato nel percorso, deve eseguire due volte il cerchio di destra e conseguentemente due volte il cerchio di sinistra. Il tempo viene preso nel secondo giro di ciascun cerchio e si fa la media tra i due giri

$$SKIDPAD \ SCORE = 71.5 \left(\frac{\left(\frac{T_{max}}{T_{team}} \right)^2 - 1}{0.5625} \right)$$

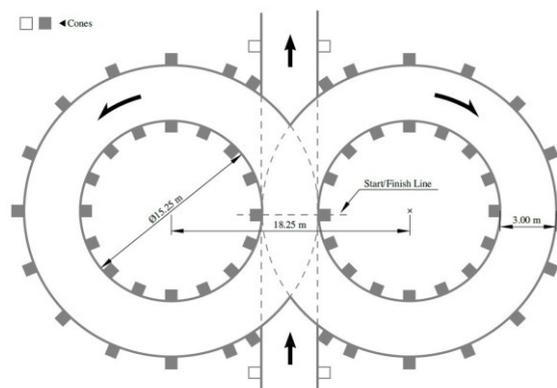


Figura 1.5 Layout dello Skidpad Event

1.3.3 Autocross Event

Mantenendo lo stesso ordine di esecuzione (due piloti, ognuno con due tentativi), si deve percorrere un circuito composto da rettilinei, slalom, curve lente, curve veloci e tornanti nel minor tempo possibile. Il pilota non conosce il circuito e non ha la possibilità di fare dei giri di prova; può solo visionare il circuito nel Track Walk che avviene poche ore prima dell'evento.

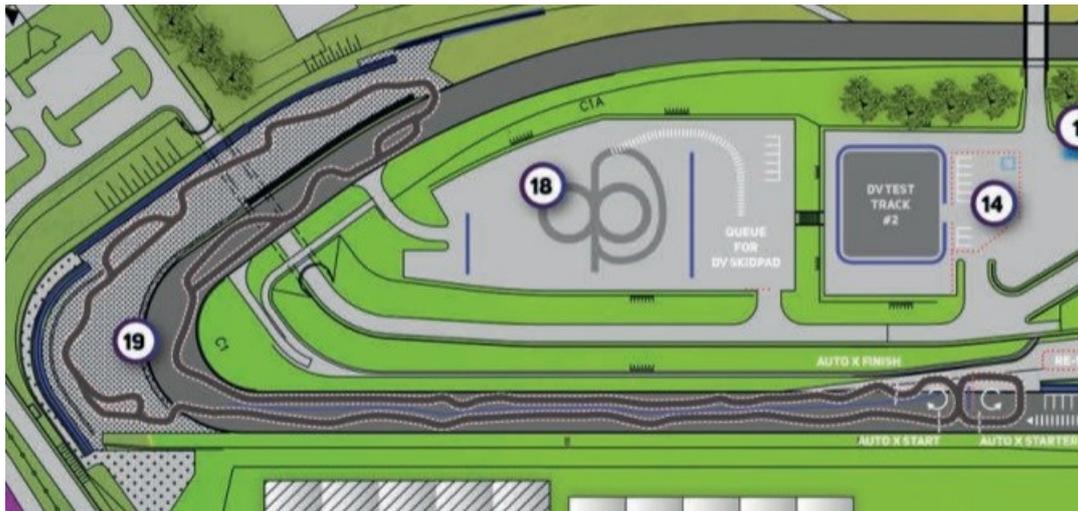


Figura 1.6 Tracciato Autocross/Endurance Formula Student East 2021

Il punteggio viene calcolato in base alla seguente formula:

$$AUTOCROSS \ SCORE = 95.5 \left(\frac{\frac{T_{max} - 1}{T_{team}}}{0.25} \right)$$

1.3.4 Endurance Event

In questo evento si pone la vettura sotto sollecitazione massima, allo scopo di valutarne l'affidabilità. L'evento si svolge sullo stesso circuito dell'autocross ma prevede di percorrere 22 km con il cambio pilota dopo aver percorso 11 km. L'ordine di esecuzione dell'evento è dato dalla classifica dei tempi dell'autocross.

Il punteggio del team viene calcolato in base alla seguente formula:

$$ENDURANCE \ SCORE = 300 \left(\frac{\frac{T_{max} - 1}{T_{team}}}{0.333} \right)$$

1.3.5 Efficiency Event

L'obiettivo è quello di valutare l'efficienza nei consumi della vettura durante l'Endurance ed è limitato ai soli team che riescono a concludere tale evento.

Lo scoring è diverso dagli eventi descritti in precedenza: si calcola dapprima un efficiency factor, ossia un coefficiente indicante l'efficienza della vettura in funzione del tempo di completamento dell'evento e del volume del serbatoio. Successivamente si calcola lo scoring come visto in precedenza:

$$EFFICIENCY\ FACTOR = \frac{T_{min} \cdot V_{min}}{T_{team} \cdot V_{team}}$$
$$EFFICIENCY\ SCORE = 100 \left(\frac{\frac{E_{min} - 1}{E_{team}}}{\frac{E_{min} - 1}{E_{max}}} \right)$$

1.3.6 Punteggi degli eventi dinamici

Lo scoring per gli eventi appena citati è:

Evento	Punteggio
Acceleration	75
Skidpad	75
Autocross	100
Endurance	325
Efficiency	100

Tabella 1.2 Punteggio eventi dinamici

1.4 Il Polimarche Racing Team

Il Polimarche Racing Team è il team di Formula Student dell'Università Politecnica delle Marche e nasce nel Settembre del 2013, grazie all'iniziativa del Professor Dario Amodio e al supporto continuo dei dipartimenti di Costruzione di Macchine, Meccanica Applicata, Misure e altri ancora all'interno dell'Ateneo.

Il team è composto da circa 60 studenti, provenienti dai vari corsi della facoltà di Ingegneria, principalmente Meccanica, Elettronica ed Informatica e da studenti dalla facoltà di Economia, vista la presenza di eventi in cui la loro figura risulta essere necessaria e maggiormente efficace. La struttura del team rispetta quella di una vera e propria azienda, con un direttivo formato dai responsabili di reparto, supervisionati dal Team Manager e dal Responsabile Tecnico, che fanno riferimento al Prof. Amodio.



Figura 1.7 Foto Team Formula Student East 2021

Dalla nascita fino ad oggi, la squadra ha prodotto fisicamente quattro generazioni di vetture, ognuna più avanzata della precedente, con in particolare due modelli con specifica B, o per meglio dire evoluti rispetto al precedente anno di produzione, apportando significative migliorie alla macchina.

Le vetture sono elencate nell'ordine seguente:

- Peacock 1;
- Peacock 2;
- Peacock 3;
- Peacock 3 EVO;
- Peacock 4;
- Peacock 4 Evoluzione.



Figura 1.8 Peacock 1



Figura 1.9 Peacock 2



Figura 1.10 Peacock 3



Figura 1.11 Peacock 3 evoluzione



Figura 1.12 Peacock 4



Figura 1.13 Peacock 4 Evoluzione

Quest'ultima è l'auto da cui partirà lo studio di progettazione per la P5 (prima vettura elettrica).

Capitolo 2

Cenni di aerodinamica

L'aerodinamica è la branca della fluidodinamica che studia la dinamica dei gas, in particolare dell'aria, e la loro interazione con corpi solidi.

L'aerodinamica nasce in campo aeronautico ma presto assume importanza anche in ambito terrestre sia in termini di riduzione della resistenza aerodinamica sia per quanto riguarda la portanza.

Infatti, questa materia è stata per diversi secoli al centro dell'interesse dell'uomo per la volontà di quest'ultimo di volare: basti pensare ai primi modelli della macchina volante di Leonardo da Vinci.

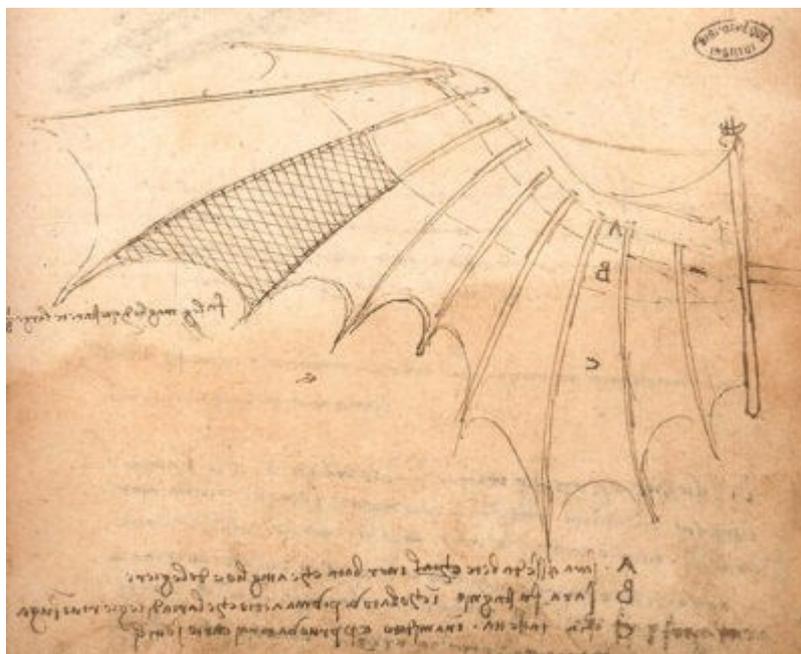


Figura 2.1 Ala della macchina volante con rivestimento a imitazione delle ali di pipistrello

Il culmine si raggiunse quando finalmente nel 1903 i fratelli Wilbur e Orville Wright riuscirono nell'epocale impresa di compiere il primo volo nella storia dell'uomo.

Da quel momento, in poco più di un secolo, questa materia ha avuto una gigantesca evoluzione sia in termini di studio dei flussi sia nei miglioramenti che l'uomo ha applicato ai profili e alle superfici aerodinamiche in generale per il raggiungimento dei suoi scopi nei vari campi di interesse.



Figura 2.2 Wilbur Wright a bordo del primo velivolo a motore del 1903

2.1 Le azioni aerodinamiche

Per comprendere pienamente lo studio dell'aerodinamica bisogna prima comprendere quelle che sono le forze che si formano a fronte di una interazione tra un corpo solido e il fluido (nel nostro caso l'aria) che lo investe.

Dobbiamo quindi valutare le azioni che il fluido esercita sulla superficie esterna del corpo stesso. Queste si formeranno in base al vento relativo tra profilo e aria.

Infatti da questa interazione si formerà:

- Una forza perpendicolare al vento relativo, la PORTANZA, in inglese Lift e per questo nelle formule indicata come L ;
- Una forza parallela al vento relativo, la RESISTENZA, in inglese Drag e per questo indicata nelle formule come D .
- La forza detta AZIONE AERODINAMICA (o FORZA AERODINAMICA o RISULTANTE AERODINAMICA) che è la somma vettoriale delle due precedenti, applicata in un punto chiamato CENTRO DI PRESSIONE.

2.2 I profili alari e i concetti fondamentali

Il progresso dell'aerodinamica non sarebbe potuto avvenire senza lo sviluppo dei profili alari, i quali hanno permesso di ottenere la portanza, che è stata la reale responsabile del volo e usata successivamente anche nel campo automobilistico, specialmente da competizione e sportivo.

Le grandezze caratteristiche di un profilo alare sono:

- 1) ASSE DI CORDA su cui si costruisce il profilo;
- 2) ESTRADOSSO: parte superiore del profilo;
- 3) INTRADOSSO: parte inferiore del profilo;
- 4) LINEA DI CAMBER: linea media fra i punti di estradosso e intradosso;
- 5) FRECCIA DI CAMBER (o CAMBER MASSIMA): distanza massima tra cora e linea di camber;
- 6) POSIZIONE CAMBER MASSIMA: coordinata x in cui si trova la camber massima;
- 7) SPESSORE MASSIMO: distanza massima tra estradosso e intradosso
- 8) POSIZIONE SPESSORE MASSIMO: distanza massima tra estradosso e intradosso;
- 9) LEADING EDGE: bordo di entrata (primo punto del profilo che incontra il flusso d'aria);
- 10) TRAILING EDGE: bordo di uscita (ultimo punto del profilo che incontra il flusso d'aria);
- 11) RAGGIO DEL NASO.

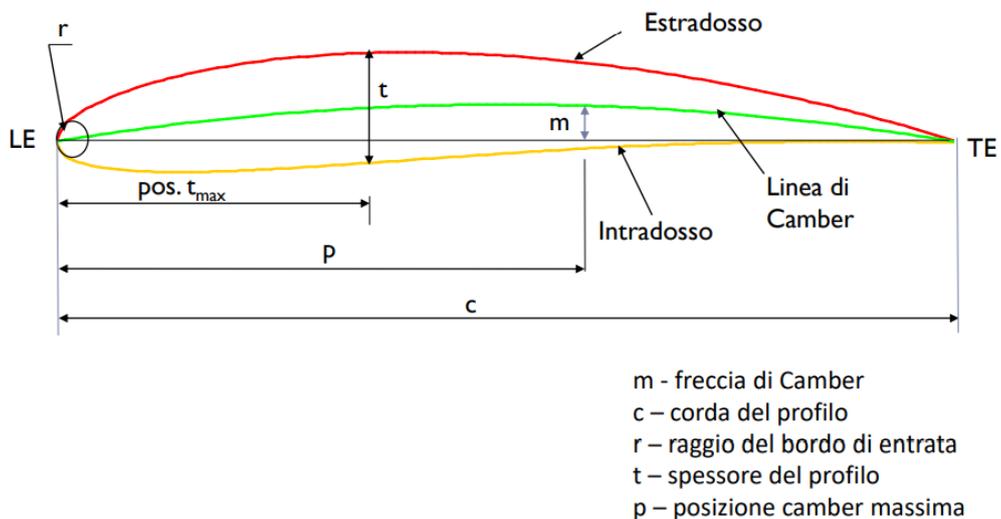


Figura 2.3 Grandezze caratteristiche di un profilo alare

Infatti la loro particolare forma geometrica permette al flusso di aria, pur rimanendo attaccato, di compiere una curva intorno ad esso. Questa curva determina una forza centrifuga la quale costringe le particelle ad allontanarsi dalla superficie riducendo così la forza degli impatti di queste ultime sulla stessa. Ciò porta ad una diminuzione di pressione.

Poiché la forza centrifuga aumenta al diminuire del raggio di curvatura, si avrà che l'abbassamento di pressione sull'INTRADOSSO del profilo sarà inferiore all'analogo abbassamento sull'ESTRADOSSO del profilo.

La PORTANZA è così data dalla differenza di depressione fra l'Estradosso e l'Intradosso.

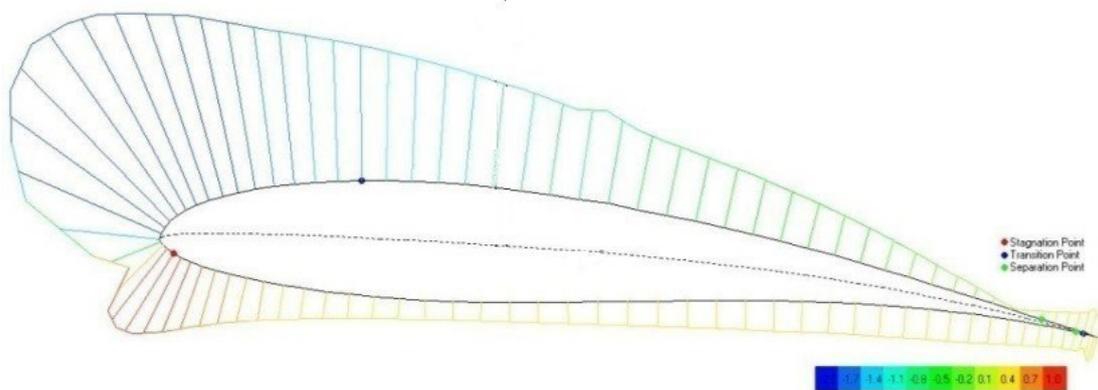


Figura 2.4 distribuzione tipica di pressione intorno ad un profilo alare

Come abbiamo detto, la portanza e la resistenza formano un sistema di riferimento solidale al vento relativo e non all'asse di corda. Nel caso particolare in cui la corda e il vento relativo coincideranno allora L e D saranno solidali ad entrambi; altrimenti, nel caso generale, tra corda e vento relativo ci sarà un angolo α chiamato ANGOLO DI ATTACCO e al variare di questo cambierà il centro di pressione.

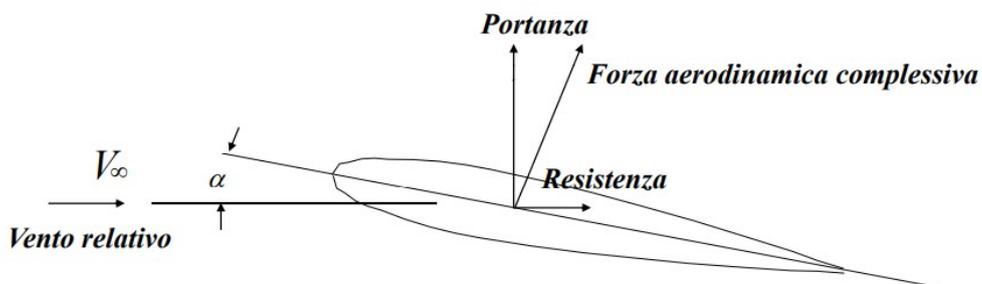


Figura 2.5 configurazione generale delle forze generate tra l'interazione tra profilo e fluido aria

Una volta definito quindi il profilo con tutte le sue grandezze caratteristiche, possiamo definire quantitativamente la portanza L e la resistenza D:

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S \cdot C_L \qquad D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D$$

dove:

- ρ è la densità dell'aria (1,225 kg/m³ al livello del mare);
- V è la velocità relativa;
- $S=C \cdot B$ è la superficie alare (dove B è la apertura alare);
- c_L è un coefficiente adimensionale chiamato *coefficiente di portanza*;
- c_D è un coefficiente adimensionale chiamato *coefficiente di resistenza*.

Spesso per confrontare problemi di diverso tipo, come ad esempio profili a corda di lunghezza diversa o che lavorano a velocità relative differenti, si utilizzano al posto della portanza L e della resistenza D, il COEFFICIENTE DI PORTANZA c_L e il COEFFICIENTE DI RESISTENZA c_D , definiti perciò con la formula inversa:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 S} \qquad C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 S}$$

Per avere una visione più ampia sui profili, viene introdotto un altro parametro, l'EFFICIENZA, definito come:

$$E = \frac{L}{D} = \frac{C_L}{C_D}$$

Come già sottolineato, la distribuzione di pressione (e quindi anche depressione) intorno al profilo risulta quindi di cruciale importanza ai fini della definizione di portanza e resistenza e, anche in questo caso, piuttosto che utilizzare la pressione punto per punto si preferisce far uso di un coefficiente adimensionale chiamato COEFFICIENTE DI PRESSIONE c_p così definito:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\rho \frac{v_\infty^2}{2}}$$

dove:

- c_p è il coefficiente che va ad adimensionalizzare la pressione intorno al profilo;
- ρ è la densità dell'aria;
- p è la pressione nel punto interessato, quella che verrà adimensionalizzata col c_p ;
- p_∞ pressione nel fluido indisturbato, cioè pressione ambiente;
- v_∞ è la velocità del fluido indisturbato.

Perciò se $p=p_\infty$ allora $c_p=0$.

Per sapere invece il valore massimo del c_p , dobbiamo trovare il punto di pressione massima, che si trova nel PUNTO DI RISTAGNO.

Su una stessa linea di corrente si può applicare l'Equazione di Bernoulli $p+\rho(v^2/2)=\text{cost}$, perciò essendo $v=0$ sul punto di ristagno, avrò $p_R=p_\infty+\rho(v_\infty^2/2)$ dove p_R è la pressione sul punto di ristagno.

Applicando le dovute sostituzioni, otterremo che c_p sul punto di ristagno è $c_{p(\text{max})}=1$.

Invece il punto dove si trova la pressione minima (ossia depressione massima) è detto PICCO DI ASPIRAZIONE (o Suction Pick) ed è il punto oltre il quale il profilo inizierà a recuperare pressione.

La distribuzione del c_p quindi cambia punto per punto sul profilo così come la pressione e ovviamente si modifica al variare dell'angolo di attacco.

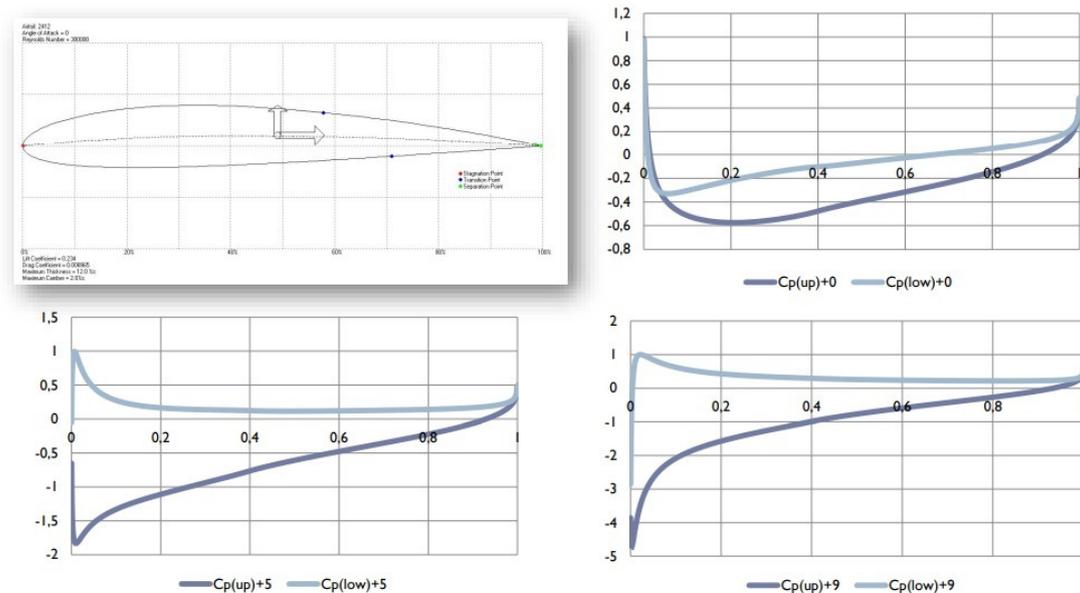


Figura 2.6 visualizzazione di un profilo e dell'andamento del c_p su intradosso ed estradosso a vari angoli di attacco

2.3 Aerodinamica nelle vetture elettriche

L'aerodinamica sulle vetture da corsa ha lo scopo di generare una forza verso il basso (Downforce), la quale va ad aumentare la reazione vincolare sulle ruote e di conseguenza aumenta l'attrito sviluppato dalle gomme sull'asfalto. Questo aumento di attrito consente di sopportare accelerazioni laterali maggiori e, di conseguenza, permette di affrontare le curve ad una velocità più elevata e contemporaneamente di frenare più efficacemente.

Da quando l'aerodinamica è entrata nel mondo delle vetture da corsa, le prestazioni, in termini di tempi sul giro, sono aumentate esponenzialmente ad una velocità che fino a quel momento era impensabile. Tanto che, alcuni campionati, per evitare che si raggiungessero velocità troppo pericolose e contenere i costi di progettazione e produzione, sono dovuti correre ai ripari limitando la possibilità di sviluppo delle componenti aerodinamiche.

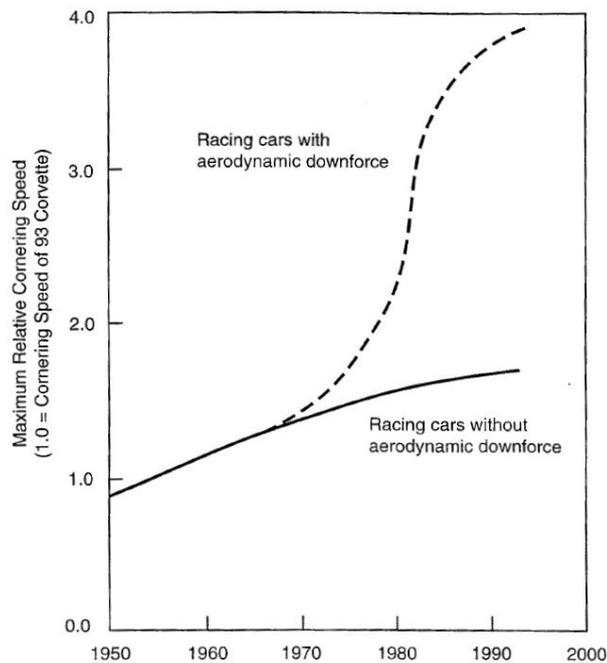


Figura 2.7 Comparazione dell'aumento delle velocità in curva tra un ipotetico scenario senza l'introduzione della Downforce e dello scenario con l'introduzione della Downforce

Il prezzo da pagare a fronte di questo aumento delle velocità in curva è il conseguente aumento della resistenza aerodinamica. Infatti, la creazione della Downforce ha sempre come effetto lo sviluppo di una resistenza aerodinamica. L'abilità del progettista sta nel cercare di massimizzare l'efficienza aerodinamica mantenendo il più possibile la spinta verso il basso.

