



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

L'aerodinamica di una vettura formula SAE a trazione elettrica

Aerodynamics of an electric powered formula SAE car

Relatore:

Chiar.mo Prof. Renato Ricci

Tesi di Laurea di:

Alessandro Cicchini

Correlatore:

Dott. Matteo Falone

Anno Accademico 2020/2021

Alla mia famiglia

Indice

Sommario	6
Capitolo 1	7
Cos'è la Formula SAE	7
1.1 La competizione	7
1.2 Eventi statici	9
1.2.1 Business Plan Presentation Event	9
1.2.2 Cost and Manufacturing Event	9
1.2.3 Engineering Design Event	10
1.2.4 Punteggio degli eventi statici	10
1.3 Eventi dinamici	11
1.3.1 Acceleration Event	11
1.3.2 Skidpad Event	11
1.3.3 Autocross Event	12
1.3.4 Endurance Event	12
1.3.5 Efficiency Event	13
1.3.6 Punteggi degli eventi dinamici	13
1.4 Il Polimarche Racing Team	14
Capitolo 2	17
Cenni di Aerodinamica	17
2.1 Le azioni aerodinamiche	18
2.2 I profili alari	19
2.3 Aerodinamica e vetture elettriche	23
Capitolo 3	27
Computational fluid dynamics (CFD)	27
3.1 Richiami di CFD	27
3.2 Programmi utilizzati	28
3.3 Fasi realizzazione simulazione CFD	29
3.4 Simulazioni CFD 2D	30
3.4.1 Impostazione della mesh	30
3.4.2 Impostazione condizioni al contorno e fisica del problema	32
3.5 Simulazioni CFD 3D	33
3.5.1 Dimensione del dominio	33
3.5.2 Impostazione della mesh	34

3.5.3	Impostazione condizioni al contorno e fisica del problema	35
Capitolo 4		36
Progettazione musetto, fondo e montanti per generazione Y250		36
4.1	Limiti regolamento e problemi di partenza della P4 Evoluzione	36
4.2	Musetto	37
4.2.1	Problemi di partenza della P4 Evoluzione	37
4.2.2	Progetto del nuovo musetto	38
4.3	Fondo	42
4.3.1	Introduzione del Tea-Tray	42
4.3.2	Progetto del Tea-Tray	43
4.4	Montanti per generazione vortice Y250	48
4.4.1	Introduzione vortice Y250	48
4.4.2	Progettazione dei montanti	49
Capitolo 5		50
Progettazione dell'ala anteriore		50
5.1	Regolamento e limitazioni	50
5.2	Primo modello dell'ala anteriore	53
5.3	Secondo modello (Main svergolato, flap non svergolati)	59
5.4	Terzo modello (Main svergolato, flap svergolati)	62
Capitolo 6		66
Conclusioni		66
Ringraziamenti		67
Bibliografia		69

Sommario

Questo studio ha come oggetto la progettazione delle superfici aerodinamiche della parte anteriore della futura vettura elettrica Formula SAE a trazione elettrica del Polimarche Racing Team.

Lo studio è avvenuto in collaborazione con il collega e amico Ludovico Croce, 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, la P4 Evoluzione con motore a combustione interna, e creare una nuova vettura che avesse, delle prestazioni dal punto di vista aerodinamico adatte a una monoposto a trazione elettrica.

In particolare si sono progettati i seguenti componenti:

- 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 flusso 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.
- La nuova ala anteriore concentrando sulla massimizzazione dell'efficienza piuttosto che della lift

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 troveranno nel mondo del lavoro e aumentando il suo bagaglio di conoscenze indispensabili nel mondo del lavoro. Il team stesso viene visto come una piccola azienda in un contesto di motorsport. E' compito degli studenti concepire, progettare, produrre, testare, promuovere e valutare economicamente il prototipo. La valutazione dell'operato avviene in sede di gara dove, dove il team viene valutato, tramite la vettura, in 2 macro aree 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'e-gress 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 4 le ruote

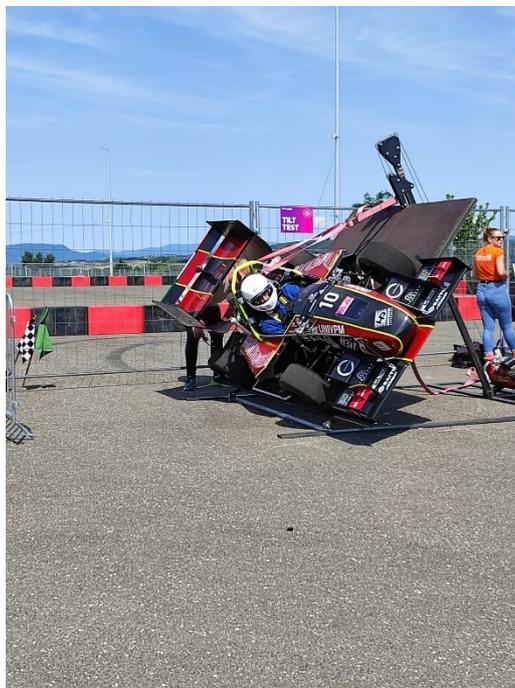


Figura 1.2 P4 Evoluzione durante il Tilt Test

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, 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:

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

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 ogni lato) indicanti i limiti della carreggiata, che è di 5 [m]. Il diametro del cerchio piccolo 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.

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

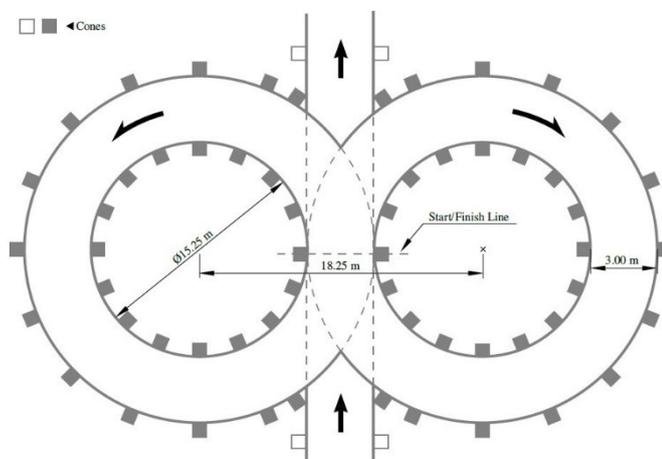


Figura 1.5 Tracciato Skid Pad

1.3.3 Autocross Event

Mantenendo lo stesso ordine di esecuzione (due piloti con due tentativi ognuno), 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.

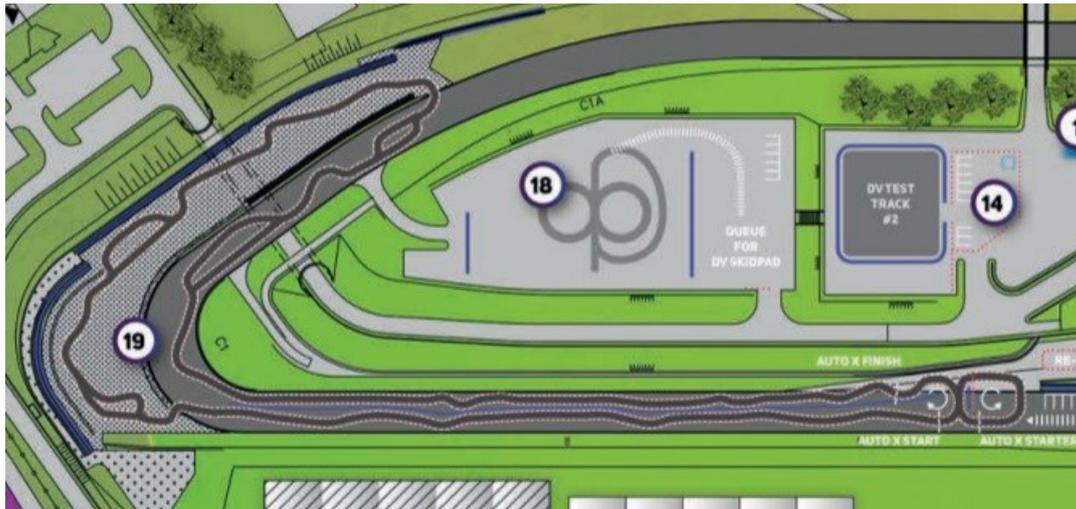


Figura 1.5 Tracciato Autocross/Endurance Formula Student East 2021

Il punteggio viene calcolato in base alla seguente formula:

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

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.

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

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.

$$EFFICIENCYFACTOR = \frac{T_{\min} \cdot V_{\min}}{T_{\text{team}} \cdot V_{\text{team}}}$$

$$EFFICIENCYSCORE = 100 \left(\frac{\frac{E_{\min}}{E_{\text{team}}} - 1}{\frac{E_{\min}}{E_{\max}} - 1} \right)$$

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 Prof. Dario Amodio ed al supporto continuo dei dipartimenti di Costruzione di Macchine, Meccanica Applicata, Energetica, Misure ed 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 della 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 1.6 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 1.7 Peacock 1



Figura 1.8 Peacock 2



Figura 1.9 Peacock 3



Figura 1.10 Peacock 3 evoluzione



Figura 1.11 Peacock 4



Figura 1.12 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.

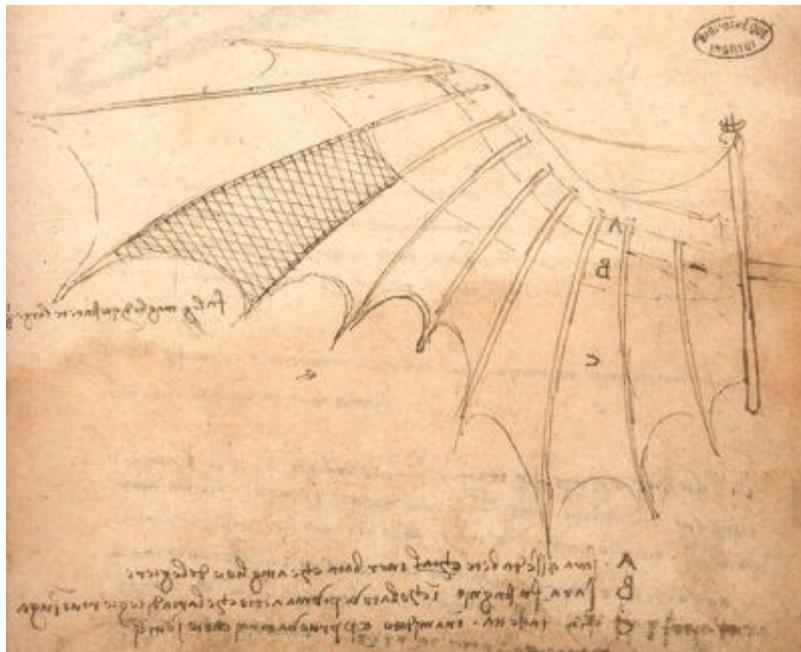


Figura 2.1 Ala della macchina volante con rivestimento pannicolato a imitazione delle ali di pipistrello

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

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 costruisco 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.

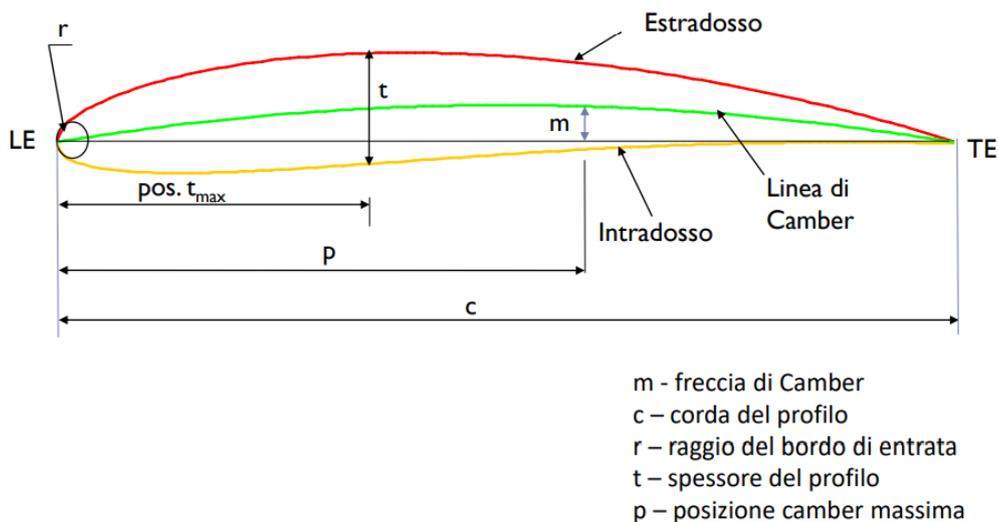


Figura 2.3 Grandezze caratteristiche di un profilo alare

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.

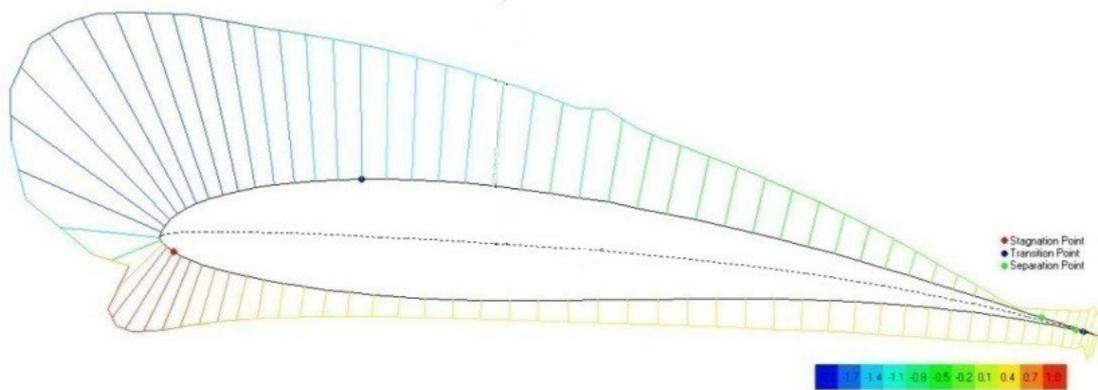


Figura 2.4 distribuzione tipica di pressione intorno ad un profilo alare

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 coincidono 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.