Con l'ingresso delle vetture elettriche nel mondo delle competizioni, tale problema ha assunto un'importanza sempre maggiore.

Infatti, sulle auto a combustione interna, ad esempio una vettura di Formula 1, ci si può spingere a valori di Downforce molto elevati anche a scapito dell'efficienza in quanto si hanno a disposizione elevate quantità di potenza erogate dal motore che possono compensare l'elevata resistenza aerodinamica. L'energia necessaria ad alimentare il motore è fornita in generale da idrocarburi, i quali hanno un'elevata densità energetica, motivo per cui all'aumentare della potenza che si desidera erogare è sufficiente incrementare in quantità limitata la massa del combustibile nel serbatoio. Inoltre, all'avanzare dei chilometri percorsi, il combustibile andrà ad esaurirsi diminuendo così il peso della macchina con conseguente aumento delle prestazioni.

Al contrario, sulle auto elettriche andare ad innalzare la potenza erogata dal motore per contrastare la resistenza aerodinamica, vuol dire incrementare esponenzialmente il peso del pacco batteria, in quanto con le tecnologie attuali non si riescono a raggiungere densità energetiche paragonabili a quelle degli idrocarburi. Di conseguenza, l'aumento di potenza del motore non necessariamente si traduce in un aumento delle prestazioni complessive a causa dell'innalzamento del peso della vettura, con lo svantaggio di mantenerlo durante tutto il corso della gara.

Per questo motivo nei campionati di auto elettriche si preferisce favorire l'efficienza, cercando di limitare il più possibile l'uso di appendici aerodinamiche e favorendo metodi di produzione della Downforce più efficienti, come ad esempio sfruttando l'effetto suolo per creare una zona di depressione sul fondo.

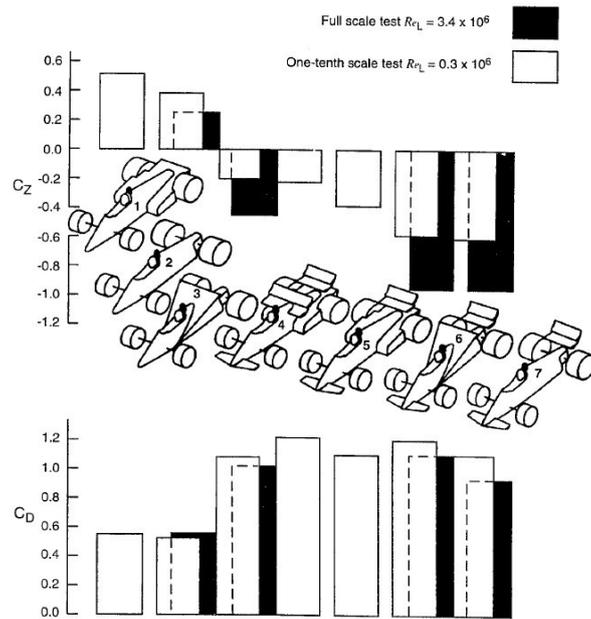


Figura 2.8 comparativa Downforce-Drag tra diverse soluzioni aerodinamiche (C_d e C_z sono rispettivamente il coefficiente di drag e il coefficiente di portanza)



Figura 2.9 Vettura del campionato Formula E



Figura 2.10 Vettura del campionato F1

FORMULA 1

MAX SPEED:
372 km/h

ACC. 0-100km/h:
1,7 s

MAX POWER:
950 CV

MAX CONSUMPTION:
110 kg/h

NOISE:
110 db



FORMULA E

MAX SPEED:
225km/h

ACC. 0-100km/h:
3 s

MAX POWER:
245 CV

MAX CONSUMPTION:
28 kWh

NOISE:
80 db

Figura 2.11 confronto vettura Formula 1 vs vettura Formula E

Per quanto riguarda le auto elettriche della Formula SAE, queste presentano una problematica in più: le velocità tipiche che si sviluppano nei circuiti di questa competizione sono molto basse e le forze aerodinamiche presentano una proporzione quadratica con la velocità. Perciò, creare una deportanza sufficiente senza introdurre appendici aerodinamiche importanti risulta molto complicato.

Da qui nasce l'esigenza di uno studio approfondito di tali appendici allo scopo di aumentare il più possibile l'efficienza.



Figura 2.12 vettura dell'università di Tallinn partecipante al campionato di Formula SAE elettrica

Capitolo 3

Studio preliminare ala anteriore

Lo scopo del nostro lavoro è stato quindi quello di migliorare le prestazioni della nuova vettura del Polimarche Racing Team a livello aerodinamico migliorando in primis quella che era l'efficienza, cercando di attenerci a valori di Downforce adeguati per quelli richiesti da un'autovettura elettrica e quindi con una massa maggiore a causa dell'elevato peso delle batterie, ma anche una distribuzione differente.

Essendo un tipo di vettura mai utilizzato e progettato finora dal Team, il quale aveva partecipato solo a competizioni con vetture con motori a combustione interna, la sfida risultava del tutto nuova. La parte iniziale del progetto è stata dedicata interamente allo studio e alla ricerca di materiale utile allo sviluppo.

Per fare ciò, si è partiti da una prima fase di studio, ricerca e valutazioni in 2D.

3.1 Regolamento e limitazioni

Come in ogni sorta di competizione, anche la Formula SAE prevede un regolamento con varie limitazioni di qualsivoglia tipologia: meccanico, geometrico, di ingombri, di pesi, di materiali, etc..

Nel concreto però questo capitolo tratterà solo quelle di stretto interesse per quello che è stato il progetto senza dilungarsi sul resto.

Infatti, il regolamento è la prima condizione al contorno imposta al progettista in qualsiasi tipo di competizione e nel nostro caso per ogni implementazione fatta, si citeranno quelle che erano le limitazioni che il regolamento esigeva a tal proposito.

Partendo dall'elemento che ha impegnato maggior tempo all'interno del progetto, cioè l'ala anteriore, le condizioni che rappresentavano un confine netto per la realizzazione erano gli obblighi di:

- mantenere una distanza minima da terra di tutte le superfici (escluse le ruote) di almeno 30 mm;
- mantenere le ruote visibili e libere fino a 75 mm dal bordo delle stesse in entrambi i lati;

- costruire le superfici aerodinamiche nella parte anteriore che andassero ad occupare una distanza massima di 700 mm dal bordo delle ruote in lunghezza e 500 mm da terra in altezza;
- mantenere un raggio minimo di curvatura di 5 mm.

T2 GENERAL DESIGN REQUIREMENTS

T2.1 Vehicle Configuration

- T2.1.1 The vehicle must be designed and fabricated in accordance with good engineering practices.
- T2.1.2 The vehicle must be open-wheeled, single seat and open cockpit (a formula style body) with four wheels that are not in a straight line.
- T2.1.3 Open wheel vehicles must satisfy the following (see also figure 3):
- The wheel/tire assembly must be unobstructed when viewed from the side.
 - No part of the vehicle may enter a keep-out-zone defined by two lines extending vertically from positions 75 mm in front of and 75 mm behind the outer diameter of the front and rear tires in the side view of the vehicle, with steering straight ahead. This keep-out zone extends laterally from the outside plane of the wheel/tire to the inboard plane of the wheel/tire assembly.

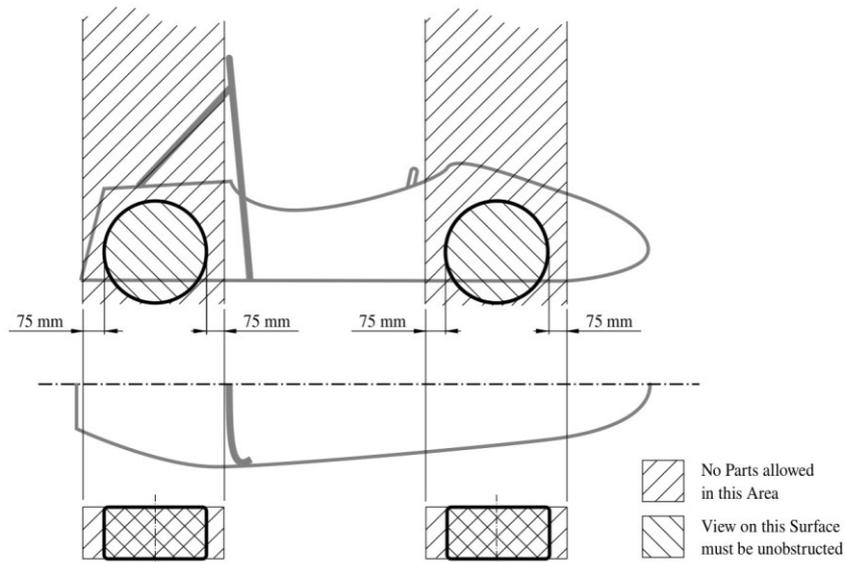


Figure 3: Keep-out-zones for the definition of an open-wheeled vehicle.

Figura 3.1 primo estratto di regolamento

T8 Aerodynamic Devices

- All aerodynamic devices lower than 500 mm from the ground and further rearward than the front axle, must not be wider than a vertical plane touching the most outboard point of the front and rear wheel/tire.
- All aerodynamic devices higher than 500 mm from the ground, must not extend outboard of the most inboard point of the rear wheel/tire.

T8.2.3 Length restrictions:

- All aerodynamic devices must not extend further rearward than 250 mm from the rearmost part of the rear tires.
- All aerodynamic devices must not extend further forward than 700 mm from the fronts of the front tires.

T8.2.4 All restrictions must be fulfilled with the wheels pointing straight and with any suspension setup with or without a driver seated in the vehicle.

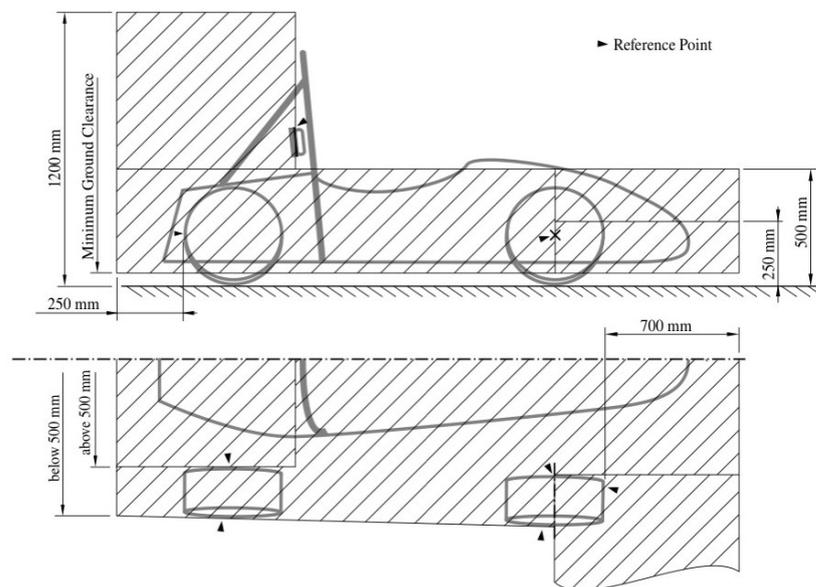


Figure 15: Maximum dimensions and positioning of aerodynamic devices. The positioning space is further restricted, see T 2.1.

Figura 3.2 secondo estratto di regolamento

3.1.1 Roll Rate e Pitch Angle

Sappiamo che per incrementare l'effetto di Downforce di una qualsiasi ala basta avvicinarla al terreno per aumentare anche l'effetto suolo.

Infatti, una volta avvicinata al fondo, i vortici di estremità, che si formano per comunicazione nei profili all'estremità tra zona di alta pressione (intradosso) e zona a bassa pressione (estradosso), non riescono a chiudersi a causa della presenza del suolo.

Quindi verrebbe da pensare che il limite minimo dei 30 [mm] è utile tenerlo quanto più vicino possibile a questo valore estremo. Se così si facesse non si prenderebbe affatto in considerazione il rischio della macchina di poter toccare il suolo durante il suo percorso. Il limite dei 30 [mm], infatti, era il limite minimo che comportava dei vantaggi a livello aerodinamico ma se questo avesse determinato delle problematiche, questo numero sarebbe dovuto necessariamente aumentare.

A questo scopo la prima considerazione assoluta che si è fatta è stata quella di vedere di quanto si caricassero le sospensioni e quindi di quanto scendesse la macchina nei vari tratti dei circuiti delle gare con delle forti accelerazioni laterali e delle forti accelerazioni longitudinali.

Si è partiti così dividendo e studiando i due effetti attraverso la valutazione di:

- ROLL ANGLE ossia angolo di rollio;
- PITCH ANGLE ossia angolo di beccheggio.

Ci si è serviti del primo per valutare gli abbassamenti della vettura dovuti ad accelerazioni laterali. In particolari si è ricorsi all'ausilio di un parametro fondamentale, il ROLL RATE MASSIMO, ossia di quanti gradi al massimo può ruotare la vettura intorno all'asse di rollio per ogni G di accelerazione laterale.

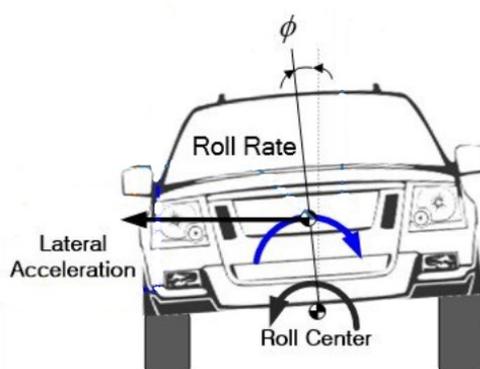


Figura 3.3 visualizzazione dell'angolo di rollio e dell'asse di rollio formati a causa dell'accelerazione laterale subita da un'automobile in curva

Dagli studi e dall'esperienza pregressa di chi ha progettato i modelli precedenti della monoposto, è emerso che la vettura di Formula SAE ha un ROLL RATE=1°/G e, per quelle che sono le potenze erogate e i percorsi dei circuiti, viene sottoposta al massimo ad 1.5 G di accelerazione. Questo presuppone che l'inclinazione massima intorno all'asse di rollio sarà in condizioni estreme pari a 1.5°.

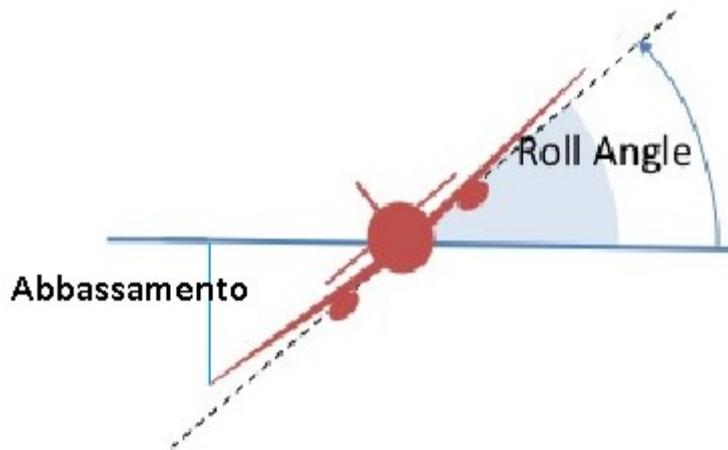


Figura 3.4 visualizzazione dell'angolo di rollio e conseguente abbassamento dell'ala

Come è evidente anche nella figura 3.4, quando una vettura o un aereo ha un angolo di rollio ha sì una parte che subisce un abbassamento, ma di contro ne ha un'altra che subisce un innalzamento.

Allo stesso modo, anche la nostra vettura vedrà metà dell'ala anteriore salire e l'altra metà scendere. Perciò su un'ala inizialmente stimata con un'apertura di 1400 [mm], l'abbassamento dovuto all'accelerazione sarà valutata:

$$\Delta y = \frac{1400}{2} \cdot \sin(1,5) = 18,32 [mm]$$

Per valutare invece gli abbassamenti dovuti alle accelerazioni longitudinali che causano un PITCH ANGLE o angolo di rollio, bisogna fare prima un distinguo tra due possibili configurazioni:

- SQUAT, ossia quando la macchina è in accelerazione e quindi si genererà un innalzamento della parte anteriore e un abbassamento della parte posteriore della vettura;
- DIVE, ossia quando la macchina è in frenata e quindi si genererà un innalzamento della parte posteriore e un abbassamento della parte anteriore della vettura.

Ci si è concentrati solo sulla configurazione in DIVE, sia per il fatto che delle due configurazioni è quella che determina un abbassamento maggiore della vettura, sia perché è quella di nostro interesse ai fini dello studio della distanza dal suolo dell'ala anteriore.

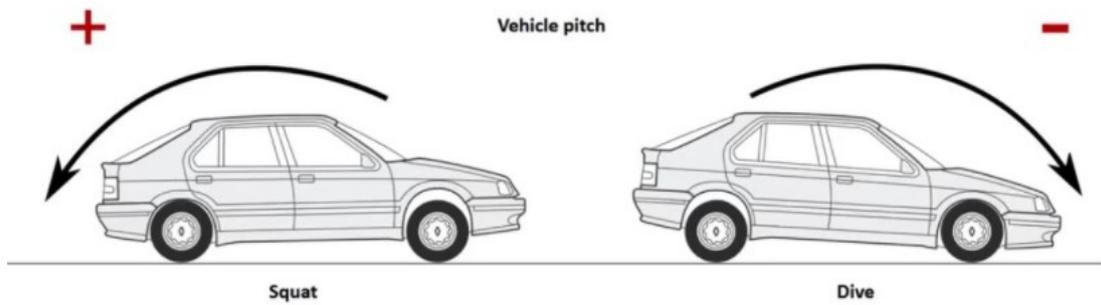


Figura 3.5 visualizzazione di una vettura in squat e in dive

Nella configurazione in DIVE l'abbassamento massimo dovuto all'accelerazione longitudinale comporta un abbassamento della monoposto di 15 [mm].

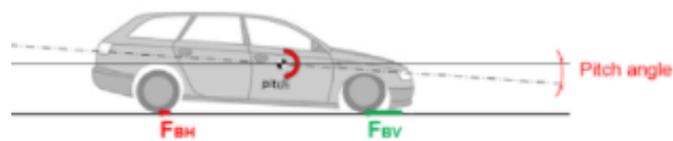


Figura 3.6 pitch angle di una vettura in dive a causa di una frenata

Se si vanno quindi a sommare i due contributi ricavati per l'accelerazione massima longitudinale e l'accelerazione massima laterale, si evince che il limite dei 30 [mm] non è sufficiente a non far toccare la monoposto a terra. Infatti la somma dei due contributi dà un risultato pari a 33,32 [mm] ma questo si verifica solo quando entrambi i contributi sono massimi allo stesso momento.

Ci si è così domandati se ci fosse il verificarsi di questa particolare situazione nei circuiti in cui la vettura avrebbe svolto le gare. Infatti, in una curva molto forte dove si ha il massimo dell'accelerazione laterale e dove quindi occorre una forte aderenza sembrava singolare ci si potesse trovare nello stesso punto contemporaneamente anche alla massima accelerazione longitudinale, in condizioni quindi di massima frenata.

Si è passato così ad analizzare le telemetrie dei circuiti sia per le accelerazioni laterali che per quelle longitudinali.

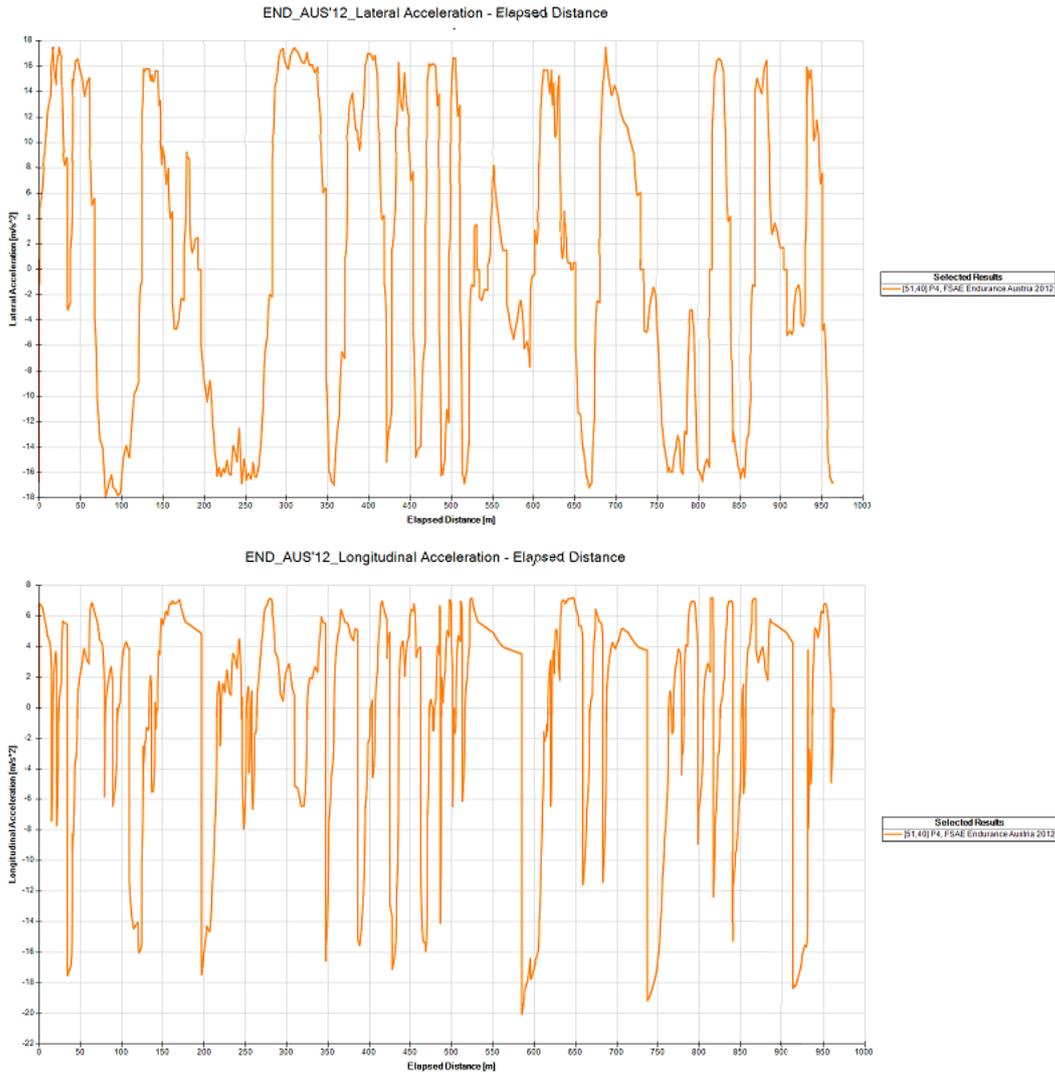


Figura 3.7 confronto telemetrie accelerazioni laterali e longitudinali nel circuito d'Austria

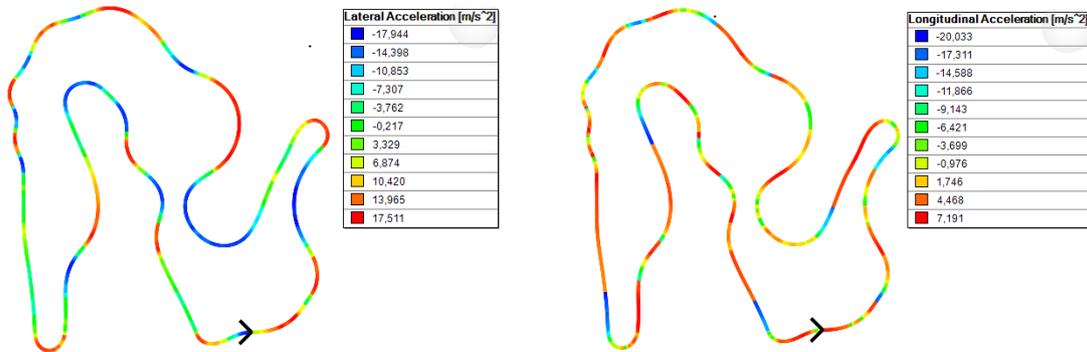


Figura 3.8 confronto andamento accelerazioni laterali e longitudinali visualizzate sul circuito d'Austria