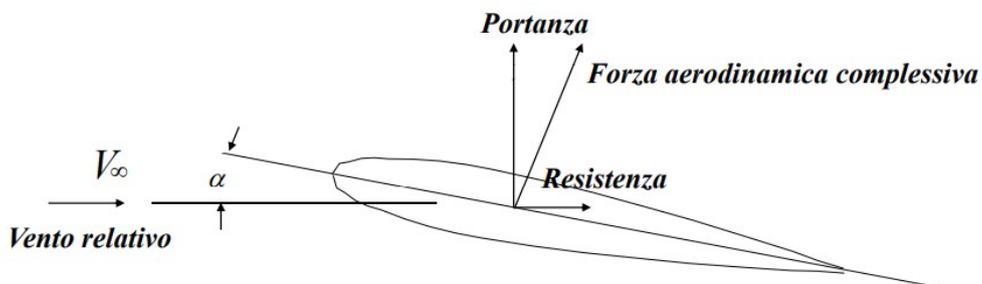


Figura 2.5 configurazione generale delle forze generate tra l'interazione tra profilo e fluido aria

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 delle forze agenti sui profili viene definito un altro parametro fondamentale: l'efficienza aerodinamica, espressa nella seguente maniera.

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

Come già sottolineato, la distribuzione di pressione (e quindi anche depressione) intorno al profilo risulta 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.

Ovviamente se $p = p_\infty$ allora avremo $c_p = 0$.

Per sapere il valore massimo del c_p dobbiamo trovare la pressione massima che si trova nel punto di ristagno. Su una stessa linea di corrente si può applicare l'equazione di Bernoulli, perciò abbiamo:

$$P + \rho(V^2/2) = \text{Costante}$$

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 il valore massimo del $c_p = 1$

La distribuzione del c_p cambia punto per punto sul profilo e ovviamente varia al modificarsi all'angolo di attacco.

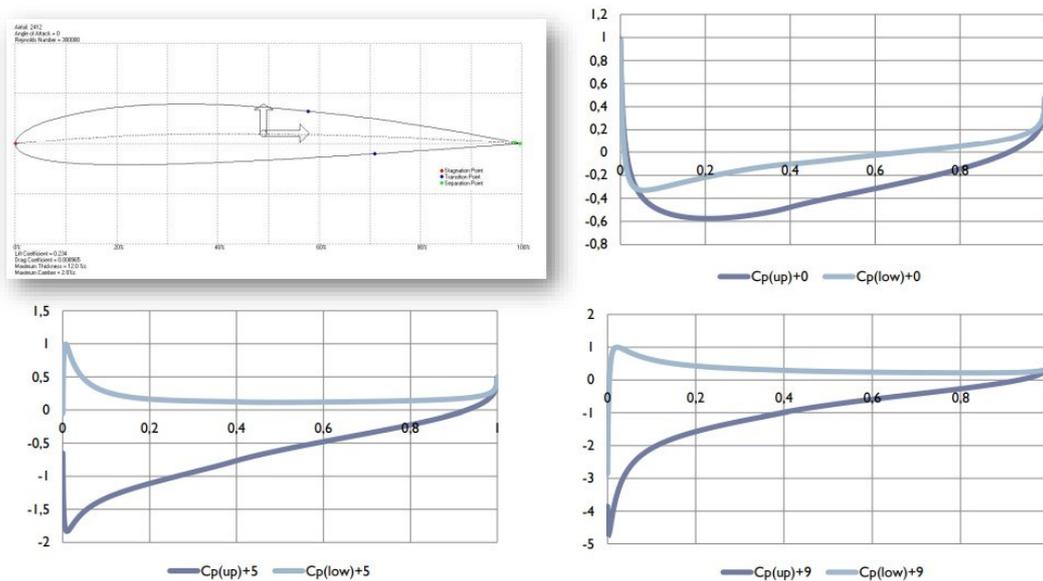


Figura 2.6 Visualizzazione dell'andamento del C_p su di un profilo a vari angoli di attacco

2.3 Aerodinamica e 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.

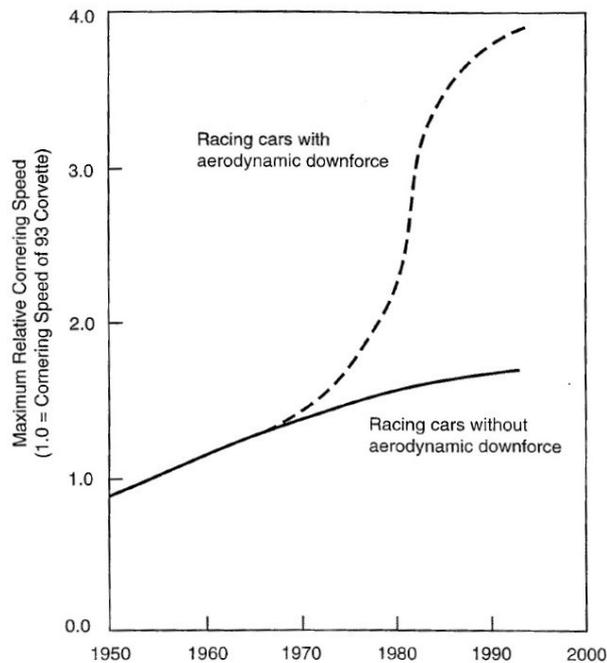


Figura 2.7 Comparazione dell'aumento delle velocità in curva tra un ipotetico scenario senza l'introduzione della downforce e dello scenario con l'introduzione della downforce

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 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, come 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 ha 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 necessario incrementare in quantità limitata la massa del combustibile nel serbatoio. Inoltre all'avanzare dei chilometri percorsi questo andrà ad esaurirsi diminuendo così il peso della vettura con conseguente aumento delle prestazioni.

Invece, 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 ulteriore 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.

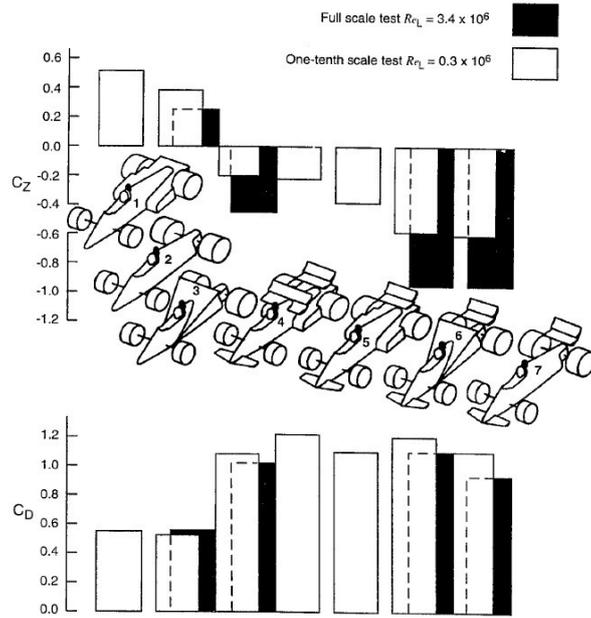


Figura 2.8 comparativa Downforce-Drag tra diverse soluzioni aerodinamiche (C_d e C_z sono rispettivamente il coefficiente di drag e il coefficiente di portanza)



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 F1 vs 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

Computational fluid dynamics (CFD)

Lo scopo di questo capitolo non è entrare approfonditamente nell'ambito del CFD ma bensì introdurre solo le basi, spiegare cos'è e in che modo è stato utile per la realizzazione dello studio.

Si illustrerà quali programmi sono stati utilizzati e l'impostazione di tutti i parametri fondamentali adottati nel corso dello studio.

3.1 Richiami di CFD

CFD (Computational Fluid Dynamics) è un insieme di metodi numerici applicati per ottenere una soluzione approssimata di problemi fluidodinamici e di trasferimento del calore. Non è quindi una scienza ma un metodo per applicare l'analisi numerica al trasferimento di massa e calore.

L'analisi, oltre alle proprietà di massa, si concentra soprattutto sulle proprietà distribuite, come i campi di Temperatura, Velocità, Densità, ecc.

Dal punto di vista fisico, le equazioni utilizzate riguardano;

- Conservazione della massa;
- Conservazione del momento (seconda legge di Newton);
- Conservazione dell'energia (prima legge della termodinamica).

Possono poi essere utilizzate altre equazioni come il trasporto dell'entropia o dei campi elettromagnetici.

L'analisi numerica non fa altro che discretizzare il problema, ossia di rimpiazzare la soluzione esatta in un insieme di equazioni approssimate valide in un dominio continuo applicate ad uno discretizzato. Perciò il volume oggetto di studio verrà discretizzato in tanti volumi finiti ad ognuno dei quali verrà applicato i metodi dell'analisi numerica.

3.2 Programmi utilizzati

Nel corso del nostro studio abbiamo utilizzato 2 programmi CFD:

- XFOIL: è un programma interattivo per la progettazione e l'analisi di profili subsonici isolati. Date le coordinate che specificano la forma di un profilo alare 2D, e i numeri di Reynolds, XFOIL può calcolare la distribuzione della pressione sul profilo alare e quindi le caratteristiche di portanza e resistenza. Il programma consente anche il design inverso: varierà la forma del profilo alare per ottenere i parametri desiderati.
- Star CCM+: è un software commerciale per la fluidodinamica computazionale di proprietà della Siemens, di largo utilizzo in molti settori dell'industria e del mondo accademico, basato sul metodo ai volumi finiti

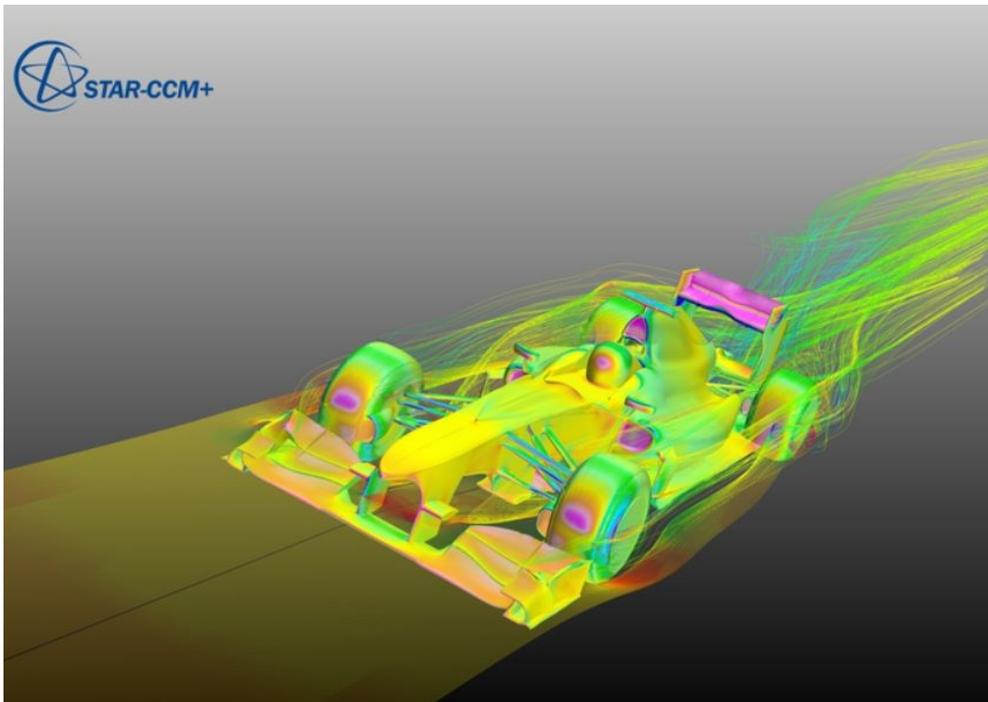


Figura 3.1 Esempio di analisi fluidodinamica effettuata con Star CCM+

3.3 Fasi realizzazione simulazione CFD

In questo paragrafo descriveremo quali sono le fasi tipiche nella realizzazione di una simulazione CFD nel caso dello studio dell'aerodinamica di una vettura.

- **Importazione della geometria e realizzazione del dominio:** attraverso appositi comandi all'interno dei software è possibile importare una geometria realizzata con programmi CAD. Successivamente si procede con la realizzazione del dominio ovvero nel volume che racchiude la geometria da studiare e che simula una vera galleria del vento.
- **Realizzazione della Mesh:** come detto in precedenza il CFD richiede la discretizzazione del volume in tanti volumi di controllo più piccoli, in questa fase si procede a realizzare questa discretizzazione. Occorre impostare diversi parametri, dalla forma dei volumi di controllo alle dimensioni nelle diverse zone dell'area di studio. In molti casi si preferisce discretizzare anche la geometria realizzando il surface wrapper, ovvero una mesh della geometria in modo tale da facilitare la divisione del volume in prossimità della geometria da studiare.
- **Impostazione della fisica e delle condizioni al contorno:** Per poter far iniziare l'iterazione dell'analisi numerica occorre prima impostare quali sono le condizioni fisiche che si hanno all'interno del nostro volume, come la tipologia di fluido, la velocità dell'aria all'ingresso e l'interazione che ogni superficie ha con il fluido. Perciò bisogna indicare per ogni superficie quale caratteristica ha e se è in moto o no.
- **Post Processing:** Infine occorre specificare quali dati si vogliono ricavare dall'analisi e come li si vuole visualizzare, ad esempio i valori di drag e di downforce di una specifica superficie, le mappe di pressione, le linee di flusso.

3.4 Simulazioni CFD 2D

Le simulazioni 2d sono state effettuate in una prima fase, quella della ricerca del profilo, con XFOIL e successivamente si è passati a Star CCM+ per lo studio del posizionamento dei flap rispetto al profilo principale (main).

3.4.1 Impostazione della mesh

Nel CFD 2D effettuato con star ccm+ si è usata una mesh poligonale perché dopo delle ricerche è emerso che la poligonale risulta la più usata nello studio dei profili 2D. Fondamentale nella realizzazione della mesh è evitare bruschi cambi di dimensione delle celle perché potrebbero causare errori numerici durante le iterazioni.