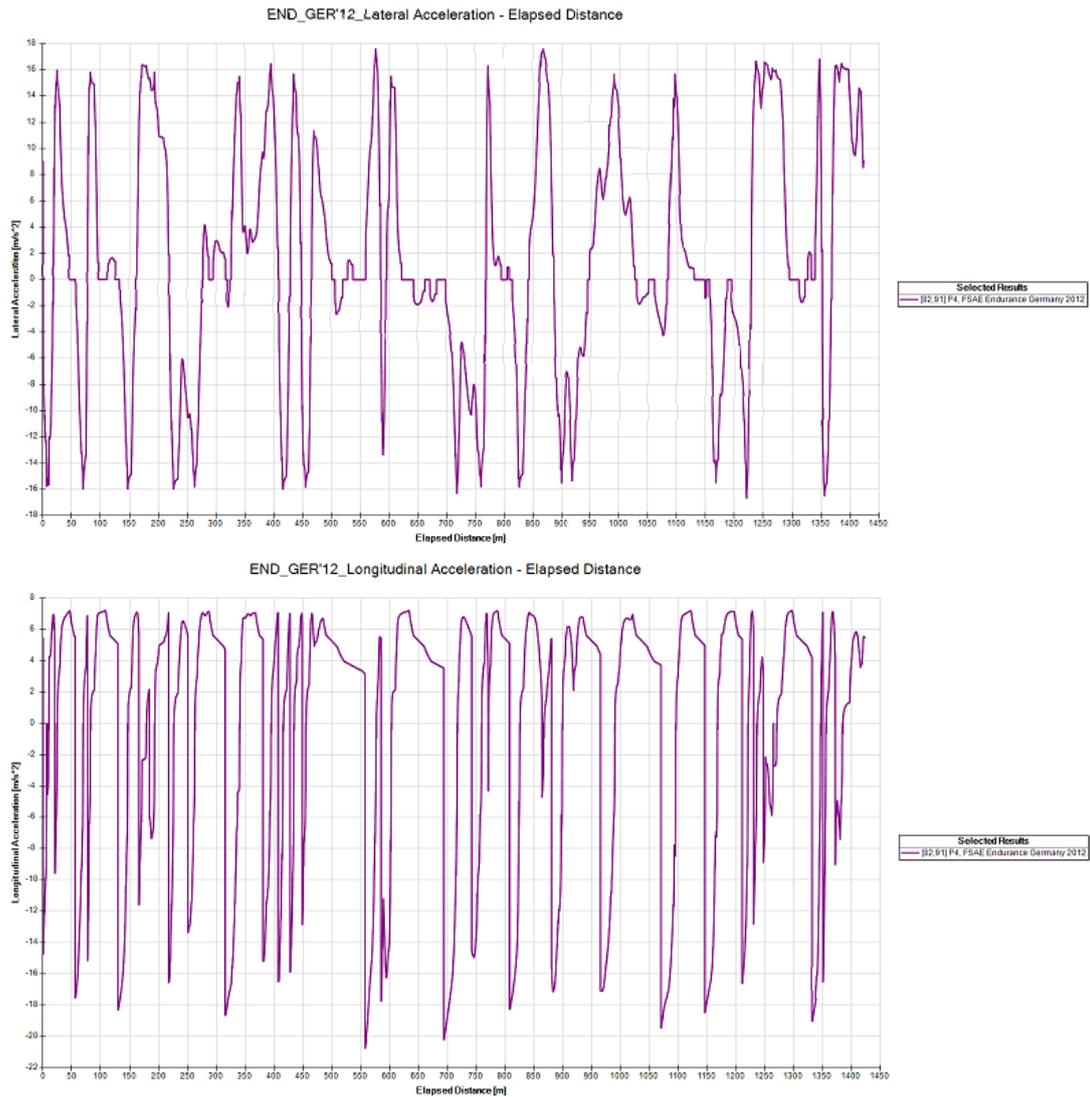


Figura 3.9 confronto telemetrie accelerazioni laterali e longitudinali nel circuito d'Austria

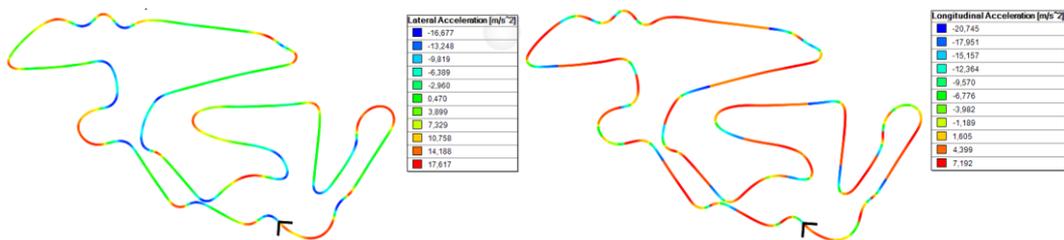


Figura 3.10 confronto andamento accelerazioni laterali e longitudinali visualizzate sul circuito di Germania

Come si può immediatamente intuire dagli esempi dei circuiti di Austria e Germania, dalle figure 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10 e dalle relative legende, si può osservare che le accelerazioni laterali massime non si verificano mai in corrispondenza delle accelerazioni longitudinali massime (e viceversa). Anzi, come già anticipato e come ci si aspettava, tendenzialmente quando dell'una si ha un elevato valore, quello dell'altra si propende a diminuirlo.

Per questa ragione, i due valori di abbassamento massimo non sono sovrapponibili ma anzi quasi inversamente proporzionali quindi il limite di 30 [mm] risulta sufficiente e si farà il progetto partendo da questo dato come condizione al contorno.

3.2 Velocità e numero di Reynolds

Continuando lo studio sui vari circuiti ma anche sulle varie prove dinamiche in generale, si è riscontrato che:

- la velocità media raggiunta dalla vettura è di $v_{\text{media}} = 58 \text{ [km/h]} = 16 \text{ [m/s]}$;
- la velocità massima si aggira su valori pari a $v_{\text{max}} = 108 \text{ [km/h]} = 30 \text{ [m/s]}$.

I numeri di Reynolds corrispondenti su cui verranno fatte le prove, ricordando il limite di regolamento secondo cui $L=700-75=625 \text{ mm}$, saranno rispettivamente:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{1,225 \cdot 16 \cdot 0,625}{1,81 \cdot 10^{-5}} = 676796$$

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{1,225 \cdot 30 \cdot 0,625}{1,81 \cdot 10^{-5}} = 1268992$$

3.3 Parametri per la modifica della configurazione ala anteriore

Una volta definite quelle che erano le condizioni al contorno dello studio per il perfezionamento dell'ala anteriore, si è passati a elencare quali fossero tutti i parametri che vanno a modificare una configurazione di un'ala anteriore e valutarli uno per uno. Infatti, sebbene non tutti siano stati modificati rispetto alla configurazione precedente, tutti sono stati oggetto di studio e di confronto, tanto da comportare un cambiamento laddove lo si vedesse come una scelta migliorativa, o una conferma progettuale ma che fosse stavolta una scelta più consapevole e non dettata semplicemente dalla semplice replica delle applicazioni precedenti.

I parametri che possono cambiare una configurazione e che quindi sono stati oggetto di studio sono:

- il tipo di profilo da utilizzare (sia per l'ala principale che per i flap);
- la lunghezza della corda (sia per l'ala principale che per i flap);
- il tipo di accoppiamento tra main e flap;
- la posizione relativa dei flap rispetto al main;
- l'altezza dell'ala da terra per la massimizzazione dell'effetto suolo;
- l'angolo di calettamento (sia per l'ala principale che per i flap).

3.3.1 Scelta del profilo per l'ala principale

Il primo parametro da cui si è partiti nello studio preliminare è forse anche quello più intuitivo: la scelta del tipo di profilo che fosse più adatto per la nostra esigenza.

Il profilo da cui si partiva, cioè quello montato sulla P4 Evoluzione, era il NASA/Langley/Withcomb LS1-0417 (GA-(W)1), detto comunemente GAW.

Sono stati presi in considerazione poi molti altri profili ma per fare un ottimo confronto bisogna guardare oltre alle prestazioni in sé, tutte le caratteristiche che ogni profilo comporta.

Infatti, il GAW è un profilo molto affidabile poiché risponde molto bene allo sporcamento.

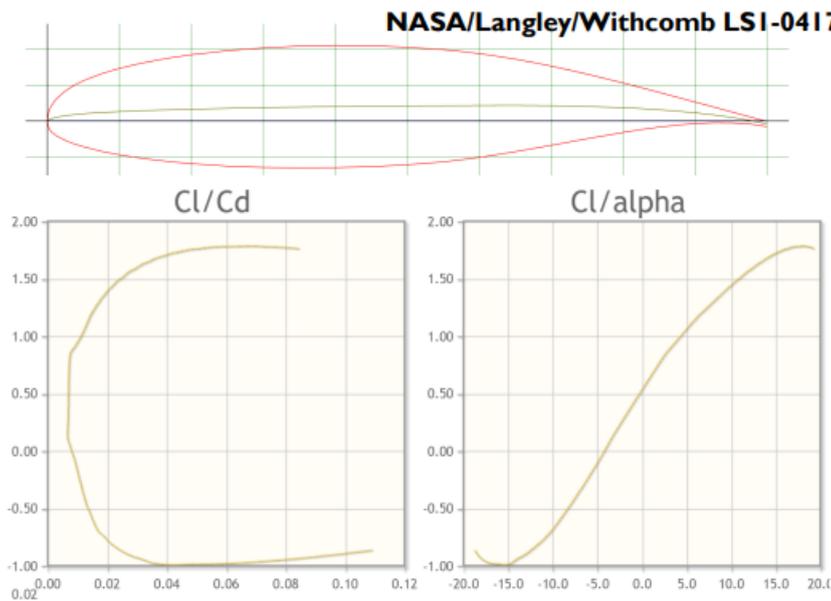


Figura 3.11 visualizzazione del GAW con grafico c_l/c_d e grafico c_l/α

Come possiamo vedere anche dalla figura 3.11, questo profilo non ha un naso appuntito, non ha sorprese, non presenta quindi cambi repentini al variare dell'angolo d'attacco. Anzi, osservando la POLARE DI EIFFEL (grafico c_l/c_d) si nota come questo profilo, anche se ha una D_{min} abbastanza importante, presenti un pozzetto laminare esteso, cioè la zona che in questo grafico è visualizzabile come un tratto verticale. Questo sta a significare che cambiando il c_l (e quindi anche α) per un lungo tratto il c_d rimane invariato, il che rappresenta un enorme vantaggio.

Nella ricerca iniziale sulla piattaforma "Airfoil Tools" e sul sito dell'ingegnere Enrico Benzing "F.1 - LA SINTESI TECNICA" sono stati successivamente oggetti di studio numerosi profili che potessero essere usati come ala principale e sono stati messi a confronto con il GAW.

È emerso in questa fase di studio che il criterio della ricerca si dovesse basare sul fatto che questi dovessero avere uno spessore avanzato (quindi prima del 40% della corda) e una freccia di camber arretrata (quindi posizionata tra il 50 e il 70% della corda).

I profili trovati erano raggruppabili principalmente in tre famiglie:

- 1) GAW e affini;
- 2) WORTMANN;
- 3) Benzing.

I profili che sono stati oggetti di studio che rispettavano i criteri richiesti erano i seguenti:

PROFILO	SPESSORE MAX	POSIZIONE SPESSORE MAX	FRECCIA MAX DI CAMBER	POSIZIONE DI FRECCIA MAX DI CAMBER
NASA/LANGLEY/WHITCOMB LS(1)-0417 (GA(W)-1)	17% C	40% C	2,4% C	65% C
NN7 MK20	16,9% C	37,1% C	3% C	59,8% C
NASA/LANGLEY MS(1)-0317 AIRFOIL	17% C	37,5% C	1,7% C	72,5% C
P-51D ROOT (BL 17.5) AIRFOIL	16,5% C	38,9% C	1,3% C	68,3% C
SG6040	16% C	35,3% C	2,3 % C	60,5% C
NREL's S822 Airfoil	16% C	39,2% C	1,8% C	59,5% C
SM701	16% C	36,3% C	3% C	60,3% C
DORNIER A-5 AIRFOIL	16,2% C	40,1% C	2,5% C	76% C
NREL's S820 Airfoil	16% C	45,1% C	2,1% C	59,7% C
GRUMMAN K-3 AIRFOIL	17,3% C	33,1% C	2,6% C	74,7% C
NREL's S813 Airfoil	16% C	40,4% C	2,3% C	54,4% C
WORTMANN FX 05-188 AIRFOIL	18,8% C	37,1% C	2,6% C	50% C
WORTMANN FX 0.5-191 AIRFOIL	19,1% C	37,1% C	2,6% C	50% C
WORTMANN FX 082-512 AIRFOIL	11,8% C	25% C	4,2% C	62,9% C
WORTMANN FX 2 AIRFOIL	20,4% C	43,5% C	3,8% C	69,1% C
WORTMANN FX 38-153 AIRFOIL	15,5% C	43,5% C	2,1% C	80,4% C
WORTMANN FX 60-100 AIRFOIL	10% C	27,9% C	3,6% C	56,5% C
WORTMANN FX 60-100 (126) AIRFOIL	10,1% C	30,8% C	3,6% C	59,7% C
WORTMANN FX 60-100 10% smoothed	10% C	27,9% C	3,5% C	56,5% C
WORTMANN FX 60-126 AIRFOIL	12,6% C	27,9% C	3,6% C	56,5% C
WORTMANN FX 60-126/1 AIRFOIL	12,6% C	27,9% C	4% C	56,5% C
WORTMANN FX 60-157 AIRFOIL	15,7% C	40,2% C	2,7% C	75% C
WORTMANN FX 60-160 AIRFOIL	15,6% C	40% C	3,1% C	60% C
WORTMANN FX 60-177 AIRFOIL	17,7% C	37,1% C	2,7% C	77,8% C
WORTMANN FX 61/184 AIRFOIL	18,4% C	37,1% C	3,1% C	62,9% C
WORTMANN FX 62-K-153/20 AIRFOIL	15,3% C	40,2% C	4,1% C	62,9% C
WORTMANN FX 63-137 AIRFOIL	13,7% C	30,9% C	6% C	53,3% C
WORTMANN FX 63-137 13,7% smoothed	13,7% C	30,9% C	5,8% C	56,5% C
Be 122-125	12% C	20% C	12% C	50% C
Be 122-155	12% C	20% C	15% C	50% C
Be 122-185	12% C	20% C	18% C	50% C
Be 152-125	15% C	20% C	12% C	50% C
Be 152-155	15% C	20% C	15% C	50% C
Be 152-175	15% C	20% C	17% C	50% C
Be 162-104	16% C	20% C	10% C	40% C
Be 162-124	16% C	20% C	12% C	40% C
Be 162-144	16% C	20% C	14% C	40% C
Be 153-055	15% C	30% C	5% C	50% C
Be 153-105	15% C	30% C	10% C	50% C
Be 153-175	15% C	30% C	17% C	50% C
Be 183-056	18% C	30% C	5% C	60% C
Be 183-106	18% C	30% C	10% C	60% C
Be 183-156	18% C	30% C	15% C	60% C

Tabella 3.1 Profili studiati e caratteristiche geometriche

Dalle prove effettuate con XFOIL, si sono individuati per ogni famiglia i profili migliori come compromesso delle varie prestazioni:

- GAW (visualizzato nei grafici in seguito in BLU);
- Be 122-125 (visualizzato nei grafici in seguito in GIALLO);
- WORTMANN FX 60-126 (visualizzato nei grafici in seguito in ROSSO).

Si sono messi a confronto i tre profili selezionati, sia a Re di velocità massima sia Re di velocità media, incentrandoci soprattutto sul c_l e sul c_d .

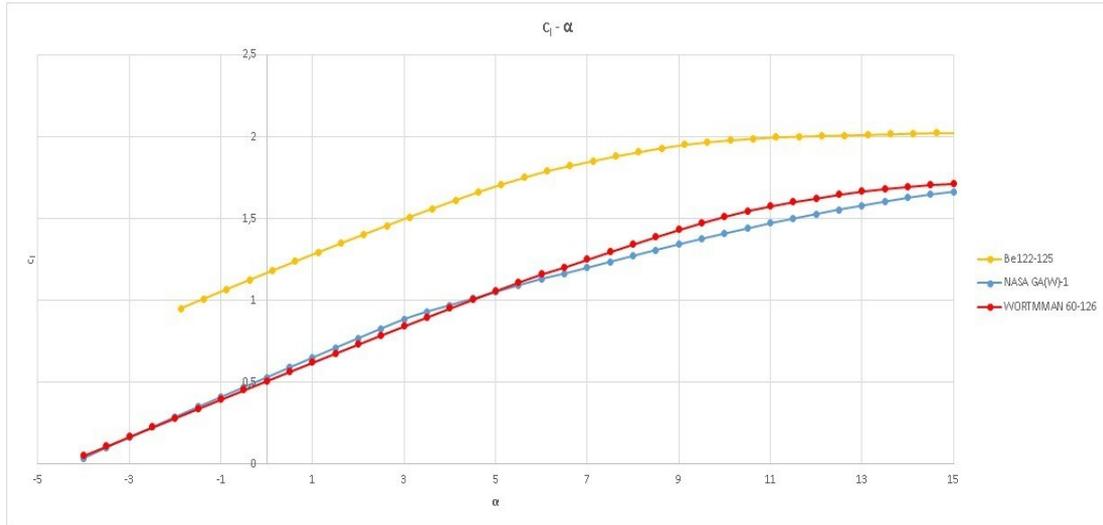


Figura 3.12 confronto dei tre profili migliori nel grafico c_l/α a $Re=7 \cdot 10^5$

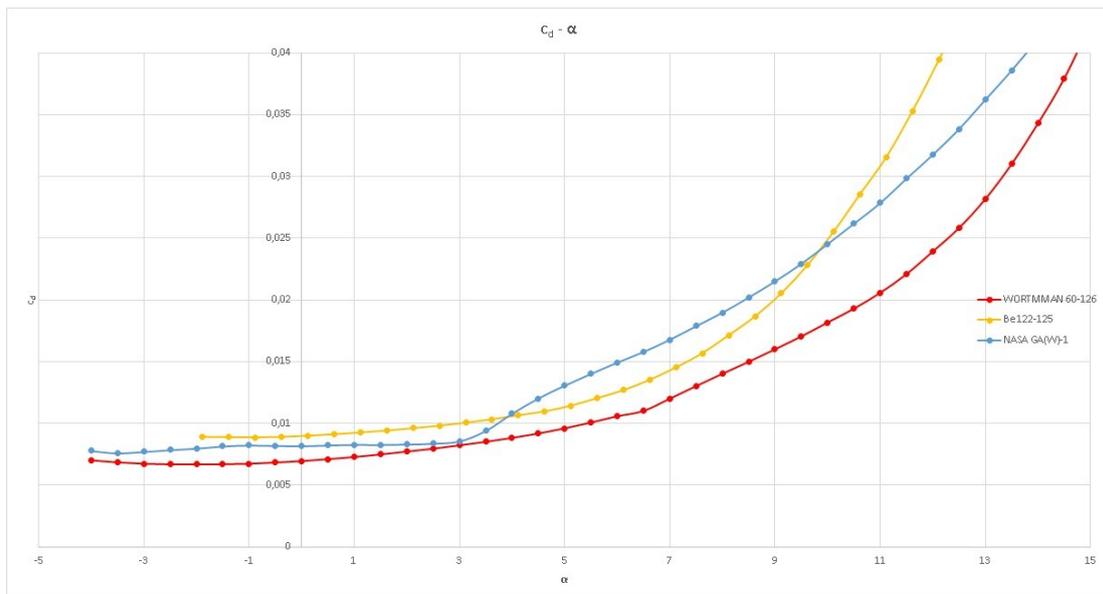


Figura 3.13 confronto dei tre profili migliori nel grafico c_d/α a $Re=7 \cdot 10^5$

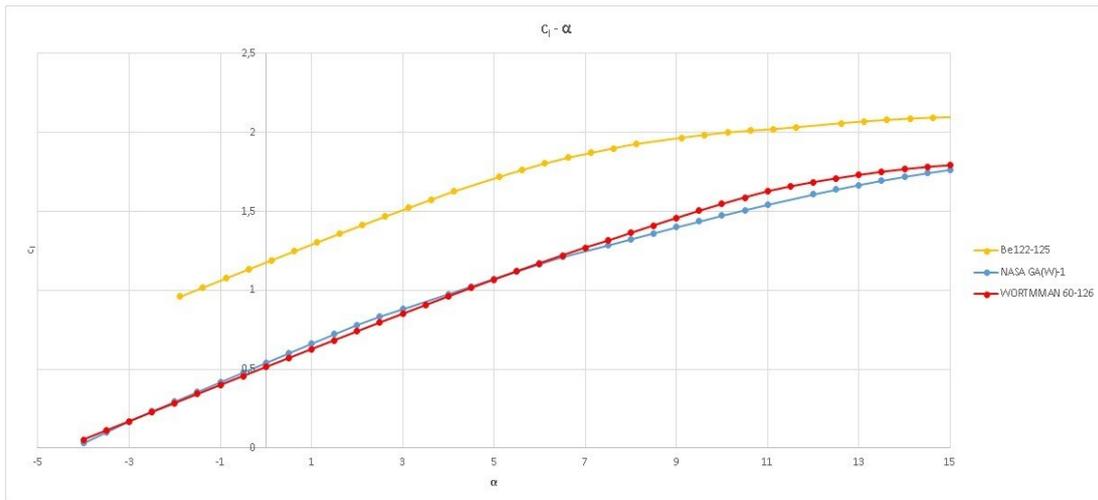


Figura 3.14 confronto dei tre profili migliori nel grafico c_l/α a $Re=1,3 \cdot 10^6$

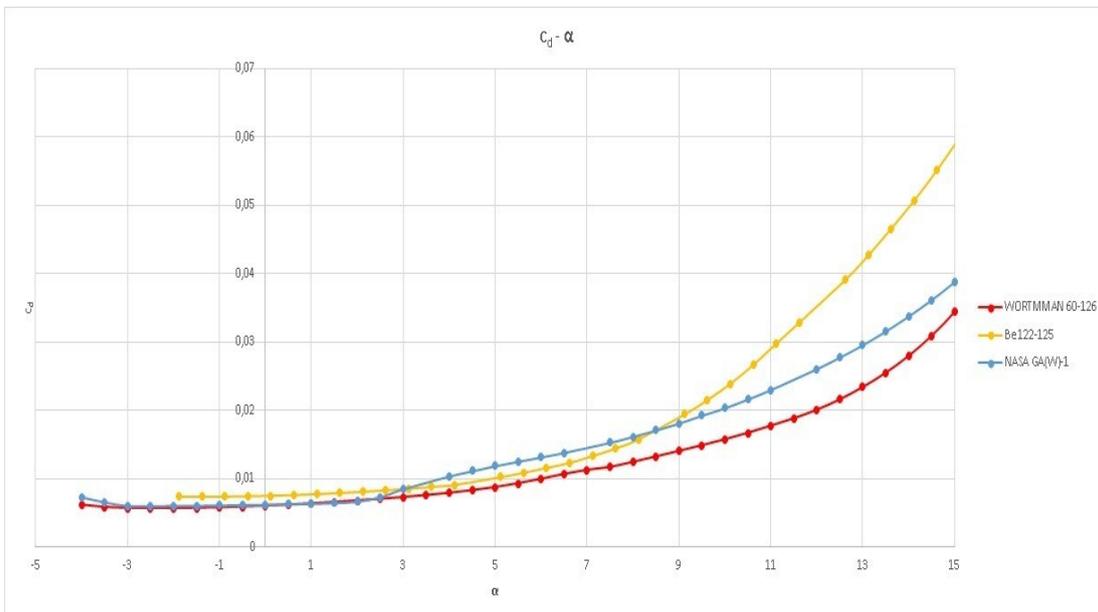


Figura 3.15 confronto dei tre profili migliori nel grafico c_d/α a $Re=1,3 \cdot 10^6$

Il confronto tra i tre profili è stato approfondito soprattutto sul range di angoli che vanno da 0° a 5° in quanto sono quelli intorno al quale si sposta maggiormente l'ala principale.

Da questo è emerso che il miglior profilo in termini di c_d minimo si è rivelato essere il WORTMANN FX 60-126, mentre il migliore in termini di c_l massima si è visto essere il Be 122-125.

Per affrontare la decisione del profilo da utilizzare quindi si sono prese in esame diverse considerazioni:

- il Benzing è stato sì molto efficace dal punto di vista della portanza, ma come tutti i profili della sua famiglia viene usato in genere per l'ala posteriore;
- il GAW non si è rivelato il migliore né in termini di resistenza né in termini di portanza, ma si è rivelato un ottimo compromesso tra le due;
- il GAW, come abbiamo anticipato all'inizio di questo sottocapitolo, ha il vantaggio di essere un profilo molto stabile e mantenere le sue prestazioni anche al variare delle condizioni esterne.

Alla luce di tutte queste considerazioni si è deciso perciò di confermare la scelta del GAW sul profilo principale, con la consapevolezza che per quelle che erano le esigenze circostanti si trattasse del profilo più adatto.

3.3.2 Scelta del profilo per il flap

Il nostro percorso, anche per la scelta del flap più adatto al nostro utilizzo, è iniziato valutando il flap usato dalla precedente vettura, ossia l'Eppler E387.

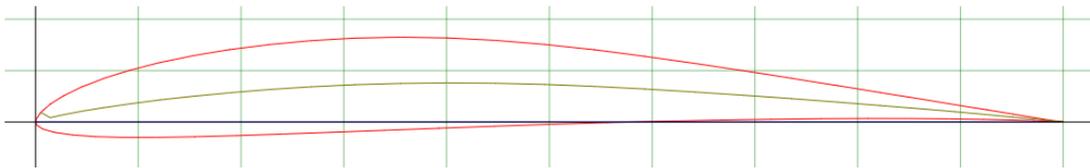


Figura 3.16 profilo Eppler E387

Dalle ricerche fatte in letteratura però non si è riscontrato nessun utilizzo di questo profilo come flap, mentre risultava ricorrente nei libri dell'ingegner Benzing quello del Clark-Y e del Roma 2522. Il primo in particolare si è riscontrato essere di largo utilizzo come flap, anche con il GAW, tant'è che era anche il flap utilizzato per l'ala posteriore nella P4 Evoluzione, la quale aveva avuto uno studio più approfondito rispetto a quella anteriore.

Per tutta questa serie di ragioni, si è decisi quindi di passare all'utilizzo di un profilo Clark-Y come flap, il quale ha anche il vantaggio di essere un profilo piano-convesso e quindi di facile realizzazione costruttiva.

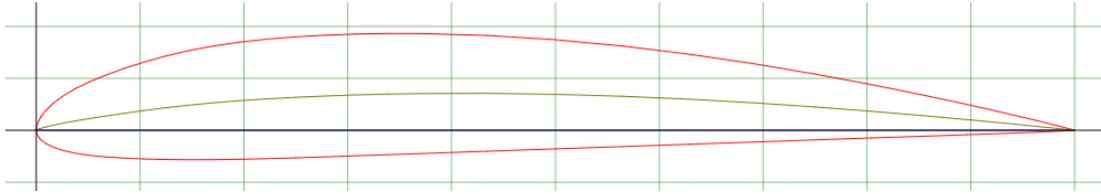


Figura 3.17 profilo Clark-Y

3.3.3 Lunghezza corde ala principale e flap

Per quanto riguarda questo parametro, si è presentata una restrizione regolamentare a limitare la progettazione. Ricordiamo infatti che l'ingombro di tutto il blocco ala anteriore doveva essere di 625 mm.

Dalle ricerche effettuate in letteratura si è visto che la lunghezza della corda dei flap, in particolare per gli utilizzi nelle vetture da competizione, deve essere al di sotto del 30% della lunghezza della corda del main, preferibile se in un intervallo tra il 10% e il 20% di corda.

Per far sì che tutte queste condizioni venissero considerate e inoltre porre anche un'attenzione alla copertura delle ruote grazie ad un flap più alto che potesse ridurre la resistenza, si è optato per una lunghezza della corda del main di 392 mm e quella del flap uguale 95,10 mm, pari cioè al 24% della corda del profilo principale.

3.3.4 Tipo di accoppiamento Main-Flap

Per la prima volta, il regolamento prevedeva la possibilità di utilizzare appendici aerodinamiche quali ali mobili come il DRS (Drag Reduction System, in italiano "Sistema di riduzione della resistenza aerodinamica") ma questa idea è stata scartata come opzione in quanto queste si trovano per lo più nella parte posteriore delle vetture da corsa, mentre il nostro studio era incentrato sulle superfici aerodinamiche della parte anteriore.

3.3.5 Posizione dei flap rispetto al profilo principale

Si è condotto quindi uno studio per determinare quale fosse la posizione relativa ottimale tra i vari profili, vale a dire nell'accoppiamento main-primo flap e primo flap-secondo flap.

Si è trovato quindi in letteratura un range ottimale delle distanze, dette FESSURE, che massimizza le prestazioni di tutta la configurazione.

Per spiegare come le fessure possano determinare un migliore contributo, è necessario dare un sistema di riferimento:

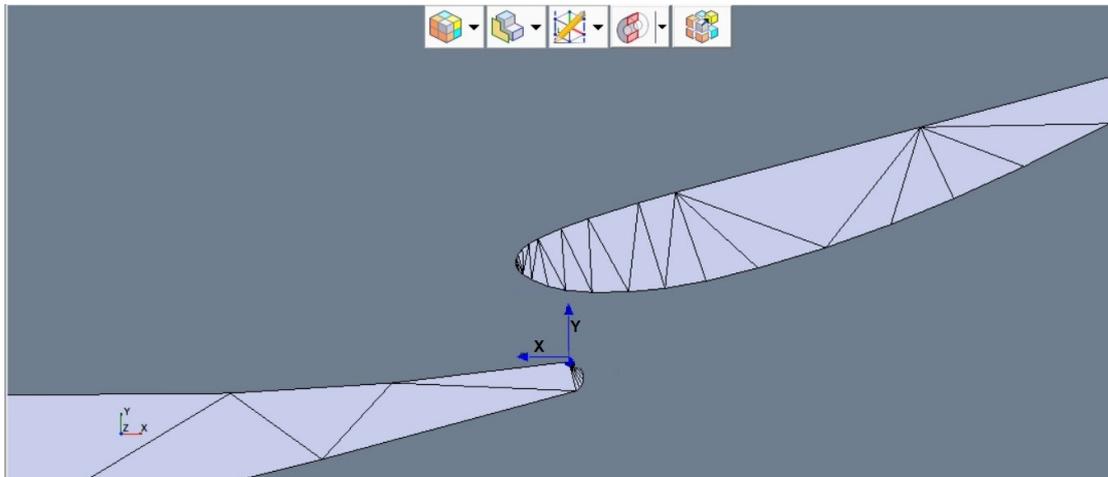


Figura 3.18 sistema di riferimento tra flap e main e posizionamento dei due profili

Come vediamo dalla figura 3.18

- in coordinata y , la fessura è positiva quando il punto più basso del flap si trova al di sopra del punto più alto del main;
- in coordinata x la fessura è positiva quando il punto più avanzato del flap si trova più avanti del punto più arretrato del main.

Per avere valori ottimali di prestazioni, entrambe le fessure devono essere positive e devono avere grandezze che vanno dall'1,5% al 4% della lunghezza della corda del main.

Discorso identico è da fare per l'accoppiamento primo flap con secondo flap.

Nel nostro caso abbiamo quindi optato per una fessura lungo y pari al 2,3% della corda del main, cioè lunga 9 mm, mentre lungo x la fessura è stata progettata per una lunghezza pari a 6 mm ovvero l'1,5% della corda, rientrando in entrambi i casi nel range ottimale al fine di massimizzare le prestazioni.

3.3.6 Altezza del profilo da terra

Al netto della sopracitata limitazione di 30 mm da terra imposta dal regolamento, ci si è interrogati se ci fosse un'altezza da terra che potesse migliorare l'effetto suolo.

Si è condotta quindi una ricerca che ha portato ad un documento in letteratura dove erano stati studiati gli effetti della portanza di un GAW con flap al variare dell'asse di corda e della distanza dal suolo.

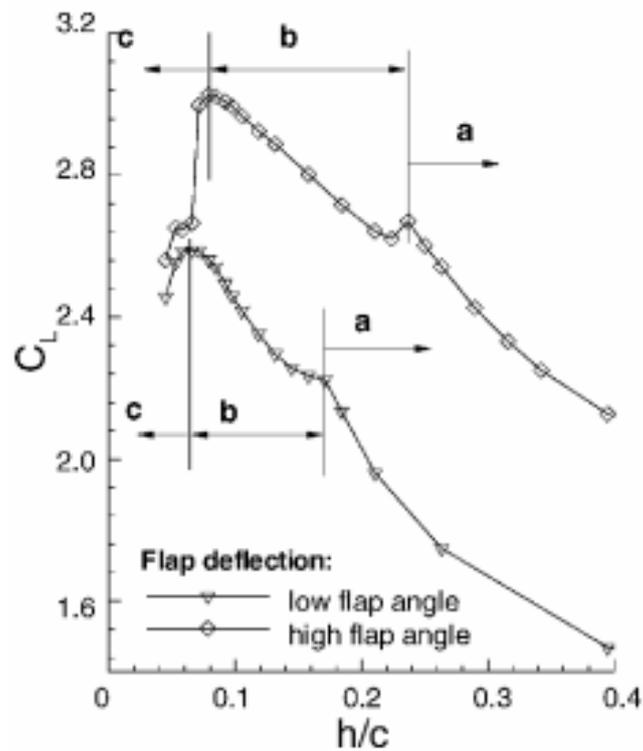


Figura 3.19 andamento del c_L al variare del rapporto h/c

Come si può verificare dalla figura 3.19, si è visto che in questa ricerca era stato scoperto che la massimizzazione del c_L per questo particolare accoppiamento avveniva per un rapporto h/c che va da 0.09 a 0.1, dove h è la altezza del profilo da terra e c è la lunghezza della corda del GAW, il nostro main.

Mantenendo però la distanza del profilo da terra a 30 mm, sarebbe venuto un rapporto h/c troppo basso; perciò si è deciso di aumentare la h di progetto fino a un valore di 38 mm in modo che il rapporto h/c fosse pari a 0.097, perfettamente all'interno del range ottimale.

3.3.7 Angolo di calettamento

Infine, l'ultimo parametro analizzato è stato il modificarsi delle prestazioni al variare dell'angolo di calettamento.

Per questo confronto sono state riprodotte tutte le condizioni fissate nei sottocapitoli precedenti e sono stati messi a confronto i vari angoli d'attacco sia del main che dei flap presi in esame.

Per questo tipo di confronto sono state fatte delle simulazioni 2D con il programma Star CCM+ con il collega e amico Alessandro Cicchini.

Anche in questo caso si è partiti dalla vettura precedente, perciò, si è fatta una prima serie di simulazioni con solo un flap, in quanto la vecchia vettura presentava un solo flap davanti la ruota. Gli angoli del main e del flap erano rispettivamente di 2,6° e di 17,6°.

Si è partiti quindi mettendo a confronto i nuovi profili con le nuove grandezze studiate a diversi angoli di main accoppiati con alcuni angoli di flap. I risultati ottenuti sono stati messi a confronto con quella che era la configurazione precedente.

Configurazione P4 Evoluzione (main 2,6°, flap Eppler)			
α_{Flap}	C_l	C_d	$E=C_l/C_d$
17,60°	2,37	0,14	16,93

Tabella 3.2 valori P4 Evoluzione

Main 2,6°			
α_{Flap} [°]	C_l	C_d	$E=C_l/C_d$
17,60	2,64	0,062	42,58
22,60	2,9	0,087	33,33
30,00	2,8	0,127	22,05
35,00	2,74	0,15	18,27
Main 3,0°			
α_{Flap} [°]	C_l	C_d	$E=C_l/C_d$
17,60	2,65	0,064	41,41
22,60	2,86	0,091	31,43
30,00	2,76	0,126	21,90
35,00	2,72	0,155	17,55
Main 3,6°			
α_{Flap} [°]	C_l	C_d	$E=C_l/C_d$
17,60	2,6	0,075	34,67
22,60	2,57	0,096	26,77
30,00	2,72	0,14	19,43
35,00	2,62	0,161	16,27
Main 4,0°			
α_{Flap} [°]	C_l	C_d	$E=C_l/C_d$
17,60	2,5	0,081	30,86
22,60	2,51	0,1	25,10
30,00	2,72	0,14	19,43
35,00	2,57	0,173	14,86

Tabella 3.3 andamento dei valori di C_l , C_d e C_l/C_d a varie configurazioni di angoli con un flap

Da questo primo confronto emergono due cose:

- la configurazione migliore in termini di efficienza è main a 2,6° e flap a 17,6°, come la configurazione della vettura P4 Evoluzione;
- questa nuova configurazione mostra un'efficienza oltre 2,5 volte superiore a quella della vecchia monoposto, a conferma degli ottimi risultati ottenuti.

Si è passati successivamente all'aggiunta della terza ala sulla nuova e si sono studiate varie configurazioni per valutare i risultati.

Main 2,6°				
$\alpha_{\text{Flap}} [^\circ]$	$\alpha_{\text{Flap2}} [^\circ]$	C_l	C_d	$E=C_l/C_d$
17,60	32,60	4,078	0,161	25,33
22,60	37,60	3,47	0,229	15,15
30,00	45,00	2,794	0,251	11,13
35,00	50,00	2,61	0,295	8,85
Main 3,0°				
$\alpha_{\text{Flap}} [^\circ]$	$\alpha_{\text{Flap2}} [^\circ]$	C_l	C_d	$E=C_l/C_d$
17,60	32,60	3,98	0,165	24,12
22,60	37,60	3,556	0,215	16,54
30,00	45,00	2,831	0,253	11,19
35,00	50,00	2,647	0,297	8,91
Main 3,6°				
$\alpha_{\text{Flap}} [^\circ]$	$\alpha_{\text{Flap2}} [^\circ]$	C_l	C_d	$E=C_l/C_d$
17,60	32,60	3,61	0,175	20,63
22,60	37,60	3,66	0,214	17,10
30,00	45,00	2,8	0,262	10,69
35,00	50,00	2,82	0,297	9,49
Main 4,0°				
$\alpha_{\text{Flap}} [^\circ]$	$\alpha_{\text{Flap2}} [^\circ]$	C_l	C_d	$E=C_l/C_d$
17,60	32,60	3,432	0,182	18,86
22,60	37,60	3,652	0,216	16,91
30,00	45,00	2,88	0,261	11,03
35,00	50,00	2,635	0,317	8,31

Tabella 3.4 andamento dei valori di C_l , C_d e C_l/C_d a varie configurazioni di angoli con due flap

Dall'ultimo studio e confronto è emerso che l'aggiunto della terza ala, come ci si poteva immaginare, ha fatto aumentare notevolmente i C_l ma ha fatto innalzare anche necessariamente i C_d , decretando una diminuzione delle efficienze.

La configurazione migliore si è rivelata essere quella con main a 2,6°, primo flap a 17,6° e secondo flap a 32,6°, sia in termini di C_l che in termini di efficienza.

Il dubbio, quindi, era quello di dover decidere se orientarsi verso una configurazione a tre profili o rimanere con una configurazione a due profili come la P4 Evoluzione.

Al netto dei risultati ottenuti si è optato per una configurazione a tre profili (un'ala principale e due flap) poiché si è reputato che, utilizzando questo tipo di soluzione, sarebbero aumentati sia il c_l che l'efficienza rispetto alla vettura precedente.

Perciò, ricapitolando, si è utilizzato una configurazione con:

- profilo GAW sull'ala principale inclinato $2,6^\circ$ rispetto all'orizzontale;
- profilo Clark-Y sul primo flap inclinato $17,6^\circ$ rispetto all'orizzontale;
- profilo Clark-Y sul secondo flap inclinato $32,6^\circ$ rispetto all'orizzontale.

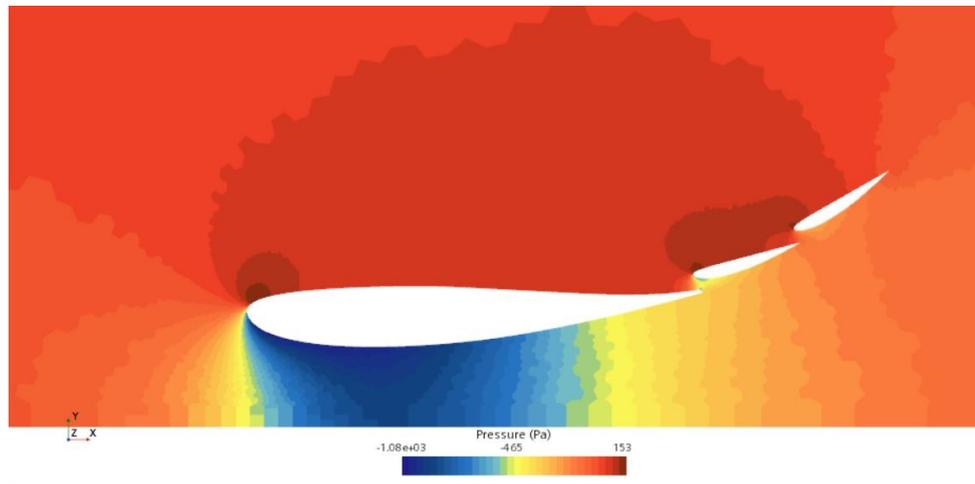


Figura 3.20 visualizzazione della configurazione finale con relativa raffigurazione delle pressioni

Capitolo 4

Progettazione ala anteriore

Una volta completato lo studio e le verifiche sui modelli 2D e definita la configurazione migliore, si è quindi passati ad uno studio della stessa in versione 3D attraverso il CFD. Le simulazioni sono avvenute in collaborazione con il collega e amico Alessandro Cicchini.

Prima ancora di effettuare le prove, si attendevano risultati peggiori rispetto alla semplice moltiplicazione dell'effetto 2D per l'apertura alare. Questo è ragionevole poiché bisogna tener conto degli effetti dell'ala finita.

Come accennato nei capitoli precedenti, nei due profili che si trovano all'estremità dell'ala, infatti, vengono in comunicazione la parte inferiore (estradosso) in depressione con la parte superiore (intradosso) in pressione. Ciò comporterà una tendenza delle particelle a spostarsi dalla parte a pressione maggiore a quella a pressione minore, facendo sì che si formino cioè dei vortici detti appunto VORTICI D'ESTREMITÀ o TRECCE DI BERENICE.

Questa è la ragione per cui quasi sempre si utilizzano alle estremità delle ali degli elementi chiamati ENDPLATES, che sono delle paratie che cercano di schermare questo flusso, limitando così questa perdita di Downforce.

Questo distacco del flusso dovrà per forza causare una diminuzione della Downforce ed è il motivo per cui lo stesso profilo ha un c_l di riferimento dello stesso maggiore rispetto al c_l dell'ala.

4.1 Primo modello 3D

Si è passati così a estendere semplicemente la stessa configurazione studiata nel 2D lungo tutta la larghezza dell'ala

Sottolineiamo, come possiamo anche notare dalla figura 3.2, che non vi erano limitazioni di larghezza dell'ala anteriore e che quindi, da progetto, si poteva adottare una qualsiasi apertura alare.

Una maggiore apertura alare avrebbe potuto contribuire alla generazione di Downforce in modo sostanzioso. In questo modo, però, a causa delle strette carreggiate tipiche dei circuiti dove si svolgono le competizioni, questa soluzione sarebbe risultata decisamente scomoda e meno guidabile. Si è optato perciò per una soluzione più snella, che fosse un giusto compromesso tra i due fattori e ci si è

orientati quindi verso un'ala che rimanesse quasi al limite all'interno del bordo esterno delle ruote con un'apertura totale di 1325 [mm].

Si è proceduti quindi alla simulazione con Star CCM+ per valutare lo studio delle pressioni e delle forze e i risultati sono stati coerenti con quanto ci si aspettava.

Simcenter STAR-CCM+

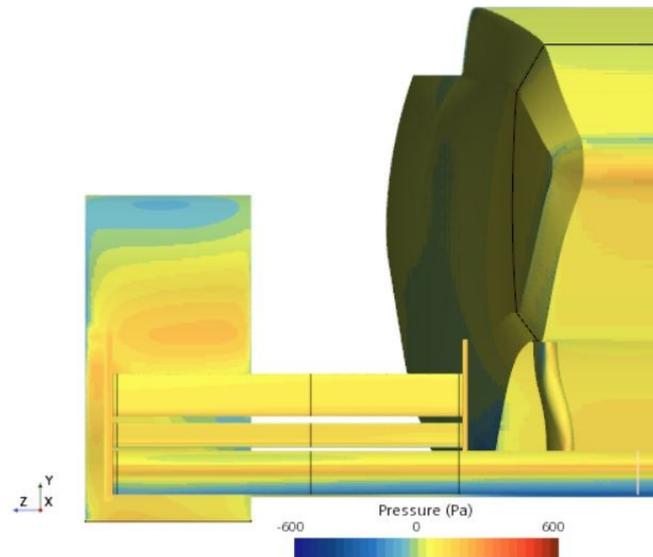


Figura 4.1 visualizzazione frontale delle pressioni della prima versione del modello 3D dell'ala

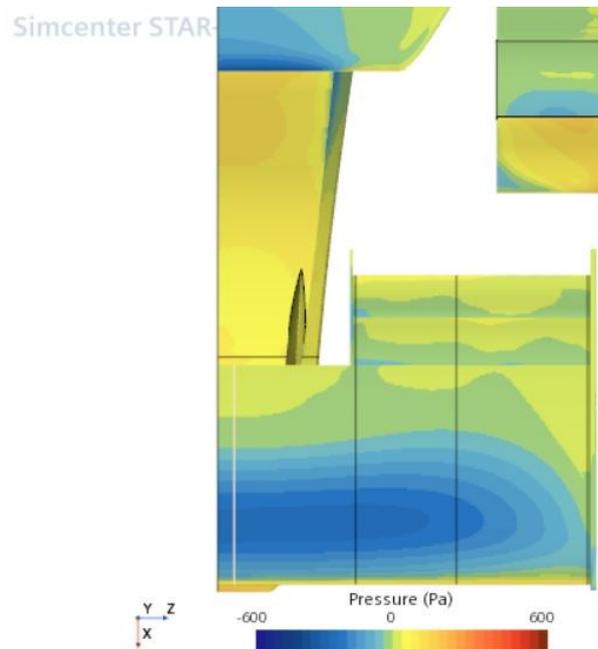


Figura 4.2 visualizzazione da sotto delle pressioni della prima versione del modello 3D dell'ala

La simulazione ha dato come risultato una $L=98$ [N] e una $D=12$ [N], quindi con $E=8,2$.

Inoltre, come possiamo osservare dalle figure 4.1 e 4.2, si vede una buona depressione nella parte sottostante dell'ala e una pressione in quella superiore ma l'abbassamento del coefficiente di portanza è stato considerevole. Infatti, dal c_l della versione 2D pari a 4,0 si è passati a un $c_l=0,8$ della versione 3D.

Si è pensato subito che questo drastico abbassamento delle prestazioni fosse attribuibile agli effetti di estremità e per questo si è andato a fare uno studio delle pressioni nelle varie sezioni dell'ala. Si è messo perciò a confronto il c_p di quattro diverse sezioni:

- 1) la sezione centrale dove si trova l'asse di simmetria della macchina;
- 2) la sezione immediatamente sotto a dove inizia il flap (infatti si è deciso di fare in modo che il flap non corresse lungo tutta la larghezza dell'apertura dell'ala al fine di permettere a quanta più aria possibile di convogliare sotto il fondo);
- 3) la sezione che si trova a metà della parte flappata;
- 4) la sezione che si trova all'estremità.