I parametri base impostati per la realizzazione della mesh sono i seguenti:

- Base Size=0.1 [m]
- Target Surface Size=0.1 [m]
- Minimum Surface Size=0.001 [m]

Sono anche stati applicati controlli specifici sulle seguenti superfici:

- In prossimità delle superfici dei profili è stato applicato un Target Surface Size di 0.005 [m], un Minimum Surface Size di 0.001 [m] e 10 Prism Layers con uno spessore totale di 0.005 [m]
- In prossimità della superficie relativa al terreno è stato applicato un Target Surface Size di 0.1 [m] un Minimum Surface Size=0.01 [m] con 6 Prism Layers e uno spessore totale di 0.016 [m]

Infine, sono stati inseriti i seguenti controlli:

- Controlli volumetrici in corrispondenza di tutti i nasi con una customize size di 0.0015 [m]
- Controllo sulla scia con una dimensione delle celle di 0.03[m]

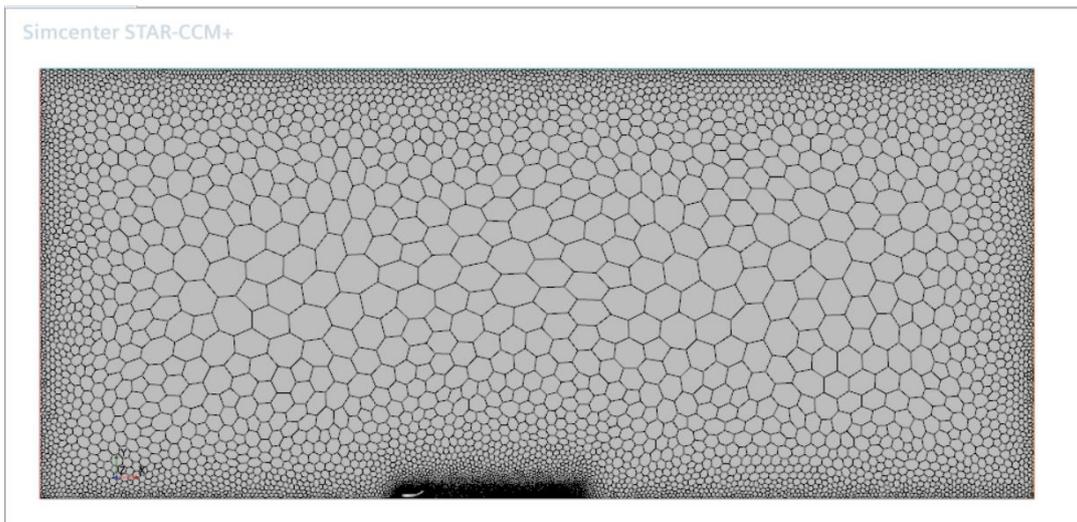


Figura 3.2 Mesh sul dominio intero per studio 2d dei profili

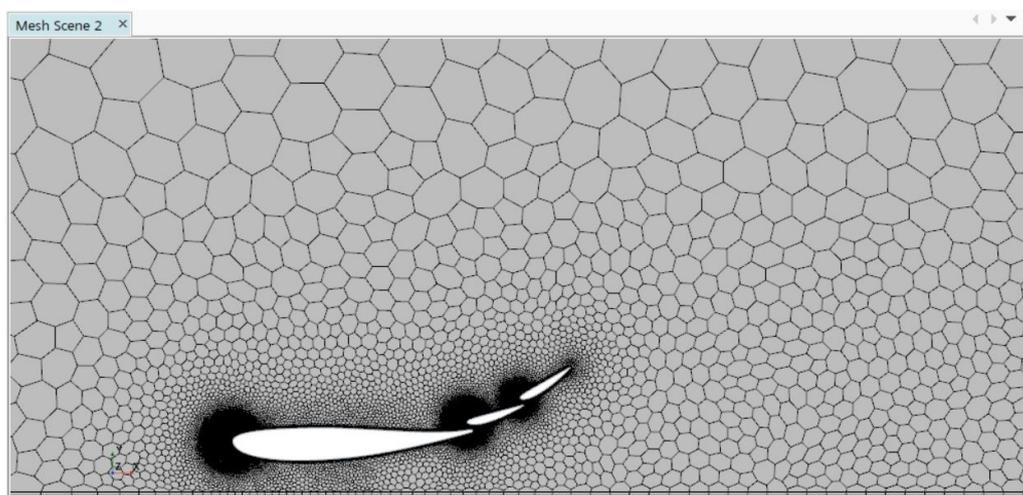


Figura 3.3 Dettaglio della mesh in prossimità dei profili

3.4.2 Impostazione condizioni al contorno e fisica del problema

Alle superfici all'interno della simulazione sono state assegnate le seguenti condizioni:

- Il terreno è stato settato come *Wall* ed è stata assegnata la velocità di 16 [m]/[s] lungo l'asse X (asse parallelo al terreno)
- Tutte le superfici oggetto di studio sono state settate come *Wall* e con velocità nulla.
- La superficie di ingresso dell'aria è stata impostata come *velocity inlet* e con una velocità iniziale dell'aria pari a 16 [m]/[s]
- La superficie di uscita è stata impostata come *pressure outlet* senza variare i valori di default

Infine, i modelli usati per la risoluzione delle equazioni sono mostrati nella foto seguente.

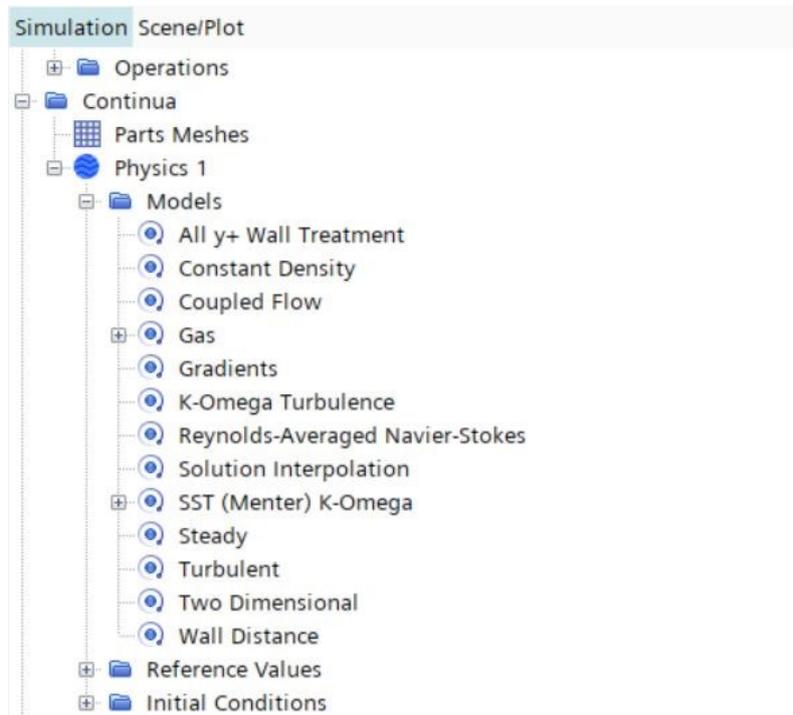


Figura 3.4 Modelli solutore usati nelle simulazioni 2d

3.5 Simulazioni CFD 3D

Per impostare tutti i parametri necessari ad ottenere un buon risultato delle simulazioni si è seguita la best practice (una guida contenente consigli pratici) fornita dalla Siemens e sviluppata appositamente per le esigenze delle squadre di Formula SAE. Tuttavia, le potenze di calcolo a disposizione per il nostro progetto non sono sufficienti per far in modo che si possano seguire tutti i consigli contenuti nella guida, perciò alcuni parametri, come le dimensioni della mesh, sono stati modificati per far in modo che la potenza di calcolo fosse sufficiente.