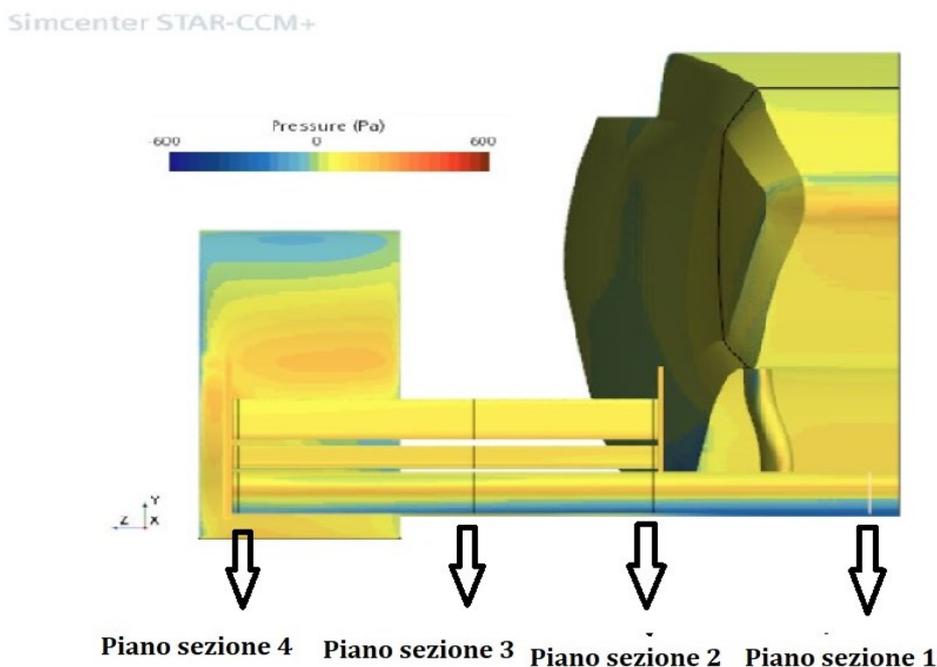


Figura 4.3 visualizzazione della collocazione dei piani presi in studio per il confronto dei c_p

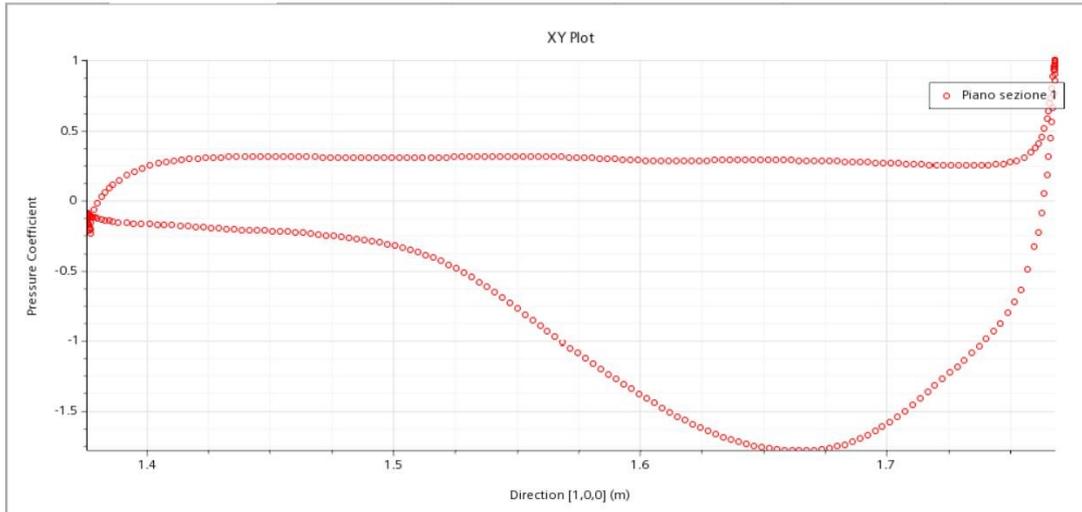


Figura 4.4 grafico del c_p della sezione 1 del modello 1

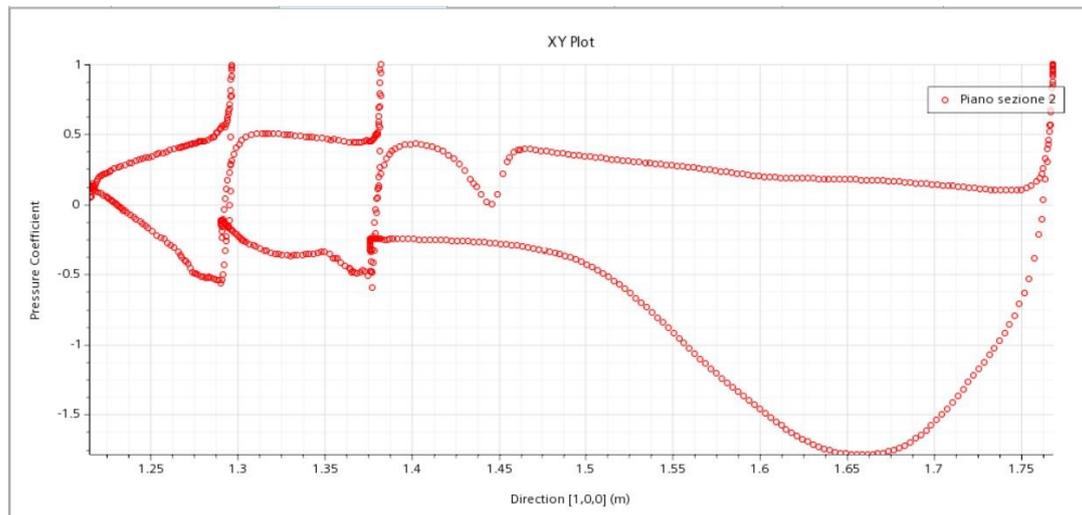


Figura 4.5 grafico del c_p della sezione 2 del modello 1

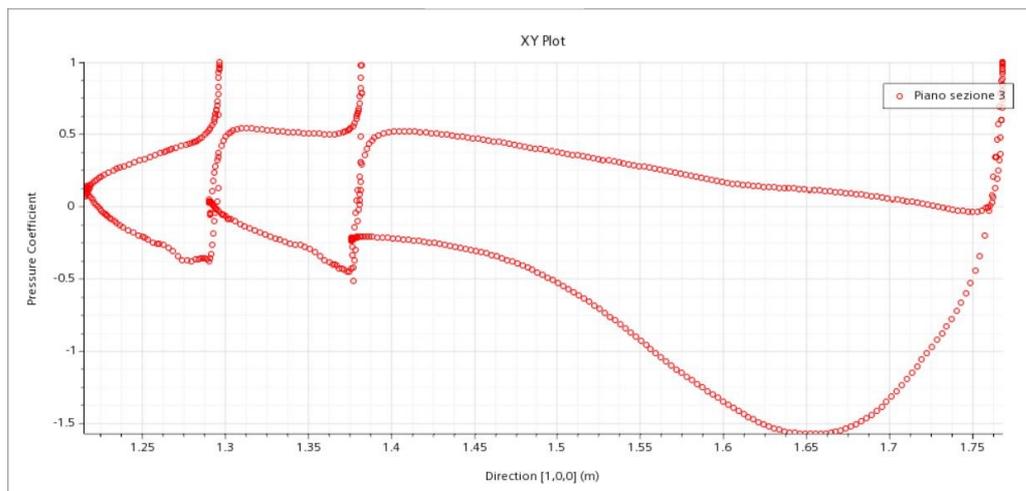


Figura 4.6 grafico del c_p della sezione 3 del modello 1

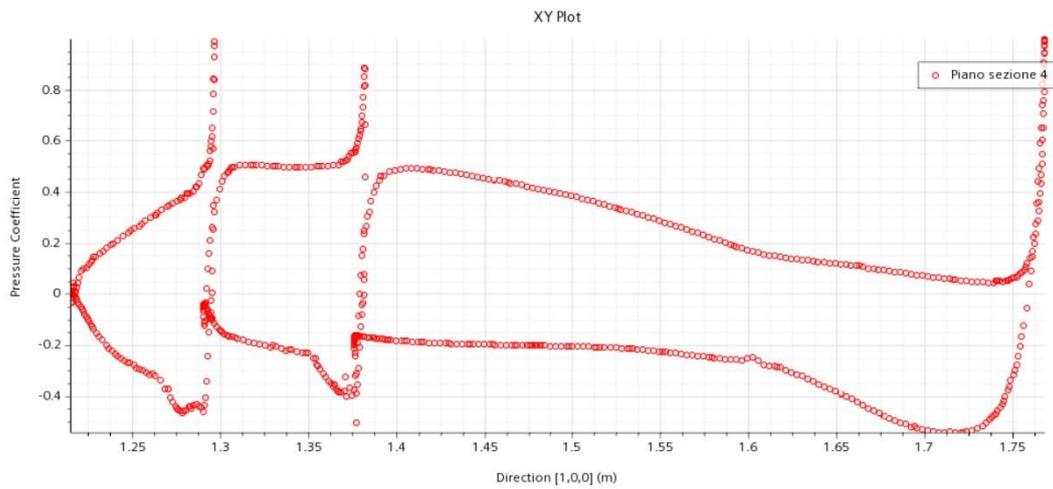


Figura 4.7 grafico del c_p della sezione 4 del modello 1

Una volta elaborati i grafici del c_p delle varie sezioni, si sono confrontati tra loro ed è emerso che la sezione numero 4 ha un'enorme perdita delle prestazioni rispetto alle sezioni più interne flappate. Si è anche notato che queste, da un confronto tra i grafici dei c_p ottenuti dalla simulazione 3D con quelli della simulazione 2D, presentavano un sostanzioso calo ingiustificato rispetto alla simulazione della sezione 2D. Questo ci ha fornito un indizio fondamentale sul fatto che non ci fosse solo un problema di vortici di estremità.

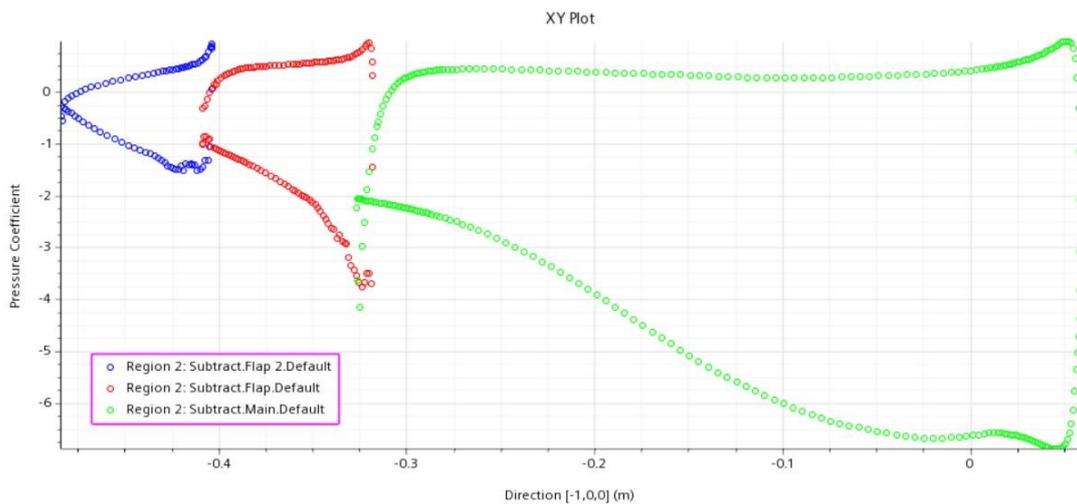


Figura 4.8 grafico del c_p della simulazione in 2D

Dalla figura 4.8 risalta immediatamente come il picco di aspirazione della simulazione 2D, con l'ausilio dell'effetto suolo, arrivasse quasi a toccare un valore di -7. Considerando che il valore delle sezioni flappate si aggirava al massimo su valori intorno a -1,7, questo delta era eccessivo da poter essere attribuito al solo contributo del vortice d'estremità.

Si è voluto quindi verificare se il profilo non flappato della sezione 1 subisse lo stesso calo di prestazioni rispetto alla simulazione precedentemente fatta dell'ala principale in 2D.

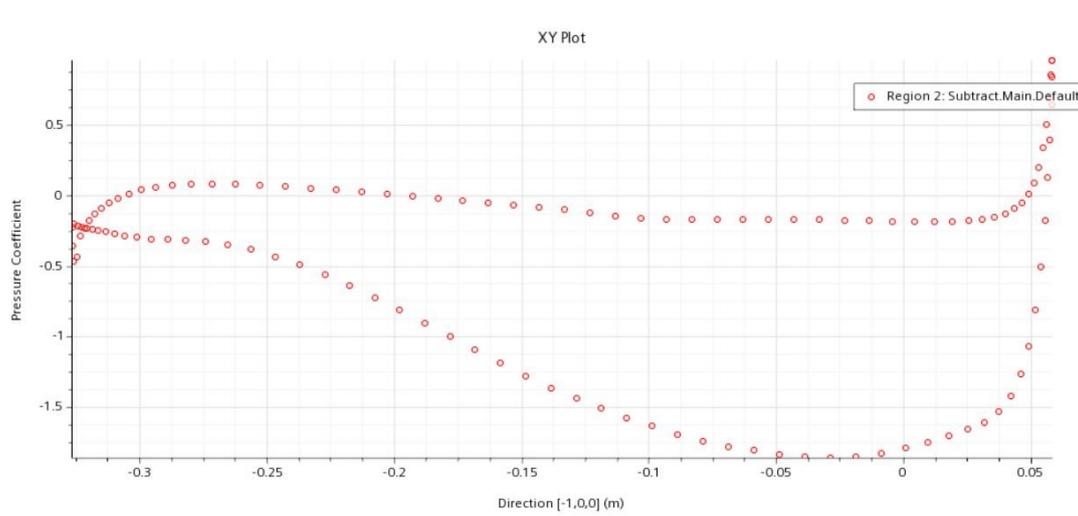


Figura 4.9 visualizzazione del c_p del main a 2.6° di angolo di attacco

Dal confronto del grafico del c_p del main riportato in figura 4.9 con la sezione non flappata della simulazione 3D, si vede che i due picchi di aspirazione sono paragonabili. Infatti entrambi si aggiravano su valori intorno a -1,9.

Si è capito quindi che nella simulazione 2D avvenivano dei fenomeni che non erano replicati in quella 3D, in particolare nella prima il flusso impattava il profilo come se questo fosse ad un angolo di attacco maggiore.

Questo è stato un incentivo a trovare nuove soluzioni soprattutto per le parti più esterne in modo da replicare l'effetto favorevole della simulazione 2D. perciò si è pensato di aumentare l'angolo di attacco non uniforme per tutta l'ala ma introducendo uno svergolamento (inizialmente del solo main) che partiva dalla sezione 2 fino a raggiungere 7,6° di angolo di attacco nella sezione più esterna (svergolamento di 5°).

4.2 Secondo modello 3D (Main svergolato, flap non svergolati)

Come già anticipato nel sottocapitolo precedente, la modifica fatta nel secondo modello è stata l'introduzione di un angolo di svergolamento di 5° ad una porzione dell'ala principale lasciando momentaneamente i flap rettilinei.

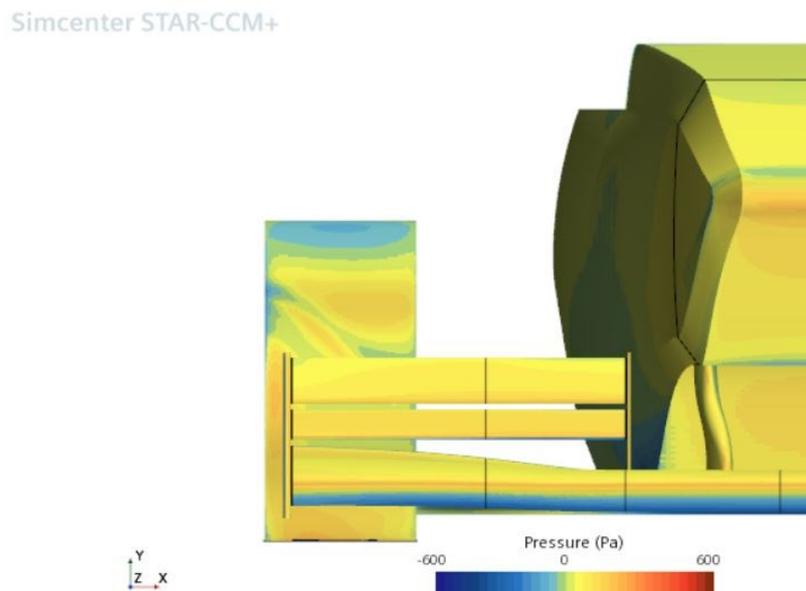


Figura 4.10 visualizzazione frontale delle pressioni della seconda versione del modello 3D dell'ala

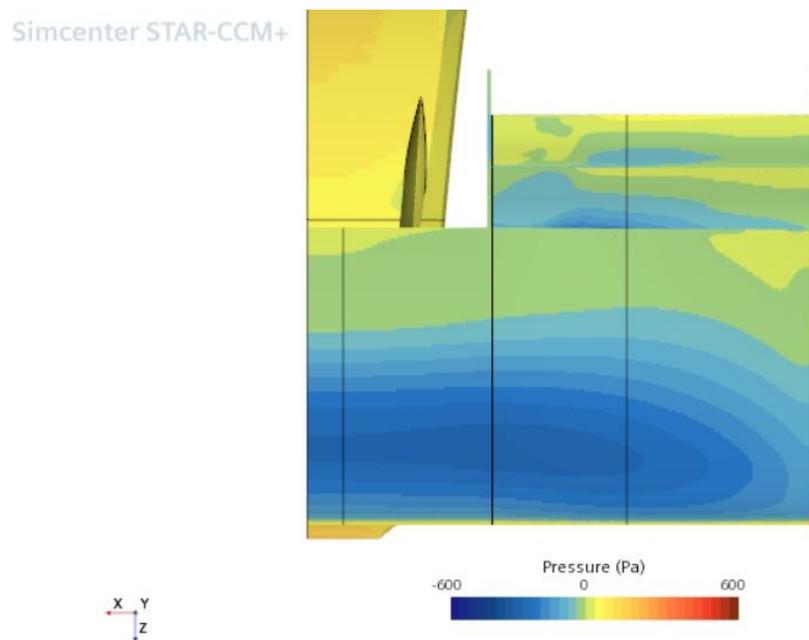


Figura 4.11 visualizzazione da sotto delle pressioni della prima versione del modello 3D dell'ala

Già dalle prime impressioni si è potuto constatare un aumento della depressione nella parte sottostante dell'ala principale, come si può verificare in figura 4.11.

Si è proceduto quindi alla verifica dei c_p per vedere se fosse effettivamente aumentato il picco di aspirazione per le quattro sezioni prese in analisi.

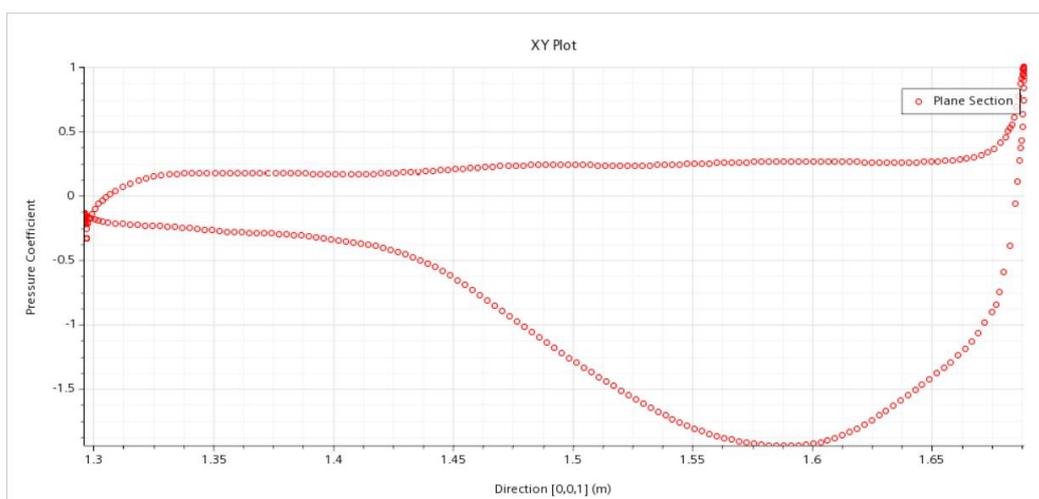


Figura 4.12 grafico del c_p della sezione 1 del modello 2

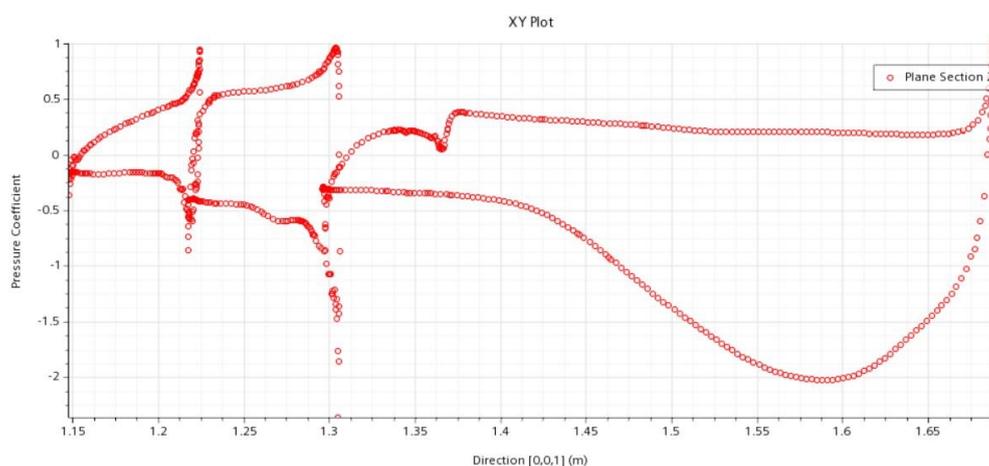


Figura 4.13 grafico del c_p della sezione 2 del modello 2

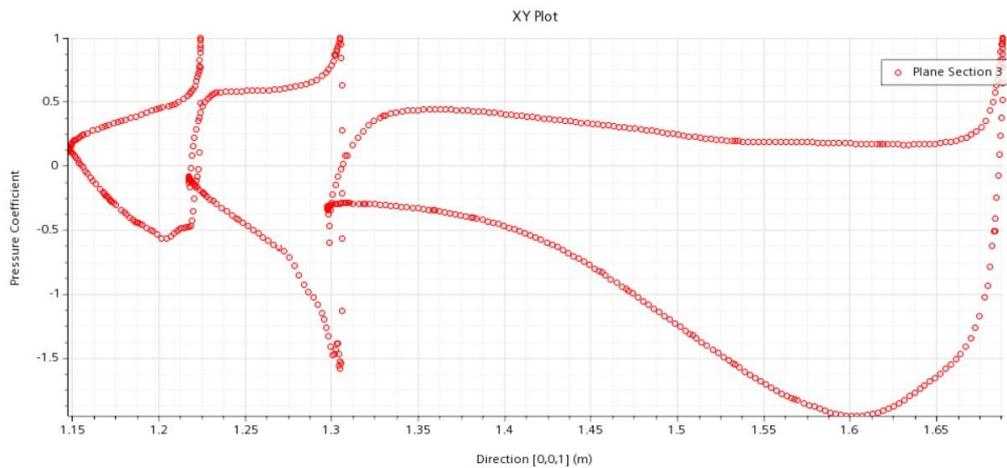


Figura 4.14 grafico del c_p della sezione 3 del modello 2

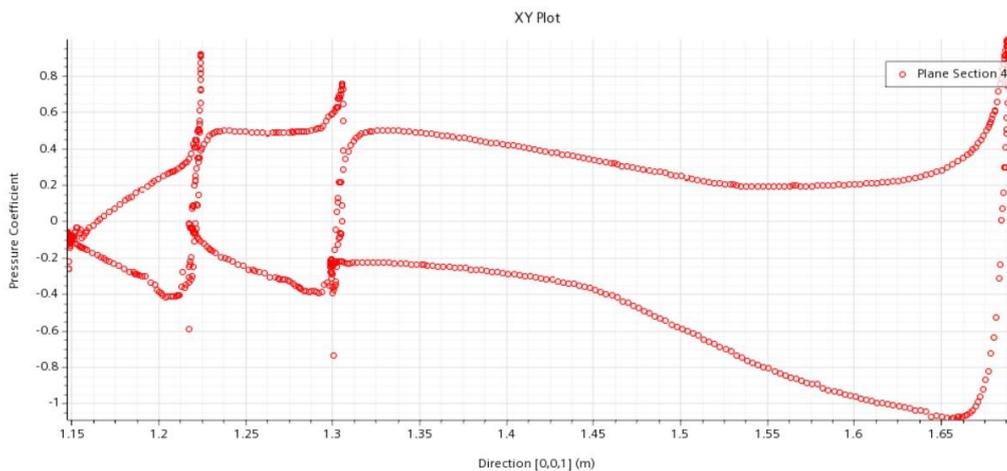


Figura 4.15 grafico del c_p della sezione 4 del modello 2

A conferma della prima visualizzazione cromatica effettuata nella mappa delle pressioni, i c_p delle sezioni flappate hanno incrementato i loro valori:

- 1) la sezione 4 ha visto aumentare il picco di aspirazione passando da -0,5 a -1;
- 2) la sezione 3 ha visto aumentare il picco di aspirazione passando da -1,6 a -2;
- 3) la sezione 2 ha visto aumentare il picco di aspirazione passando da -1,8 a -2;
- 4) anche la sezione 1, nonostante non fosse oggetto della modifica messa in atto, ha visto un leggero miglioramento passando da un picco di aspirazione di -1,8 a uno di -1,9.

Chiaramente la sezione che ha subito un maggiore miglioramento è quella più esterna, perché è la sezione che ha visto aumentare il suo angolo di attacco di un valore maggiore.

La simulazione ha dato come risultato una $L=118$ [N] e una $D=16$ [N], quindi con $E=7,4$.

Per completare infine il nostro progetto si è quindi deciso di passare anche allo svergolamento dei flap, sia per eliminare l'alto gap che si creava all'estremità tra questi e l'ala principale. sia per aumentare l'effetto benefico dato da un aumento dell'angolo di attacco.

4.3 Terzo modello 3D (Main svergolato, flap svergolati)

Data l'alta efficacia dello svergolamento del solo main, gli effetti dati dallo svergolamento anche dei flap si pensava già da prima che avrebbero portato migliorie ulteriori.

Coerentemente con quello fatto in precedenza, i flap sono stati svergolati in maniera analoga al profilo principale, mantenendo quindi sempre un angolo di svergolamento di 5° tra sezione 2 e sezione 4 e lasciando lo stesso angolo relativo profilo per profilo tra main e 1° flap e tra 1° flap e 2° flap

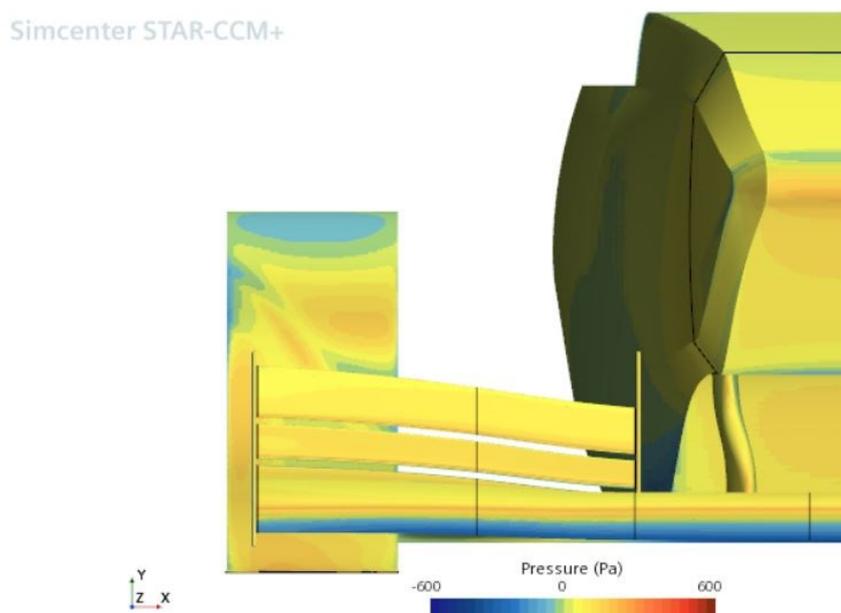


Figura 4.16 visualizzazione frontale delle pressioni della terza versione del modello 3D dell'ala

Simcenter STAR-CCM+

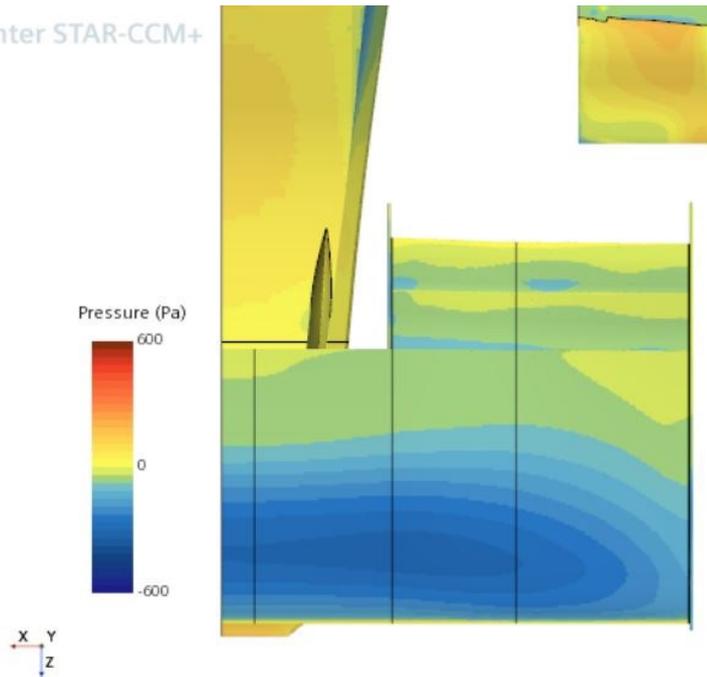


Figura 4.17 visualizzazione da sotto delle pressioni della terza versione del modello 3D dell'ala

Si è completati poi il confronto valutando i c_p delle quattro sezioni prese in esame nei modelli precedenti.

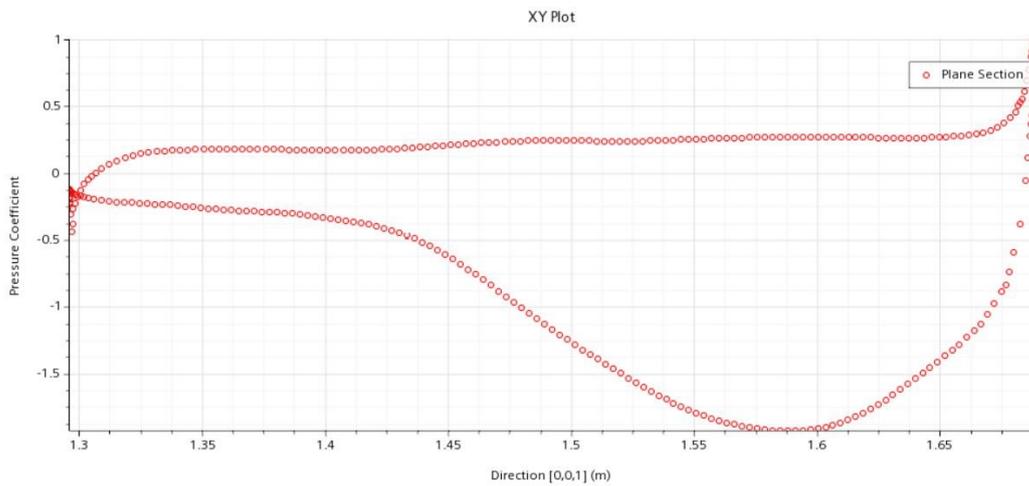


Figura 4.18 grafico del c_p della sezione 1 del modello 3

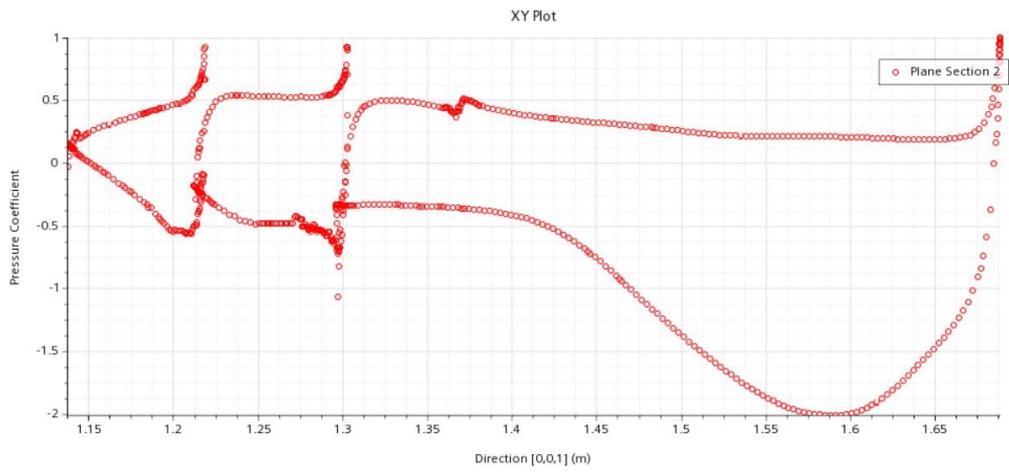


Figura 4.19 grafico del c_p della sezione 2 del modello 3

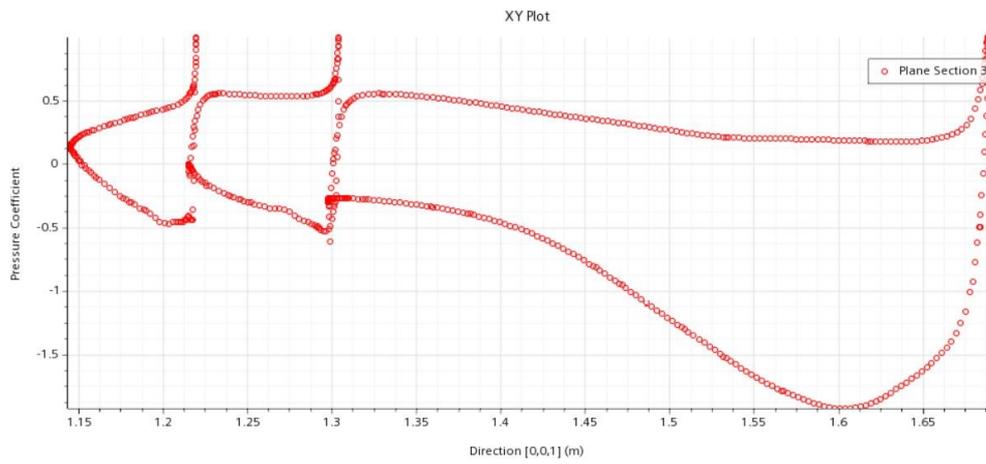


Figura 4.20 grafico del c_p della sezione 3 del modello 3

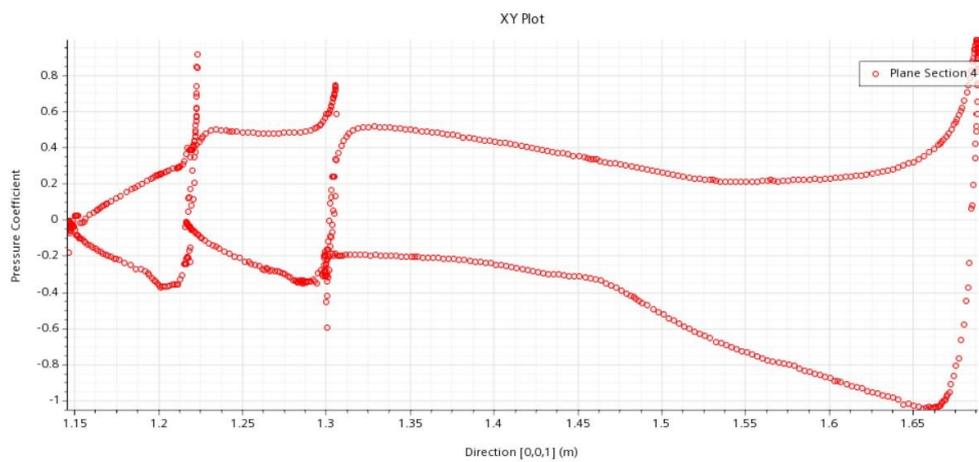


Figura 4.21 grafico del c_p della sezione 4 del modello 3

Dal confronto dei c_p del secondo e del terzo modello, è emerso che questi erano sostanzialmente sovrapponibili.

Questo è confermato dal fatto che a livelli di portanza la vettura è rimasta praticamente allo stesso valore ma ha diminuito l'effetto negativo dato dalla resistenza.

Infatti, la simulazione ha dato come risultato una $L=117$ [N] e una $D=14$ [N], quindi con $E=8,4$.

Questo risultato finale è importante confrontarlo con quello che era il nostro punto di partenza della vecchia vettura. La P4 Evoluzione presentava una $L=149$ [N] e una $D=22$ [N] e di conseguenza $E=6,8$.

È centrale sottolineare come è vero che si ha avuto un abbassamento della Downforce, ma grazie al progetto della nuova ala si è arrivati ad una consistente diminuzione della Drag, favorendo così un notevole aumento dell'efficienza. Questo, come abbiamo specificato nei capitoli precedenti, è l'effetto preferibile per una vettura a trazione elettrica che invece non necessita le stesse Downforce delle vetture a combustione e perciò il nostro risultato è da considerarsi molto soddisfacente.

Capitolo 5

Progettazione musetto, fondo e montanti per generazione Y250

Il nostro studio non si è solamente incentrato sull'ala, ma ha anche spaziato su altri elementi dell'aerodinamica che hanno apportato ulteriori miglioramenti alle prestazioni della vettura e verranno trattati in questo capitolo.

Le simulazioni con Star CCM+ sono avvenute in collaborazione con il collega e amico Alessandro Cicchini.

5.1 Limiti regolamento

La prima restrizione che ci è stata imposta a livello progettuale è stata necessariamente quella del Regolamento Tecnico della Formula SAE.

Infatti tra le varie limitazioni, quelle importanti da menzionare ai fini di una giusta spiegazione di questo capitolo saranno in particolare:

- avere un raggio di raccordo minimo per le superfici della parte anteriore della "carrozzeria" della vettura di almeno 38 m e non scendere al di sotto dei 45° di apertura;
- permettere il passaggio all'interno dell'abitacolo del pilota di una DIMA, cioè un elemento solitamente in legno di cui ci si serve per determina le dimensioni minime dello stesso;
- mantenere, come abbiamo già potuto constatare nei capitoli precedenti, una distanza minima da terra di tutte le superfici (escluse le ruote) di almeno 30 mm.

T4 Cockpit

T4.2.3 The driver's feet and legs must be completely contained within the primary structure when the driver is seated normally and the driver's feet are touching the pedals. In side and front views, any part of the driver's feet or legs must not extend above or outside of this structure.

T4.2.4 [DV ONLY] To allow for the steering actuator a reduced-height template (reduced by 50 mm, shown in figure 11) may be used for a section measuring 200 mm horizontally along the template's path (compare T4.2.1).

T4.2.5 [DV ONLY] The additional space allowed by T4.3.4 T4.3.4 and T4.2.4 may only be used for steering, braking and clutch actuators. When the actuators are removed, the standard templates must fit into the cockpit.

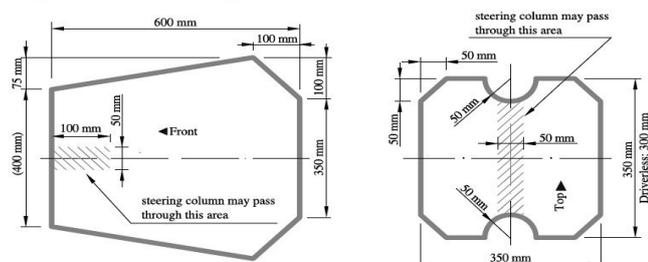


Figure 11: Cockpit opening template (left) and cockpit internal cross section template (right)

Figura 5.1 estratto di regolamento sulla DIMA (template)

5.2 Musetto

Il musetto è il primo elemento della macchina che incontra il flusso di aria relativo. È quindi di fondamentale importanza, oltre che per la minimizzazione di resistenza e la generazione di Downforce, anche per deviare i flussi di aria verso le altre parti della vettura in modo da risolvere in parte i problemi aerodinamici delle strutture retrostanti. Difatti uno studio adeguato del musetto ci può aiutare a far sì che arrivino ai componenti aerodinamici flussi il meno disturbati possibile e che questi possano giungere ad esempio in zone critiche che necessitino maggiore apporto di aria.

5.2.1 Problemi di partenza della P4 Evoluzione

Il punto di partenza del nostro progetto è, come abbiamo già ripetuto diverse volte, la vettura a combustione P4 Evoluzione, la quale però presentava il problema di avere una scocca portante.

Questo valore inficiava parecchio il lavoro di generazione di Downforce verso cui si rivolge lo studio di un progettista nelle competizioni di autovetture.

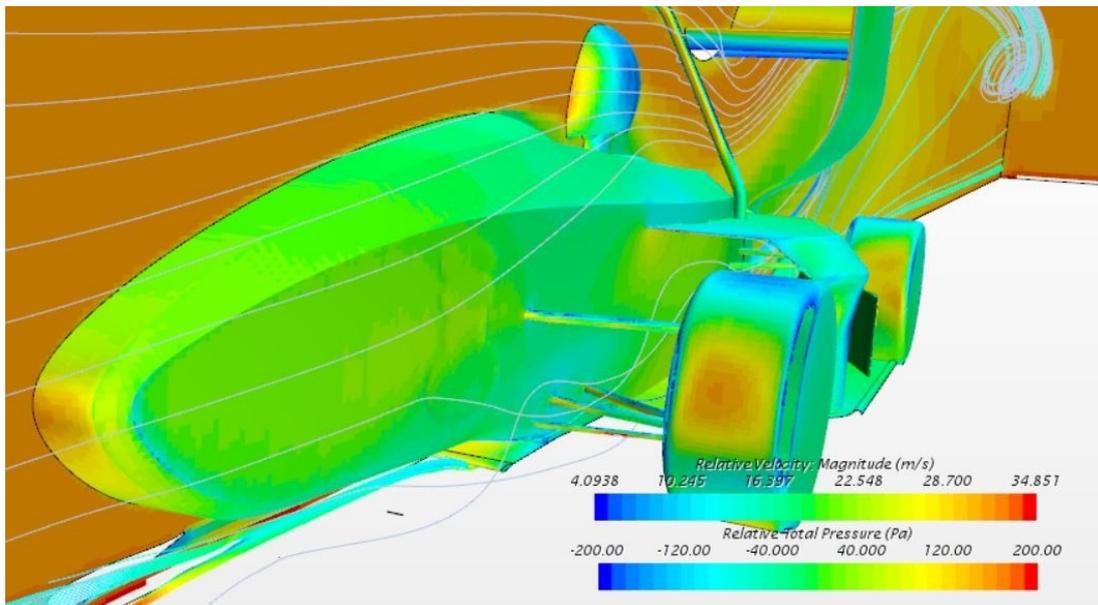


Figura 5.2 Visualizzazione della distribuzione di pressione nel CFD della scocca della P4 Evoluzione

Dalla figura 5.2 possiamo notare, infatti, come la parte inferiore del musetto della vettura presenti un'ampia zona di colore giallo che, in base alla legenda esplicita sottostante, indica una pressione che spinge verso l'alto dandoci conferma della portanza sopracitata.

Inoltre, il musetto della vettura risultava molto basso tale da non garantire un sufficiente apporto di aria al fondo.

Il primo passo, perciò, è stato quello di ottimizzare il musetto cercando di ridurre il più possibile il suo contributo a livello di portanza e di aiutare il fondo a lavorare in condizioni migliori con il giusto apporto di aria, senza la quale non sarebbe in grado di contribuire in modo consistente alla generazione di Downforce.

5.2.2 Progetto del nuovo musetto

Partendo da quelli che erano i problemi della precedente vettura, si è iniziato il progetto con uno studio, una ricerca di vari modelli e il disegno a mano di nuove soluzioni progettuali di musetto e, mettendole a confronto con la P4 Evoluzione, è emerso che queste avevano tutte un musetto molto più alto della vecchia monoposto.



Figura 5.3 visualizzazione del musetto della Peacock 4 Evoluzione



Figura 5.4 particolare del musetto della Peacock 4 Evoluzione, vista laterale

Questa soluzione progettuale, infatti, permetteva già da subito di convogliare più aria verso il fondo poiché riusciva a raccogliere il flusso d'aria da una superficie più ampia per poi deviarla verso il basso.

Un altro punto cruciale su cui ci si è mossi è stato quello di modificare non solo la posizione ma anche la forma del musetto affinché si potesse alzare anche il punto di ristagno. Questo, infatti, era molto basso nell'autovettura precedente e determinava necessariamente una sovrappressione nella parte inferiore e di conseguenza una spinta verso l'alto. Invece, con tutte le modifiche che si sono susseguite, si è riusciti a spostarlo sempre più verso l'alto.

Ulteriore elemento su cui si è posta attenzione è stata la curvatura della parte sottostante del musetto: difatti, lo scopo era quello di ricavare una curva che non fosse troppo accentuata da determinare il distacco del flusso ma sufficiente da determinare un'accelerazione dello stesso e conseguentemente una considerevole depressione che incrementasse la Downforce.

Si è passati così a disegnare prima a mano qualche schizzo del musetto, per poi passare ad una prima versione dello stesso al CAD.

Lo step successivo consisteva nella semplice verifica del lavoro svolto in precedenza e perciò si è proceduto con una prima simulazione al CFD del musetto disegnato al CAD senza la presenza dell'ala anteriore per fare un check delle pressioni.

Nonostante questa prima versione fosse abbastanza rudimentale e poco affusolata, i risultati sono stati fin da subito incoraggianti rispetto alla P4 Evoluzione.

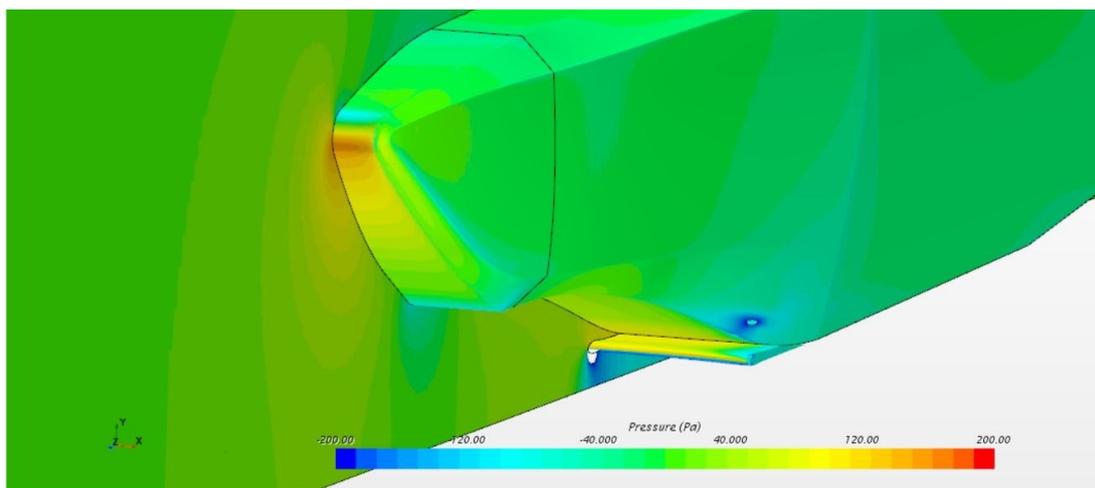


Figura 5.5 visualizzazione delle pressioni al CFD della prima versione del musetto vista dall'alto

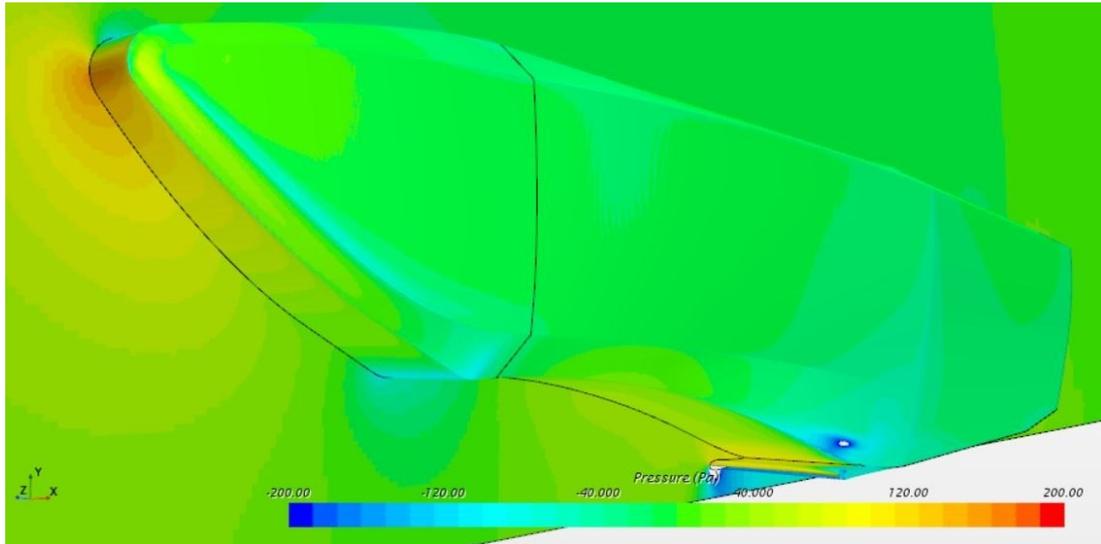


Figura 5.6 visualizzazione delle pressioni al CFD della prima versione del musetto vista dal basso

Dalle due figure precedenti infatti possiamo notare che:

- la parte rossa, cioè di pressione massima del musetto (dove si trova il punto di ristagno), si trova spostata nella parte leggermente inferiore e scendendo si trova una zona notevole in giallo che va ad indicare una pressione che spinge verso l'alto creando così una portanza che per noi è un effetto decisamente negativo;
- scendendo ancora sotto però la curva assume la curvatura giusta per creare una zona azzurra e quindi da come si legge dalla scala, una depressione come si desiderava.

Il passo successivo è stato quello di modificare il musetto affinché il punto di ristagno avesse una collocazione nella zona più alta e in modo tale che anche la zona sottostante in pressione fosse meno estesa e avesse dei valori meno elevati rispetto alla versione precedente.

Per fare ciò quindi si è proceduti con una nuova versione del disegno con SolidWorks e si è abbassato il musetto al fine di alzare il punto di ristagno e seppur questa non era una versione definitiva, già nella visualizzazione dei colori delle pressioni a parità di scala, dava una immediata impressione di miglioramento.

Il passo aggiuntivo rispetto alla versione 1 è stato quello di aggiungere una versione semplificata dell'ala anteriore, per vedere in che modo i due elementi potessero influenzarsi l'un l'altro e a parte un miglioramento nel convogliare le linee di flusso verso il fondo, la presenza del profilo alare non ha apportato particolari modifiche.