I valori e il modo in cui è stato impostato lo studio CFD che verranno mostrati in questo paragrafo sono comuni a tutte le simulazioni che verranno mostrate in seguito, in maniera tale da poter ottenere risultati confrontabili tra loro. I valori impostati come output per ogni simulazione variano a seconda di quale aspetto si sta studiando, tipicamente si vuole ottenere la downforce e la drag delle parti soggette allo studio più altri coefficienti adimensionali a seconda della situazione.

3.5.1 Dimensione del dominio

In tutte le simulazioni che troveremo successivamente verrà importata la geometria solo di metà vettura e il piano di simmetria verrà impostato come *Symmetry plane* all'interno del programma. Questo permette di ridurre in maniera drastica la potenza di calcolo necessaria senza andare a scapito della correttezza dei risultati.

Il dominio è stato disegnato con le dimensioni in accordo con i suggerimenti presenti nella guida.

- Symmetry boundary condition for the sides and the top surface
- Moving ground (tangential velocity) for the ground surface

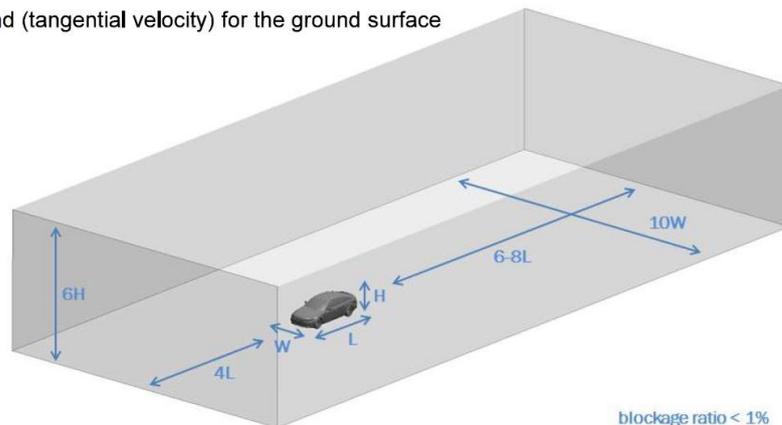


Figura 3.5 Dimensioni dominio consigliate nella guida della Siemens

3.5.2 Impostazione della mesh

I parametri base impostati per la realizzazione della mesh sono i seguenti:

- Base Size=1 [m]
- Target Surface Size=0.4 [m]
- Minimum Surface Size=0.1 [m]

Sono anche stati applicati controlli specifici sulle seguenti superfici:

- In prossimità delle superfici soggette allo studio aerodinamico è stato applicato un Target Surface Size di 0.0025 [m], un Minimum Surface Size di $4.8 \cdot 10^{-4}$ [m] e 10 Prism Layers con uno spessore totale di 0.008 [m]
- In prossimità della superficie relativa al terreno è stato applicato un Target Surface Size di 0.018 [m] un Minimum Surface Size=0.006 [m] con 6 Prism Layers e uno spessore totale di 0.018 [m]

Infine, sono stati inseriti i seguenti controlli:

- 3 Controlli volumetrici intorno alla vettura, che la racchiudevano le cui dimensioni aumentavano allontanandosi dalla vettura; perciò, il primo racchiuderà perfettamente la vettura, il secondo sarà leggermente più grande e il terzo ancora di più. Con dimensioni delle celle rispettivamente di 0.03[m], 0.1[m] e 0.28[m]
- Controllo sulla scia con una dimensione delle celle di 0.03[m]
- 1 controllo volumetrico intorno ad ogni ruota con una dimensione delle celle di 0.01[m]

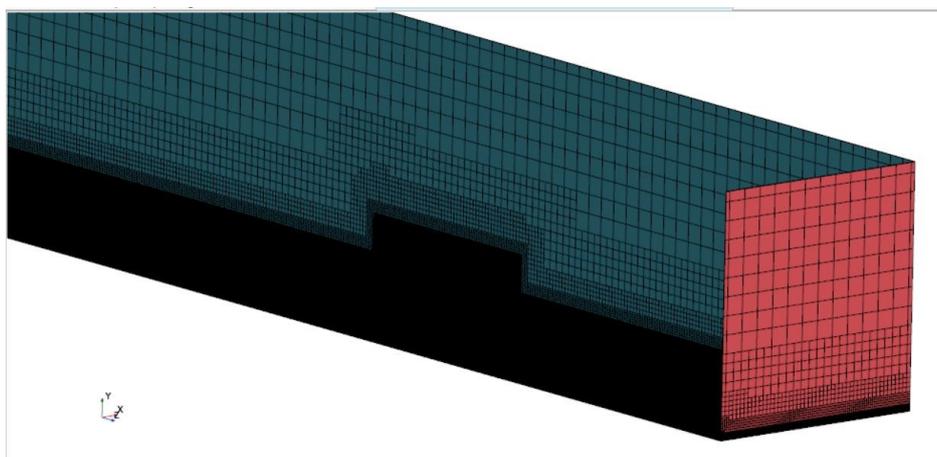


Figura 3.6 Mesh delle simulazioni 3d

3.5.3 Impostazione condizioni al contorno e fisica del problema

Alle superfici all'interno della simulazione sono state assegnate le seguenti condizioni:

- Il terreno è stato settato come *Wall* ed è stata assegnata la velocità di 16 [m]/[s] lungo l'asse X (asse parallelo al terreno)
- Tutte le superfici oggetto di studio sono state settate come *Wall* e con velocità nulla.
- La superficie di ingresso dell'aria è stata impostata come *velocity inlet* e con una velocità iniziale dell'aria pari a 16 [m]/[s]
- La superficie di uscita è stata impostata come *pressure outlet* senza variare i valori di default
- Le superfici delle ruote, dove presenti, sono state impostate come *Wall* con una velocità di rotazione di [678] rpm, velocità di rotazione corrispondente ad una velocità dell'auto di 16 [m/s]

Infine, i modelli usati per la risoluzione delle equazioni sono mostrati nella foto seguente.