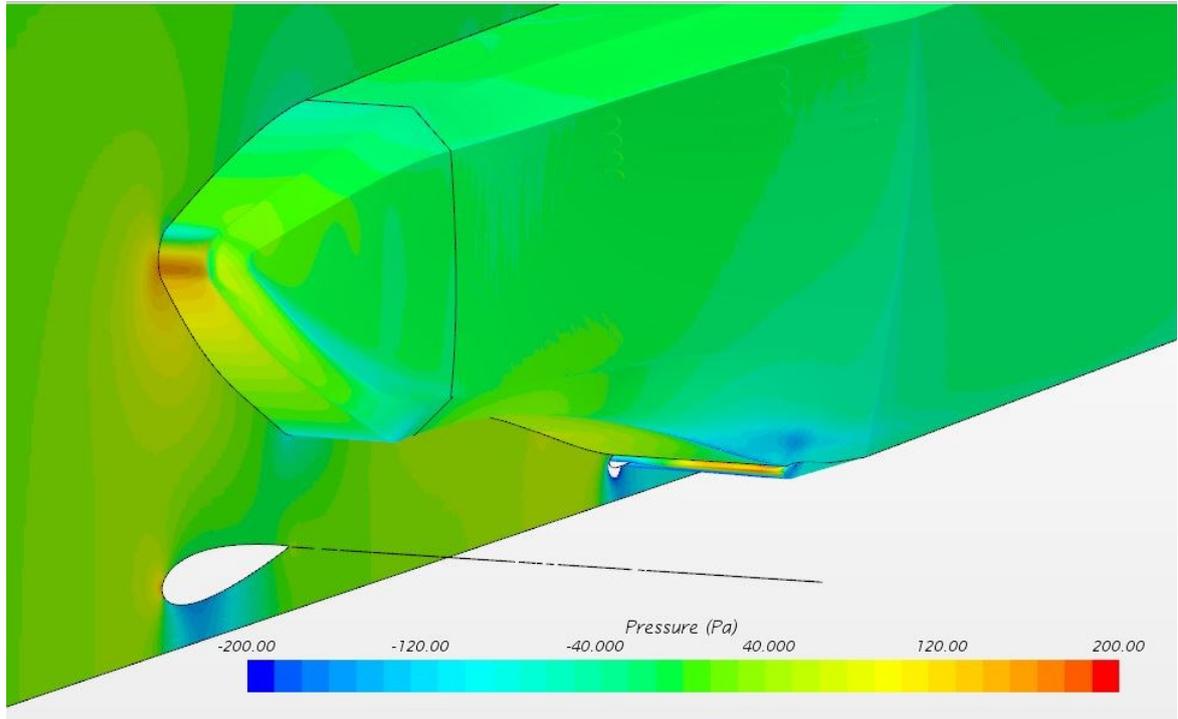


Figura 5.7 visualizzazione delle pressioni al CFD della seconda versione del musetto vista dall'alto

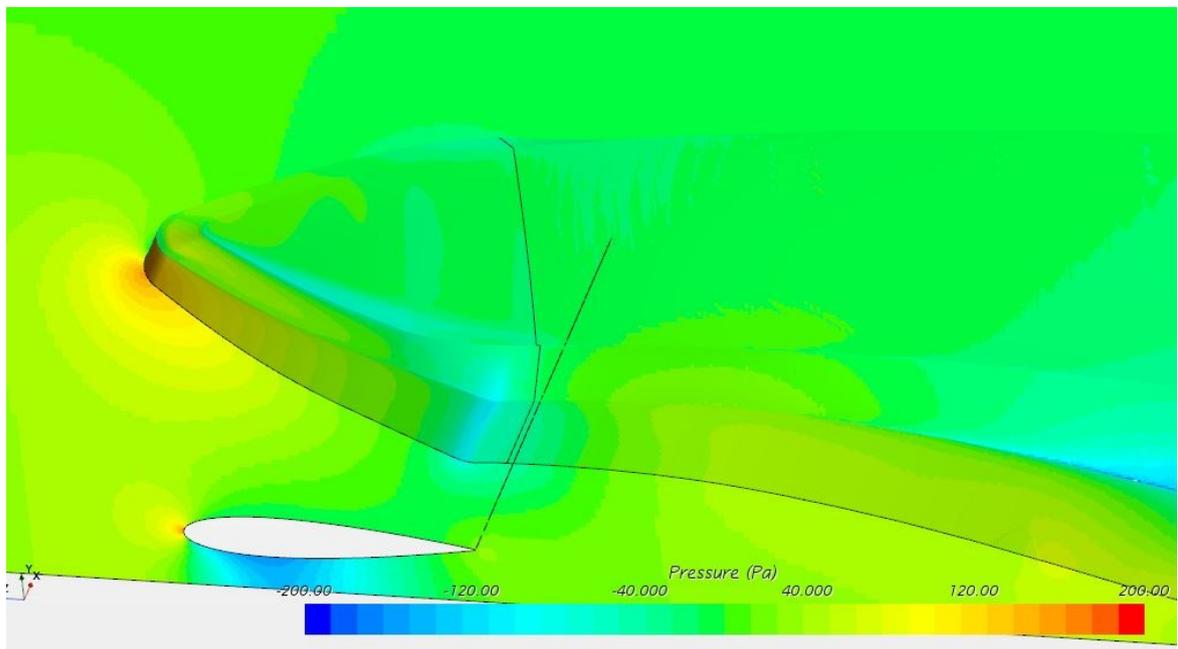


Figura 5.8 visualizzazione delle pressioni al CFD della seconda versione del musetto vista dal basso

È possibile notare dalle figure 5.7 e 5.8 come la zona rossa e quindi il punto di ristagno si trovino leggermente più in basso e che anche la zona gialla, cioè la zona in pressione che dà una spinta verso l'alto, abbia un'area inferiore rispetto alla versione precedente.

Inoltre, nonostante le migliorie sulle zone critiche, da come possiamo vedere bene nelle figure, non vi sono state modifiche alla zona che giova al nostro scopo e cioè la zona azzurra.

Si è passati quindi alla terza versione che, grazie ai risultati ottenuti, si è poi anche rivelata essere l'ultima.

Anche in questa ultima versione si è mantenuta la presenza dell'ala anteriore.

In questa ultima serie di modifiche si è intervenuto su vari elementi che si sono rivelati essere determinanti:

- muso più lungo e affusolato pur rimanendo all'interno dei limiti degli angoli imposti dal regolamento;
- forma cambiata fino a quasi rendere simmetrico il musetto sopra e sotto;
- conseguente abbassamento della punta.

Infatti, una volta cambiata ulteriormente la forma al CAD si è sottoposta la nuova vettura a un calcolo al CFD e la nuova versione del musetto ha presentato una forza risultante di 4 [N] verso l'alto, che per quelle che sono le forze in ballo nella nostra vettura è da considerare un ottimo risultato, soprattutto alla luce della forma a profilo alare (e quindi tipicamente portante) del modello precedente.

Cruciale per il raggiungimento di questo scopo è stato il variare delle zone di pressione nella nuova configurazione del musetto.

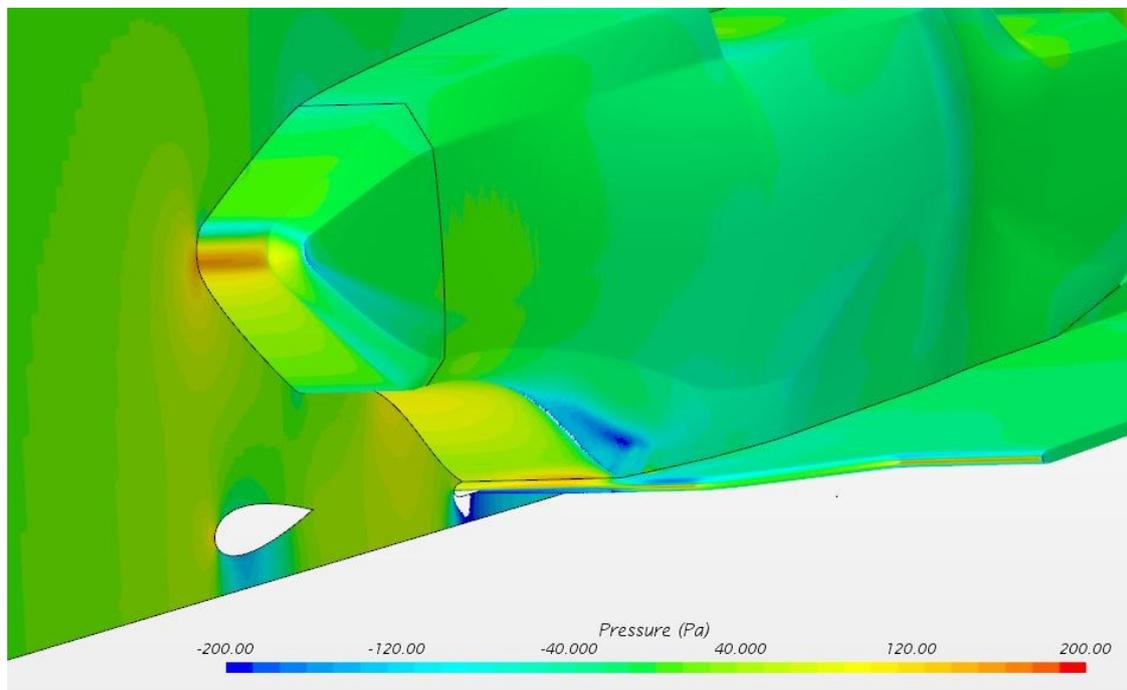


Figura 5.9 visualizzazione delle pressioni al CFD della versione definitiva del musetto vista dall'alto

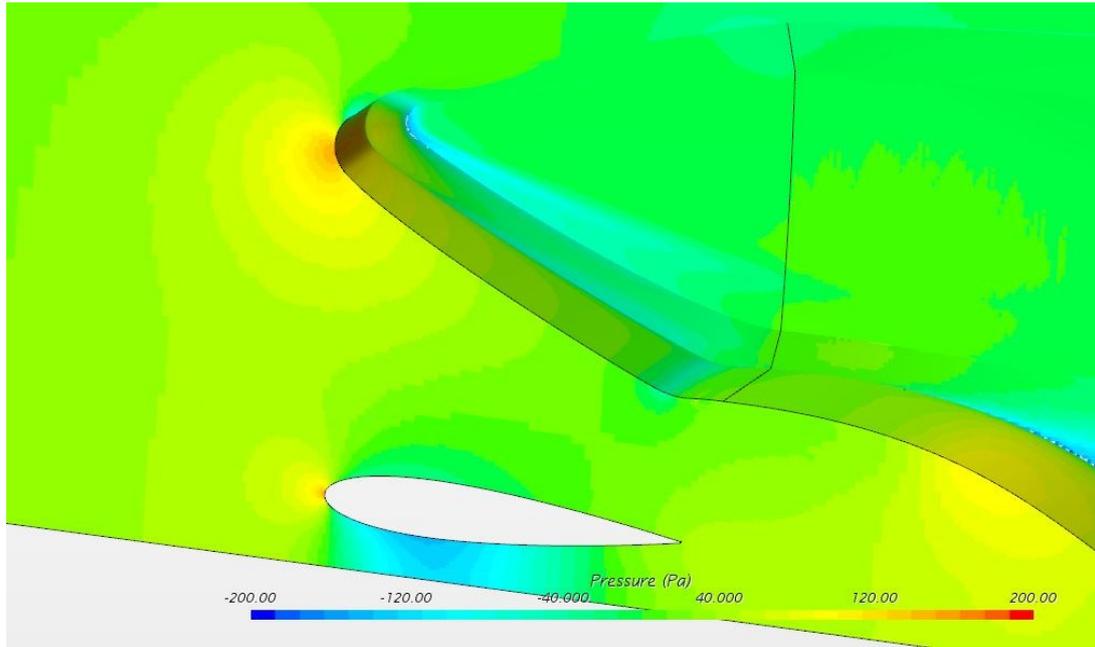


Figura 5.10 visualizzazione delle pressioni al CFD della versione definitiva del musetto vista dal basso

Come possiamo osservare dalle immagini 5.9 e 5.10 infatti, sebbene la zona sottostante di colore azzurro adibita a generare una depressione che aiutava al nostro scopo si sia abbastanza contenuta sia in termini di area che in termini di intensità di colore (e quindi in termini di depressione), la zona rossa, non solo ha diminuito la sua intensità di colore distribuendo parte della pressione anche alla parte superiore bilanciando così anche la spinta che dava alla parte inferiore, ma si trova anche generalmente più spostata verso l'alto anche la porzione rossa che creava una spinta sfavorevole al nostro scopo.

Inoltre, risalta immediatamente all'occhio la quasi scomparsa della zona gialla di pressione nella parte sottostante, sostituita da una zona di colore verde e quindi neutra a noi molto più gradita per i nostri scopi.

5.3 Fondo

Nel mondo delle competizioni di autovetture, il fondo è storicamente sempre stato considerato un elemento fondamentale intorno al quale si fondava la progettazione per la generazione di Downforce insieme all'ala anteriore e a quella posteriore. Rispetto a queste ultime, però, ha l'enorme vantaggio di poter creare una forza senza creare un momento grazie al fatto che la forza è applicata al centro della vettura e quindi senza un braccio.

Risulta quindi essenziale fare in modo che questo elemento generi quanta più forza possibile in modo tale da poter evitare di dover compensare il rimanente contributo con le restanti due componenti che potrebbero andare a scompensare l'equilibrio al momento.

Questo effetto è ancora più estremizzato nelle massime competizioni delle auto elettriche come, ad esempio, la formula E dove il fondo genera quasi tutta la Downforce mentre le ali anteriori sono molto più scariche rispetto per esempio ad una vettura da Formula 1 e l'ala posteriore è quasi inesistente e sostituita da due piccole sezioni sopra le ruote.

5.3.1 Introduzione del Tea-Tray

Al fine di aumentare le prestazioni del nostro fondo il nostro primo passo è stato pensare all'introduzione di un Tea-Tray (o splitter)

Il Tea-Tray è stato largamente usato nel corso degli anni nel corso delle competizioni, soprattutto in Formula 1.

Esso non è altro che una porzione di fondo che fuoriesce dalla parte anteriore del monoscocca. Di fatto è una lastra piana sporgente con il bordo anteriore di un profilo biconvesso posizionata nella zona anteriore del monoscocca allo scopo di creare tra questi due componenti una zona di ristagno.

La sua presenza genera quindi, data la sua posizione immediatamente superiore rispetto al fondo, una zona di sovrappressione sopra di esso nella parte anteriore della vettura.

Questa può sembrare che possa generare un effetto contrario ed effettivamente se mal progettato può portare grossa resistenza del Tea-Tray e a causa di questo aumento di pressione tra Tea-Tray e scocca, si può creare una portanza in quest'ultima.

Al contrario, però, una sua corretta progettazione e realizzazione comporta un notevole incremento delle prestazioni del fondo.

Infatti, questa zona di ristagno costringe le particelle di aria che giungono in questa zona a dover curvare velocemente nella zona del profilo biconvesso e questa accelerazione determina una conseguente depressione che spinge la vettura verso il basso.

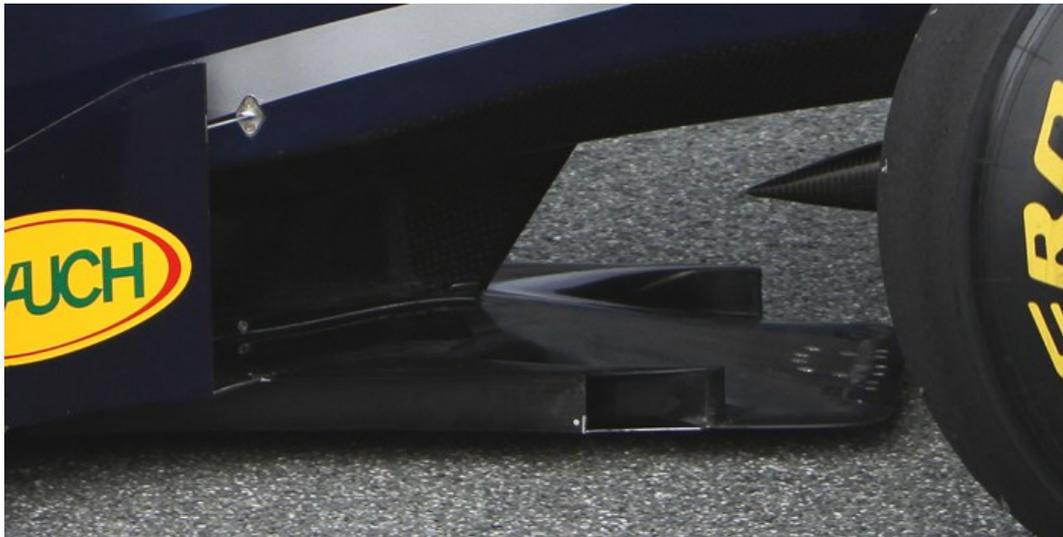


Figura5.11 Particolare del Tea-Tray montato su una vettura Formula 1

5.3.2 Progettazione del Tea-Tray

Le fasi di sviluppo del Tea-Tray sono avvenute in contemporanea allo sviluppo del musetto, poiché l'interazione tra questi due componenti risulta essenziale.

Il primo modello oggetto del nostro studio è stato il medesimo utilizzato nella vecchia autovettura per orientarsi su quale fosse il punto di partenza e valutare se l'interazione con un nuovo muso (versione 1) potesse giovare alla vecchia configurazione dello splitter.

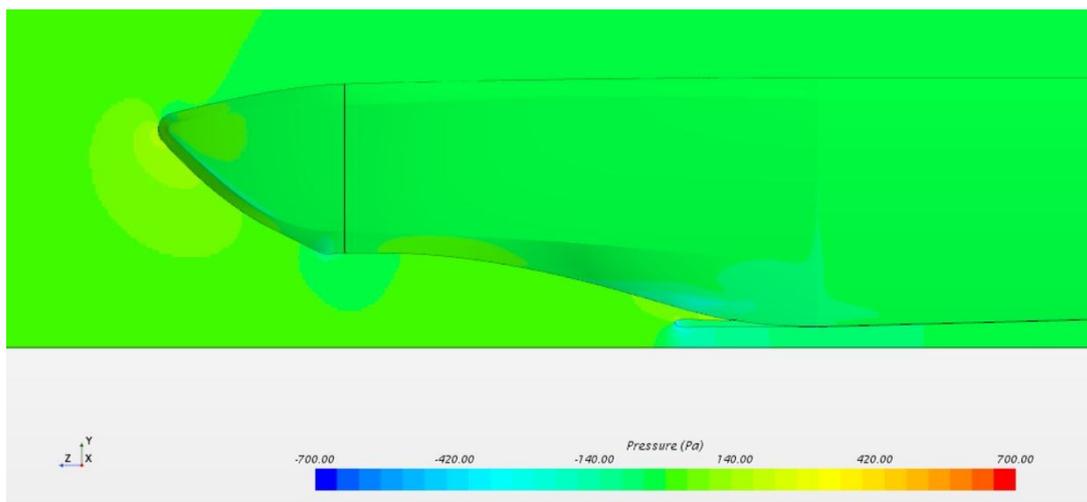


Figura 5.12 visualizzazione laterale della distribuzione di pressione al CFD della prima versione di Tea-Tray

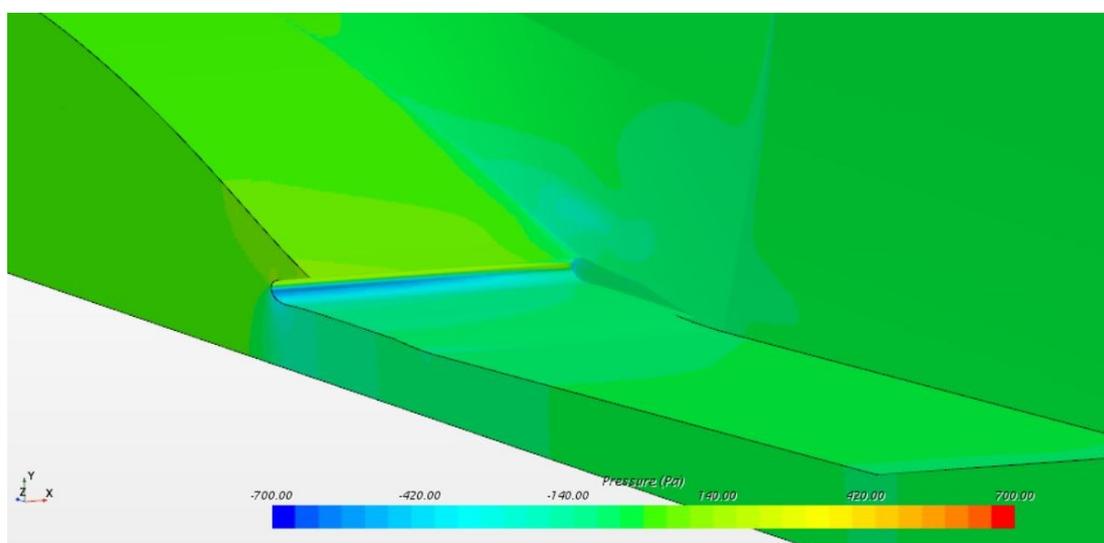


Figura 5.13 visualizzazione dal basso della distribuzione di pressione al CFD della prima versione di Tea-Tray

Come si può visualizzare nelle figure 5.12 e 5.13 già la prima configurazione con il vecchio Tea-Tray accoppiata con il nuovo musetto offriva una zona considerevole di depressione (riconoscibile in figura dalla zona azzurra e addirittura alcuni tratti di colore blu), ma lo splitter raccoglieva molta aria determinando un grande ristagno, determinando uno dei possibili effetti indesiderati di un Tea-Tray non adeguato e cioè una zona, anche se non particolarmente grande, di sovrappressione, distinguibile per il colore giallo.

Si è pensato così di far in modo che lo splitter determinasse comunque la depressione nella parte bassa e quindi lasciando invariata la curva ma cercando di far raccogliere allo stesso meno aria della versione precedente.

Per ovviare questo problema si è pensato di accoppiare alla seconda versione del musetto (con aggiunta dell'ala anteriore) un Tea-Tray meno sporgente e quindi più corto.

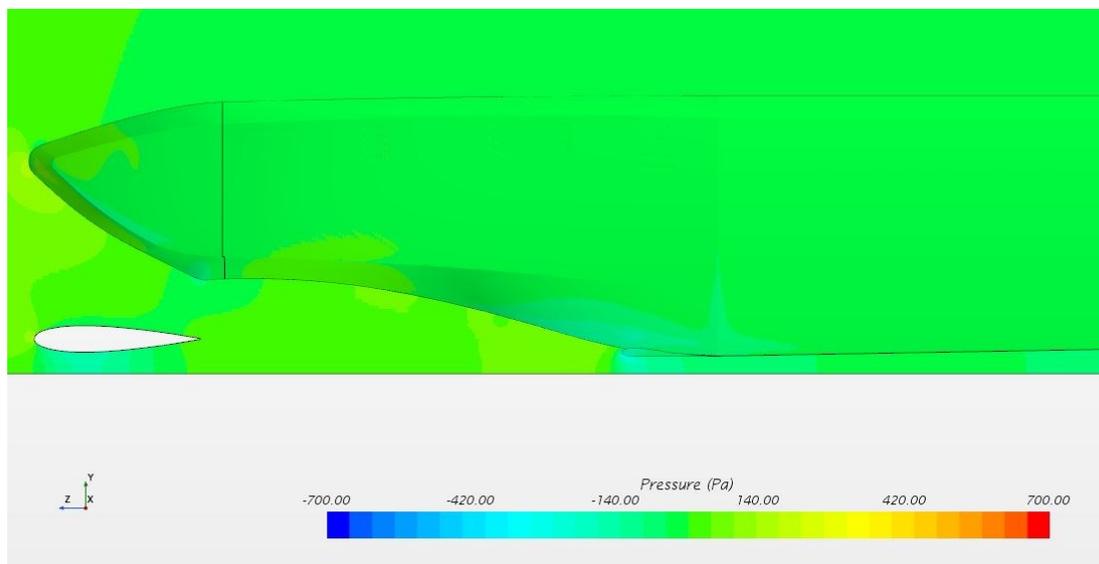


Figura 5.14 visualizzazione laterale della distribuzione di pressione al CFD della seconda versione di Tea-Tray

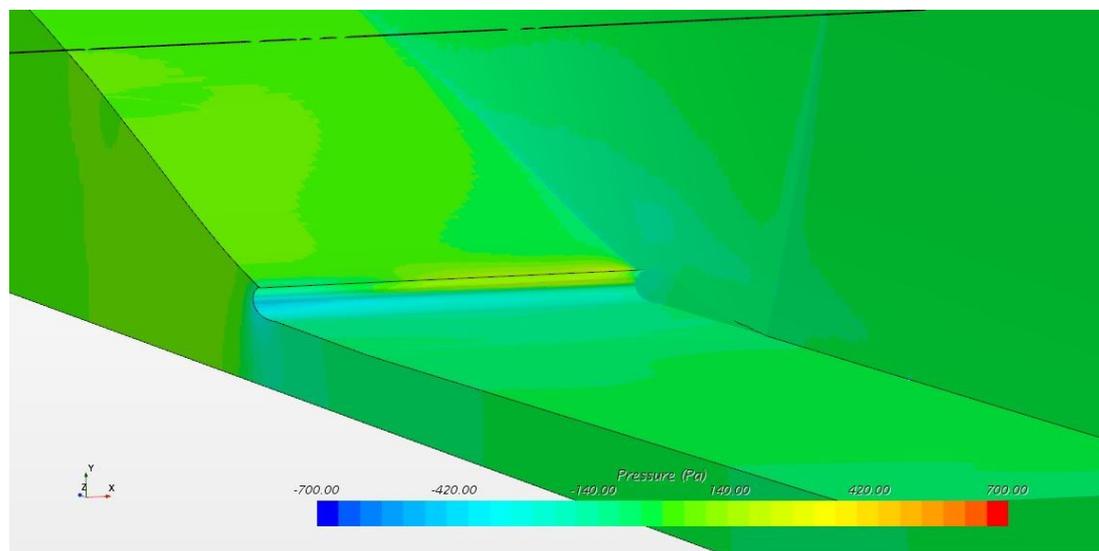


Figura 5.15 visualizzazione dal basso della distribuzione di pressione al CFD della seconda versione di Tea-Tray

Come possiamo facilmente notare dalle figure 5.14 e 5.15 e dalle relative legende, la zona di sovrappressione (di colore giallo) è andata in modo massiccio a ridursi mentre, seppure nella zona sottostante abbiamo visto scomparire la sottilissima zona ad alta depressione di colore blu, abbiamo visto aumentare però l'estensione dell'area di depressione di colore azzurro, andando così a compensare quello che è per noi l'effetto desiderato.

Abbiamo visto così un miglioramento sotto ogni punto di visto.

Dati i risultati molto soddisfacenti della seconda versione il progetto è proseguito elaborando un'ulteriore implementazione che potesse sfruttare al massimo gli effetti benefici del secondo.