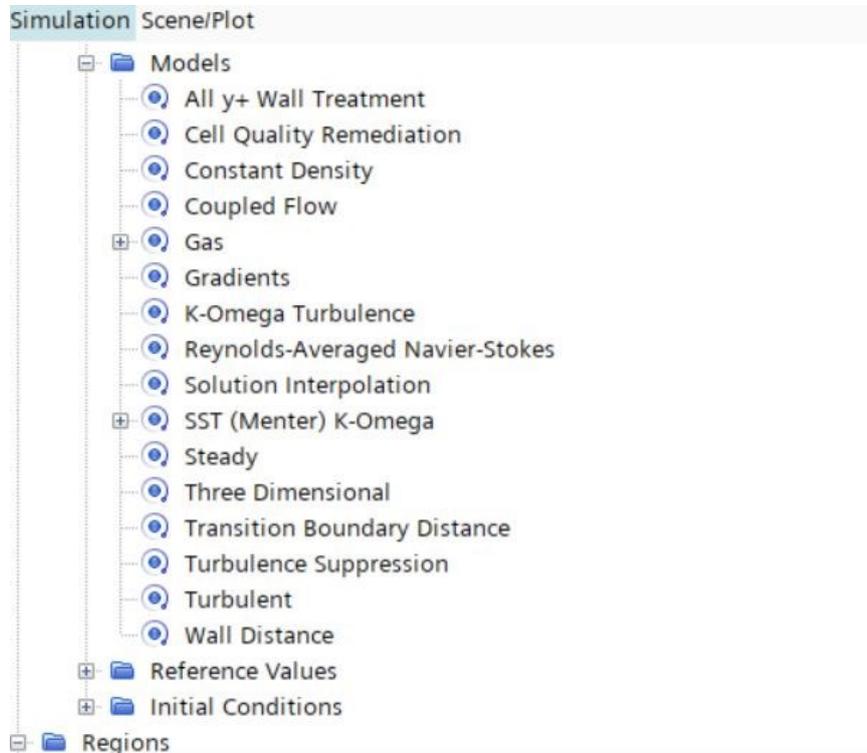


Figura 3.7 Modelli solutore usati nelle simulazioni 3d

Capitolo 4

Progettazione musetto, fondo e montanti per generazione Y250

Lo studio è iniziato affrontando la progettazione delle parti frontali della vettura, in particolare del musetto, della parte iniziale del fondo e dei montanti per la generazione del vortice Y250, parti di fondamentale importanza per la riuscita della progettazione aerodinamica della vettura.

4.1 Limiti regolamento e problemi di partenza della P4 Evoluzione

La progettazione è iniziata studiando attentamente le restrizioni imposte dal regolamento tecnico della Formula SAE, in particolare per le superfici aerodinamiche e per la scocca.

Le limitazioni fondamentali per il proseguo dello studio del musetto e del fondo sono le seguenti:

- Le superfici della parte anteriore della “carrozzeria” devono avere un raggio di raccordo minimo di 38 gradi e non scendere al di sotto dei 45 gradi di apertura
- Permettere il passaggio all’interno dell’abitacolo di una *dima*; Cioè un elemento solitamente in legno di cui ci si serve per determinare le dimensioni minime dello stesso
- Ogni parte della vettura, escluse le ruote, deve avere una distanza minima dal terreno di 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.

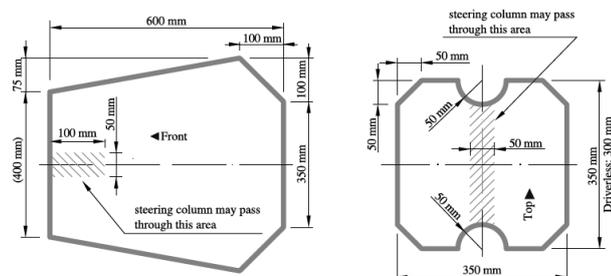


Figure 11: Cockpit opening template (left) and cockpit internal cross section template (right)

Figura 4.1 Estratto del regolamento tecnico sulla *dima* (template)

4.2 Musetto

Il musetto è la prima superficie della vettura che incontra il flusso d'aria e ha un ruolo fondamentale sia per lo sviluppo della downforce e riduzione del drag che per l'influenza che esso stesso esercita sul flusso d'aria diretto verso le altre componenti. Un buono studio del musetto consente di avere una scocca che non generi portanza e al tempo stesso consenta alle altre componenti aerodinamiche di lavorare con un flusso che non sia troppo disturbato e giunga con una direzione corretta.

4.2.1 Problemi di partenza della P4 Evoluzione

Nel modello di vettura precedente parte del lavoro svolto dalle componenti aerodinamiche andava perso a causa di un mancato studio, dal punto di vista aerodinamico, del musetto e di tutto il monoscocca, che risultavano portanti.

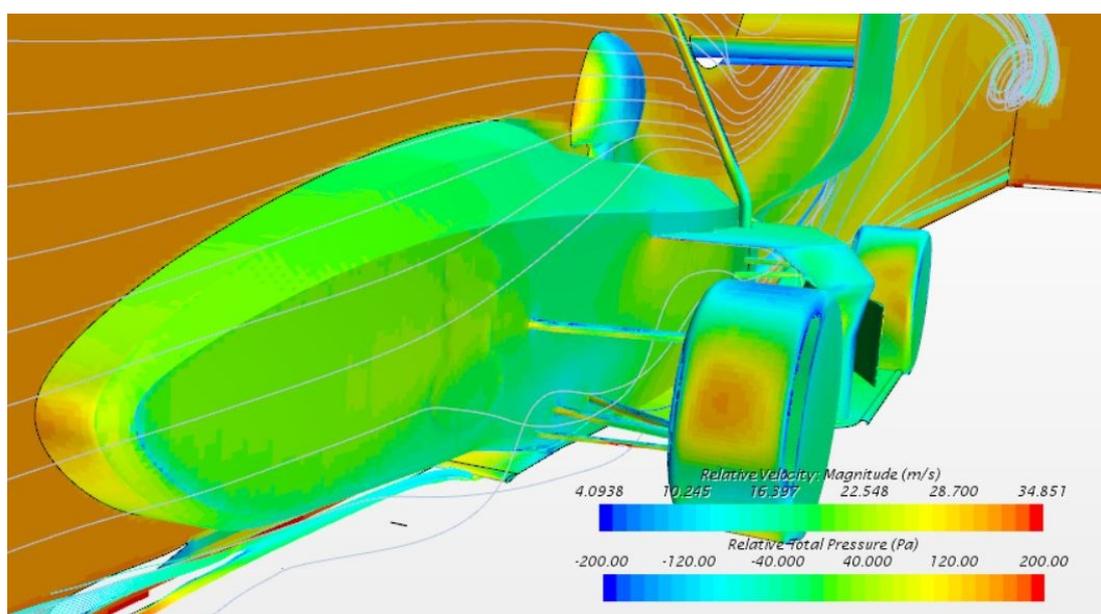


Figura 4.2 Distribuzione della pressione sulla scocca nel CFD della P4 Evoluzione

Come possiamo vedere dalla figura nella parte inferiore del muso si crea una zona di sovrappressione, responsabile, in parte, della generazione della portanza.

Inoltre, il muso della vettura risultava molto basso e non garantiva un sufficiente flusso di aria verso il fondo.

Lo scopo principale della prima parte di studio è stata quindi quella di realizzare una parte frontale della vettura che non risulti portante e consenta di inviare più flusso di aria possibile verso il fondo allo scopo di generare una zona di depressione grazie all'effetto suolo.

4.2.2 Progetto del nuovo musetto

Per partire con lo studio si sono esaminate le soluzioni adottate da altri team di formula SAE per capire come hanno impostato il progetto.

Si è notato che molte squadre di punta della Formula SAE scelgono di avere un muso molto alto, cercando così di indirizzare più aria possibile verso il fondo e sagomando quest'ultimo in maniera tale da creare più depressione possibile sia all'ingresso che all'uscita.

Per garantire un muso sufficientemente alto ma che al tempo stesso non diventi portante sono state fatte da subito alcune considerazioni. Il punto di ristagno deve trovarsi in una parte sufficientemente alta del muso in maniera tale da evitare che si crei una zona di sovrappressione sotto, inoltre nella parte sottostante del musetto si deve avere un brusco cambio di curvatura in maniera tale da costringere il flusso ad accelerare con conseguente creazione di una zona di depressione.