È nata così la terza versione del Tea-Tray che però aveva anche un'estensione laterale in modo da aumentare la superficie utile che generasse depressione.

Di questa configurazione di Tea-Tray accoppiata con il terzo modello di musetto sono state attuate due versioni:

- una che fosse il solo prolungamento laterale del fondo della versione 2;
- l'altra che fosse identica alla precedente ma che differisse da questa per la sola lunghezza della sporgenza del Tea-Tray tentando di farlo più lungo anche della versione 1 al fine di aumentare ancora di più la superficie deportante.

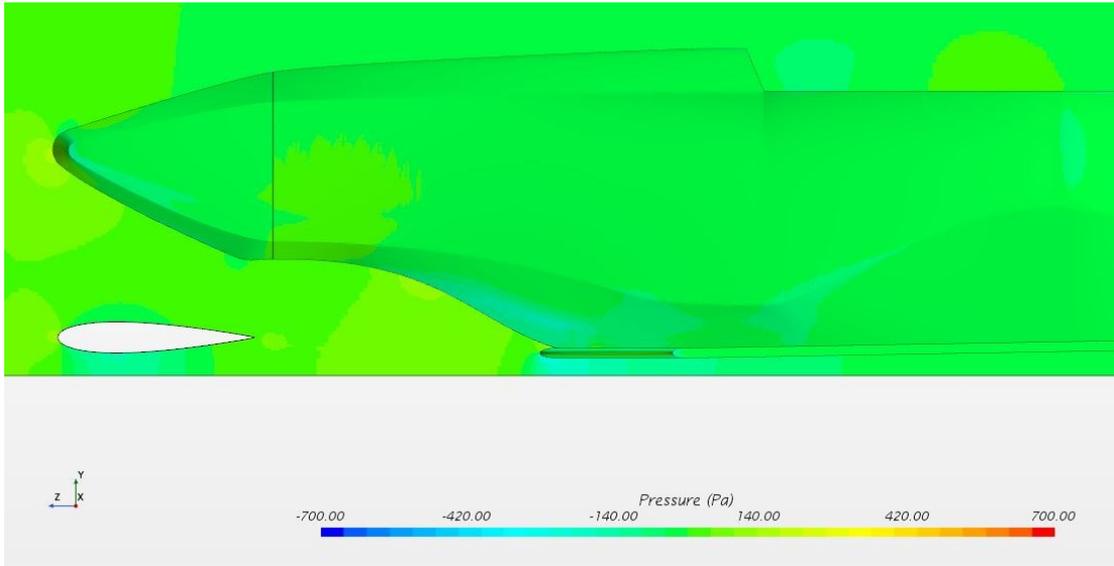


Figura 5.16 visualizzazione laterale della distribuzione di pressione al CFD della terza versione di Tea-Tray in versione più corta

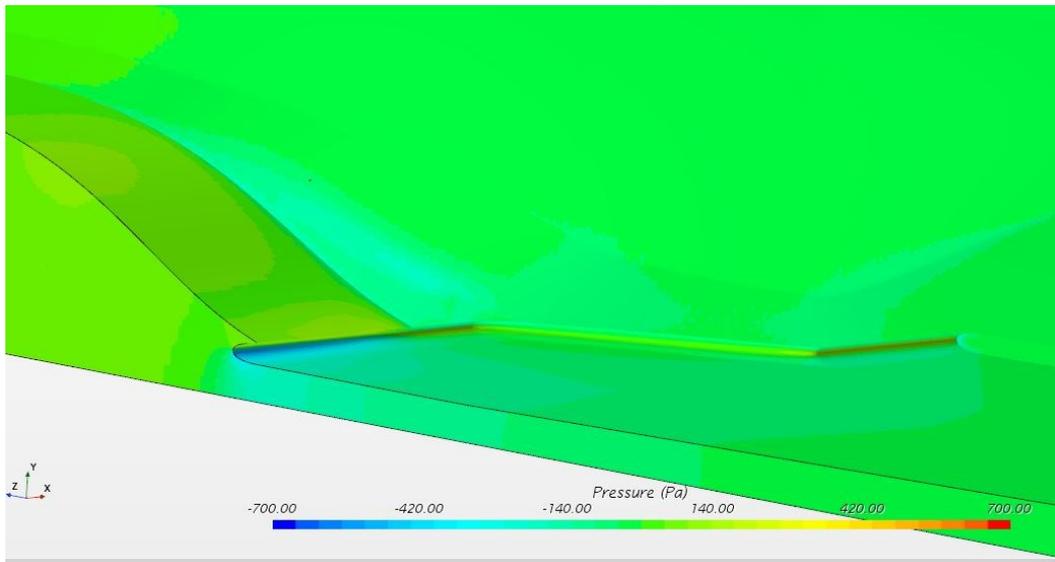


Figura 3.17 visualizzazione dal basso della distribuzione di pressione al CFD della terza versione di Tea-Tray in versione più corta

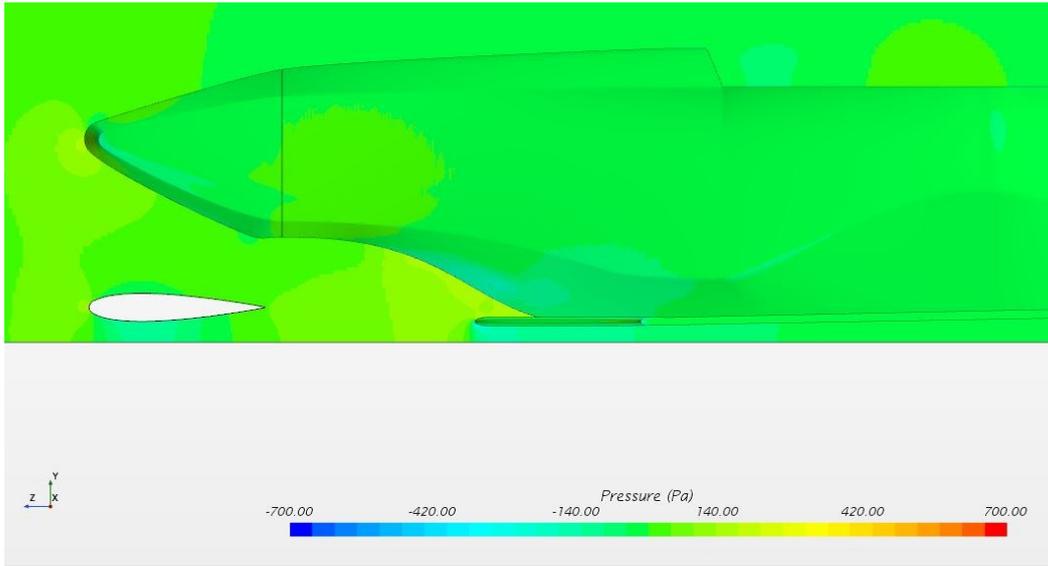


Figura 5.18 visualizzazione laterale della distribuzione di pressione al CFD della terza versione di Tea-Tray in versione più lunga

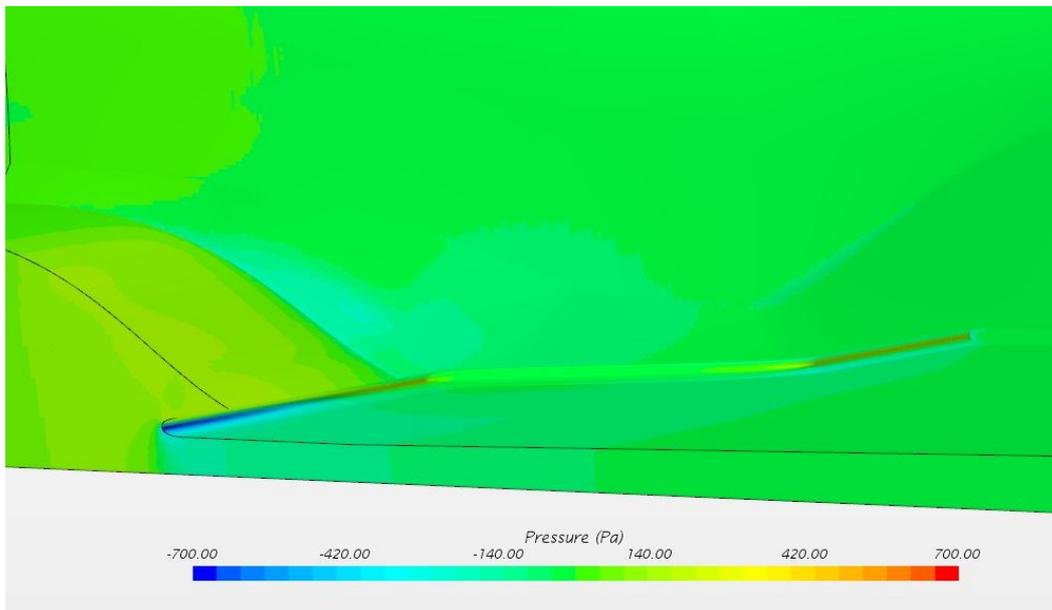


Figura 5.19 visualizzazione dal basso della distribuzione di pressione al CFD della seconda versione di Tea-Tray in versione più lunga

Come era facilmente intuibile, entrambi i risultati hanno profuso risultati migliorativi in termini di depressione ottenuta essendo aumentata la superficie del fondo. Questo, infatti, ha comportato una maggiore portata d'aria nel fondo la quale accelerando ci aiuta ad ottenere la Downforce.

Altrettanto prevedibile, di conseguenza, è la maggiore depressione della superficie più ampia; perciò, come confermato dal paragone che possiamo fare nella visualizzazione delle figure 5.16 e 5.17 con le 5.18 e 5.19, una depressione superiore è stata riscontrata nella versione con Tea-Tray più lungo.

Questa configurazione però per le stesse ragioni della versione iniziale, raccoglieva una maggior quantità d'aria, determinando così una visibile zona di pressione (colore giallo in figure 5.18 e 5.19) che vanificava gran parte dell'ottimo lavoro effettuato dalla parte sottostante.

Per questa ragione, facendo il computo totale dei contributi, si è andati a scegliere la configurazione con Tea-Tray più corto, nonostante apparentemente potesse sembrare la peggiore delle due.

Da notare come nella zona laterale della scocca e nella zona superiore del fondo si crei una zona di depressione.

Per un successivo studio del fondo risulterà fondamentale evitare che si crei questa zona di depressione per evitare di vanificare il lavoro svolto dal Tea-Tray, a tal fine si potrebbe pensare di creare un fondo convergente nella parte frontale per canalizzare più aria possibile sotto la vettura e sfruttare al massimo l'effetto suolo. Tuttavia, tale parte della progettazione non verrà trattata in questo studio.

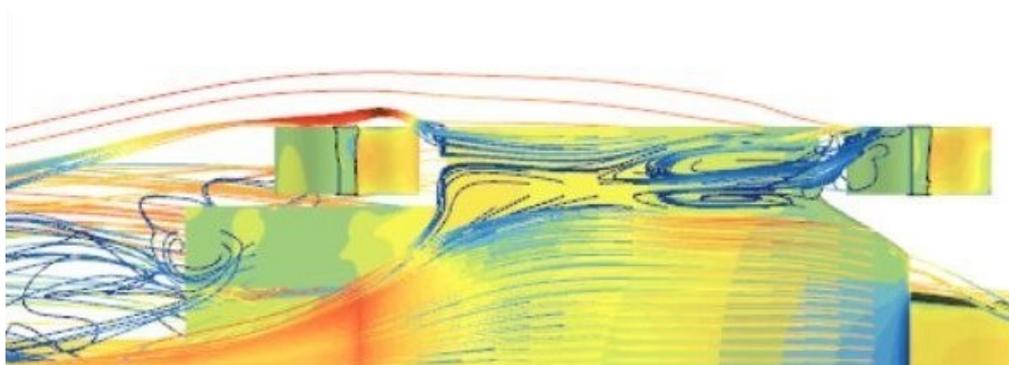


Figura 5.20 Mappa delle pressioni e linee di corrente sul fondo da una vista dal basso del CFD della vettura

Come si può notare anche il confinamento del flusso sul fondo, nonostante non fosse un obiettivo dello studio, è risultato soddisfacente. In futuro sarà necessario studiare approfonditamente il diffusore, parte finale del fondo e confinare all'esterno il flusso disturbato dalle ruote.

Alla situazione attuale, con lo studio approfondito del solo Tea-Tray, il fondo genera una Downforce di 22 [N] con una Drag di soli 0,32 [N] risultato ritenuto apprezzabile.

5.4 Montanti per la generazione di vortici Y250

Nel mondo delle competizioni ai massimi livelli come ad esempio la Formula 1, il livello di progettazione è arrivata a tenori di qualità talmente elevati, che oltre alle solite mission di massimizzazione di Downforce e minimizzazione di Drag, i lavori si incentrano sulla generazione di appositi vortici ben direzionati che hanno lo scopo di confinare parti della vettura e/o evitare che altri che possano essere dannosi possano disturbare o sporcare il flusso verso le superfici aerodinamiche.

Uno dei più celebri di questi vortici progettati ad hoc è sicuramente il vortice Y250.

5.4.1 Introduzione sul vortice Y250

In Formula 1, la zona centrale dell'alettone anteriore, da regolamento, è costituita da un profilo biconvesso simmetrico; questa porzione di ala è agganciata a dei sistemi di supporto che consentono di fissare la stessa al corpo vettura.

In corrispondenza dell'intersezione supporto-ala si fora un vortice che viaggia lungo il corpo vettura fino a raggiungere le ruote posteriori. Parte di questo vortice entra nel fondo vettura ed energizza il flusso che genera l'Effetto suolo.

Poiché i supporti di sostegno sono posizionati a circa 250 [mm] dall'asse di simmetria dell'auto il vortice viene detto Y250.



Figura 5.21 visualizzazione di un'ala anteriore di una vettura Formula 1 con dettaglio della parte centrale con profilo biconvesso simmetrico e i montanti, situati a 250 mm dall'asse centrale



Figura 5.22 visualizzazione degli Y250 in una vettura Formula 1 in movimento

5.4.2 Progettazione del nuovo montante

Nel nostro caso il vortice aveva più lo scopo di proteggere la scocca dal flusso disturbato piuttosto che confinare il fondo ed energizzarne il flusso.

Dopo una ricerca preliminare, è emerso che nella maggior parte dei casi l'Y250 è generato da un profilo biconvesso simmetrico posto con la corda parallela alla direzione del flusso.

Si è deciso così di adottare questo profilo ma, per aumentare l'intensità di tale vortice, si è stabilito di porre la corda del profilo con un leggero angolo rispetto alla direzione del flusso, in maniera tale da creare una leggera differenza di pressione tra le due parti del profilo con conseguente aumento dell'intensità del vortice.

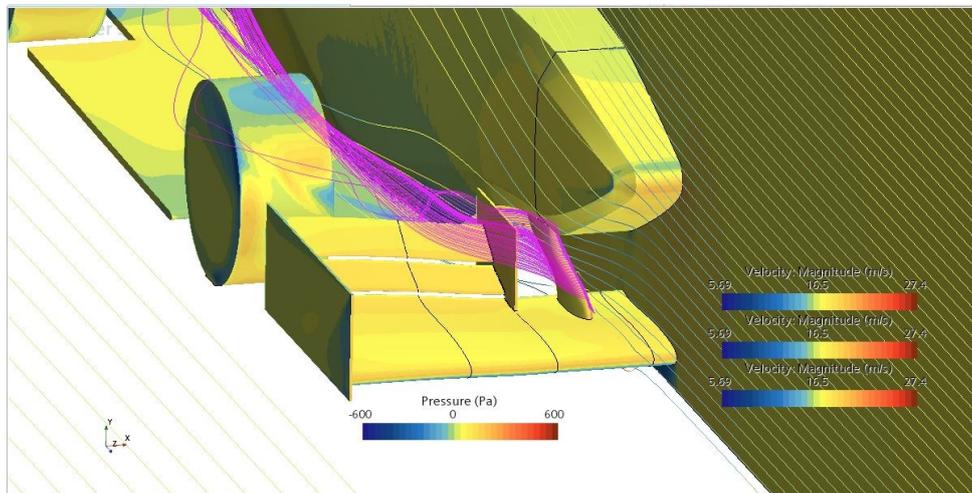


Figura 5.23 Vortice Y250 (in viola) generato del montante dell'ala anteriore

Come si può osservare dalla figura 5.23, l'obiettivo è stato raggiunto e il vortice protegge efficacemente la scocca dal flusso disturbato.

Ovviamente nello studio futuro della vettura la parte laterale verrà arricchita di componenti, occorrerà quindi valutare se il vortice sarà ancora efficace o no. Tuttavia, in caso negativo basterà apportare modifiche al montante per ottenere un vortice che soddisfi le necessità del caso.

Capitolo 6

Conclusioni

Gli obiettivi preposti sono stati efficacemente raggiunti.

Infatti, come illustrato alla fine dei vari capitoli si è riusciti per ogni elemento oggetto di studio a raggiungere lo scopo prefissato.

Dal punto di vista delle efficienze, l'intero blocco anteriore, confrontato con quello della vettura precedente, ha subito un notevole aumento su tutti i fronti. Questo, ricordiamo ancora una volta, è l'obiettivo primario da inseguire nella progettazione di una vettura elettrica.

Da non trascurare però è il contributo totale di tutto il blocco a livello di Downforce. Infatti, nonostante l'abbassamento di Lift della nuova ala, l'intero blocco non dovrebbe aver subito grosse diminuzioni grazie al contributo fornito dal nuovo musetto e dal nuovo Tea-Tray.

Questo studio non è però da considerarsi un punto di arrivo per la costruzione della nuova vettura, bensì un punto di partenza. Occorrerà continuare lo studio del fondo ottimizzando la parte posteriore allo scopo di sfruttare tutta la superficie al di sotto della vettura. Inoltre, sarà fondamentale sfruttare il nuovo monoscocca anche dal punto di vista aerodinamico così da evitare di vanificare il lavoro svolto sugli altri componenti. Infine, di fondamentale importanza sarà la progettazione delle altre appendici aerodinamiche come l'ala posteriore e le pance.

Si auspica che questo lavoro possa essere un buon punto di partenza per i progetti futuri di sviluppo della monoposto.

Bibliografia

- [1] Cicchini, A. (2021). L'aerodinamica di una vettura formula SAE a trazione elettrica. Tesi di laurea triennale in ingegneria meccanica, Università Politecnica delle Marche
- [2] Mosca, M. (2020). Progetto del volante e della colonna sterzo di una vettura di Formula SAE. Tesi di laurea triennale in ingegneria meccanica, Università Politecnica delle Marche
- [3] <https://it.wikipedia.org/wiki/Aerodinamica>
- [4] <https://it.wikipedia.org/wiki/Portanza>
- [5] https://www.univpm.it/Entra/Engine/RAServeFile.php/f/P002449/allegati_doc/Lezione_1.pdf
- [6] <https://mondointasca.it/2019/03/12/leonardo-da-vinci-visions-le-sfide/>
- [7] https://www.univpm.it/Entra/Engine/RAServeFile.php/f/P002449/allegati_doc/Lezione_2.pdf
- [8] <http://www.adag.unina.it/italiano/didattica/lezione4.pdf>
- [9] https://www.univpm.it/Entra/Engine/RAServeFile.php/f/P002449/allegati_doc/Aerodinamica_Autovetture_Sportive_1.pdf
- [10] Formula Student Rules 2020 Version 1.0
- [11] I. H. ABBOTT & A. E. VON DOENHOFF. Theory of wing sections including a summary of airfoil data 1958 DOVER PUBLICATIONS, INC. NEW YORK
- [12] J. KATZ. Race Car Aerodynamics: Designing for Speed 1995 ROBERT BENTLEY PUBLISHER
- [13] E. BENZING. Ali Progettazione e applicazione su auto da corsa. Wings Their design and application to racing cars 2012 GIORGIO NADA EDITORE
- [14] E. BENZING. Dall'aerodinamica alla potenza in Formula 1 Mezzo secolo di motori in analisi 2004 GIORGIO NADA EDITORE
- [15] <https://skybrary.aero/sites/default/files/Roll.png>
- [16] <http://airfoiltools.com/>

- [17] <http://www.formula1benzing.eu/italia2014.html>
- [18] https://www.univpm.it/Entra/Engine/RAServeFile.php/f/P002449/allegati_documento/Lezione_6.pdf
- [19] <https://core.ac.uk/download/pdf/31566.pdf>
- [20] https://learn.univpm.it/pluginfile.php/169265/mod_resource/content/1/Lezione_11.pdf
- [21] <https://www.f1sport.it/2013/04/f1-che-cose-il-t-tray/>
- [22] <https://www.f1sport.it/2018/12/f1-il-vortice-y250-cose-e-perche-e-così-importante/>
- [23] https://learn.univpm.it/pluginfile.php/201579/mod_resource/content/1/Aerodinamica%20di%20vetture%20sportive.pdf

Ringraziamenti

Con questa tesi sulla quale ho lavorato per oltre un anno si conclude un lungo percorso, iniziato fin da subito in salita, che a tratti è sembrato infinito ma che sono contento e anche un po' orgoglioso di aver portato a termine.

Porgo i miei ringraziamenti in primis al Professor Renato Ricci, non solo perché dovuti in quanto mio relatore di tesi e per avermi affiancato in questo anno di lavoro, ma anche a livello personale, per essere stato senza dubbio il miglior professore che abbia avuto nel mio percorso accademico. Posso dire che, per un ragazzo che anni fa si è iscritto alla facoltà di ingegneria meccanica per la sua passione per l'aerodinamica delle vetture da corsa, trovare un insegnante così competente, disponibile e appassionato ad insegnare la materia che l'ha guidato nella sua scelta è stata davvero una fortuna.

Ringrazio il mio correlatore il Dott. Matteo Falone, una persona non solo competente ma anche di una pazienza e di una disponibilità sconfinata. Il suo aiuto in questo anno è stato determinante per andare avanti con il mio lavoro.

Ringrazio anche gli altri collaboratori del Prof. Ricci, il Dott. Valerio D'Alessandro e il Dott. Luca Giammichele, i quali hanno contribuito alla mia formazione.

Voglio ringraziare il Polimarche Racing Team per avermi messo a disposizione i mezzi per poter compiere questo progetto e spero che il mio contributo possa servire anche a loro per poter far crescere la squadra già dall'immediato futuro.

Ringrazio Marco Mosca per avermi spiegato con grande disponibilità tutto ciò che dovevo capire per partire con questo lavoro e per avermi fornito ogni volta tutti i dati di cui avevo bisogno.

Ringrazio soprattutto Alessandro Cicchini, con il quale ho vissuto praticamente ogni giorno a stretto contatto nell'ultimo periodo. Senza il suo prezioso lavoro con cui ha contribuito ad integrare il mio, questo progetto non avrebbe potuto prendere forma. Ci siamo conosciuti come colleghi, posso dire di aver trovato un amico.

Ringrazio tutti quelli non hanno mai creduto in me. Se sono arrivato in fondo a questo percorso è stato anche grazie a voi, per dimostrarvi che avevate torto.

Ringrazio i miei amici, quelli veri. Quelli con la A maiuscola. Quelli che mi alleggeriscono i momenti duri. Quelli che si sono preoccupati quando per diversi periodi ho dovuto tralasciare le uscite e gli svaghi per concentrarmi sullo studio. Quelli che si preoccupano per me. Quelli che ci sono sempre. Quelli che mi ascoltano quando ho delle lamentele inutili e non me lo fanno pesare. Quelli che sanno anche delle enormi difficoltà che la vita mi ha posto davanti in questi anni e mi sono stati vicino, aiutandomi e supportandomi. Quelli che sono felici quando io sono felice. Quelli che mi vogliono bene. Quelli che credono in me. Sempre.

Ringrazio tutta la mia famiglia, che sono il mio punto di riferimento e le mie radici, la quale non ha mai smesso di credere in me e ha continuato a darmi sostegno anche quando vedevo tutto buio.

Ringrazio i miei genitori, non solo per aver contribuito economicamente a questo traguardo con i loro sacrifici, ma anche per aver fatto sempre in modo che in questi anni avessi quante meno preoccupazioni o pesi possibili, nonostante tutte le avversità che la vita in questi anni ha posto davanti alla nostra famiglia. Spero di avervi reso orgogliosi.

Ringrazio mio cugino Marco, che non può essere chiamato cugino. Grazie per essermi stato vicino nei momenti difficili e per avermi aiutato in questo percorso.

Ringrazio mio cognato Stefano per tutto l'aiuto che mi dà e che mi ha dato in questi anni, per la fiducia e per l'essermi stato accanto nei momenti bui.

Ringrazio mia sorella Martina, per avermi aiutato in questo percorso, per non aver mai smesso di credere in me e per esserci sempre stata. Soprattutto quando chiunque sarebbe andato via.

Ringrazio nonna Anna, nonno Eutizio e Nonno Franco, spero che da lassù mi stiano guardando felici anche loro.

Infine, voglio ringraziare me stesso, per tutti i sacrifici che ho fatto per arrivare a questo giorno, per la pazienza, la fatica, le rinunce e le notti in bianco a studiare. Ringrazio me stesso per non aver mollato, anche quando tutti gli elementi intorno a me suggerivano il contrario.