Tenendo conto di tutte queste considerazioni si è proceduto con il disegno CAD e una prima simulazione CFD del primo modello del musetto. Per replicare la configurazione reale della vettura si è inserito un primo modello di monoscocca, molto semplice, al solo scopo di avere gli effetti aerodinamici dati dalla sua presenza.

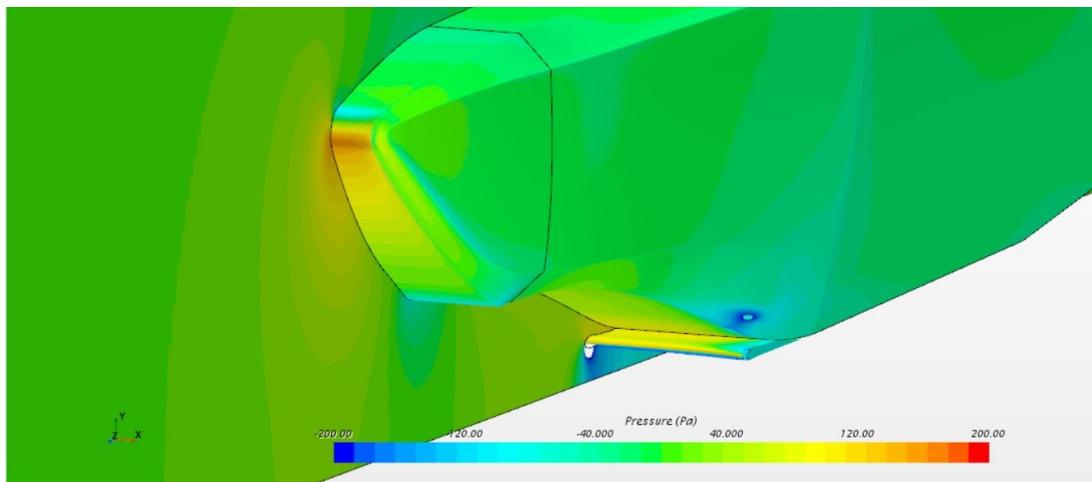


Figura 4.3 Distribuzione della pressione sul primo modello del musetto nel CFD vista dall'alto

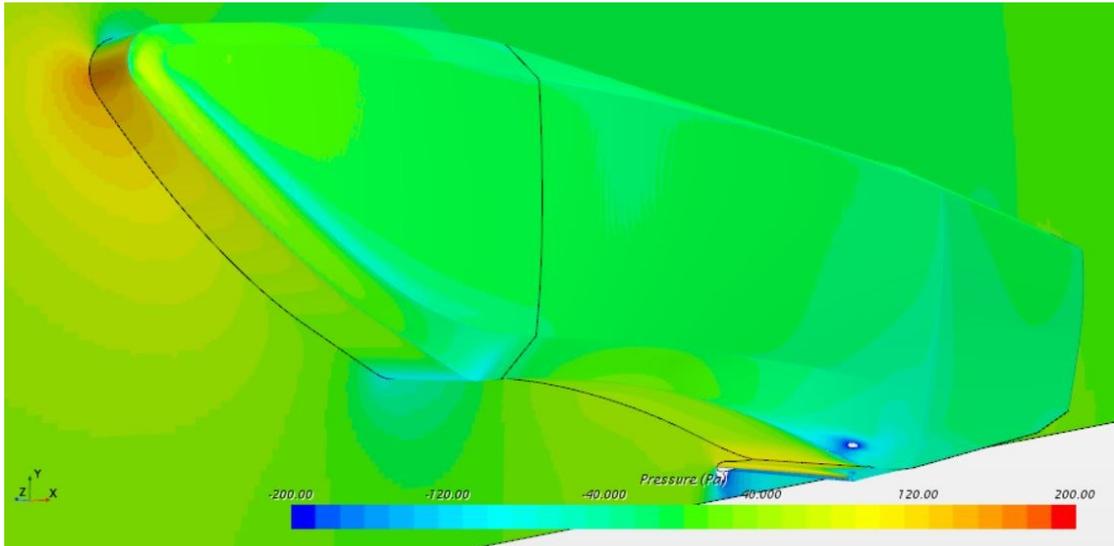


Figura 4.4 Distribuzione della pressione sul primo modello del musetto nel CFD vista dal basso

Come possiamo vedere già i primi risultati erano abbastanza soddisfacenti, il repentino cambio di curvatura crea una zona di depressione nella parte inferiore. Tuttavia, il punto di ristagno non era sufficientemente in alto, questo creava un'ampia zona di sovrappressione nella porzione inferiore e una zona di depressione nella zona superiore.

Si è quindi proceduto ripetendo la stessa procedura di prima, si è modificato leggermente il disegno CAD del muso, cercando di abbassare il punto di ristagno, e si è ripetuta la simulazione CFD, in questo caso però si è aggiunto un primo modello di ala, molto semplice, con un profilo biconvesso simmetrico, al solo scopo di valutare l'interazione tra l'ala e le altre componenti oggetto di studio.

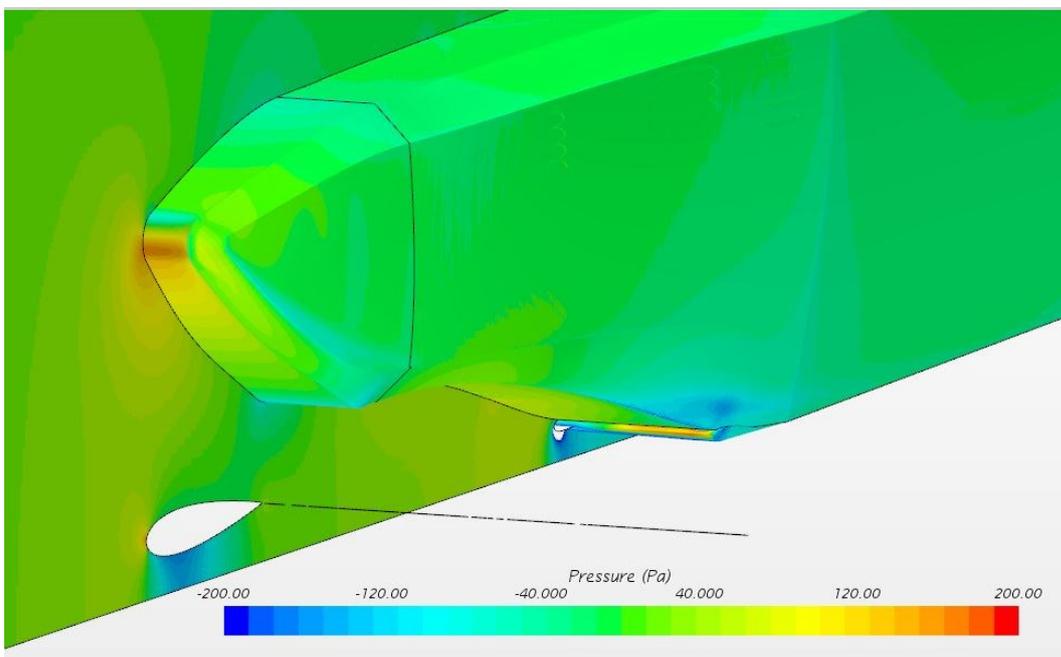


Figura 4.5 Distribuzione della pressione sul secondo modello del musetto nel CFD vista dall'alto

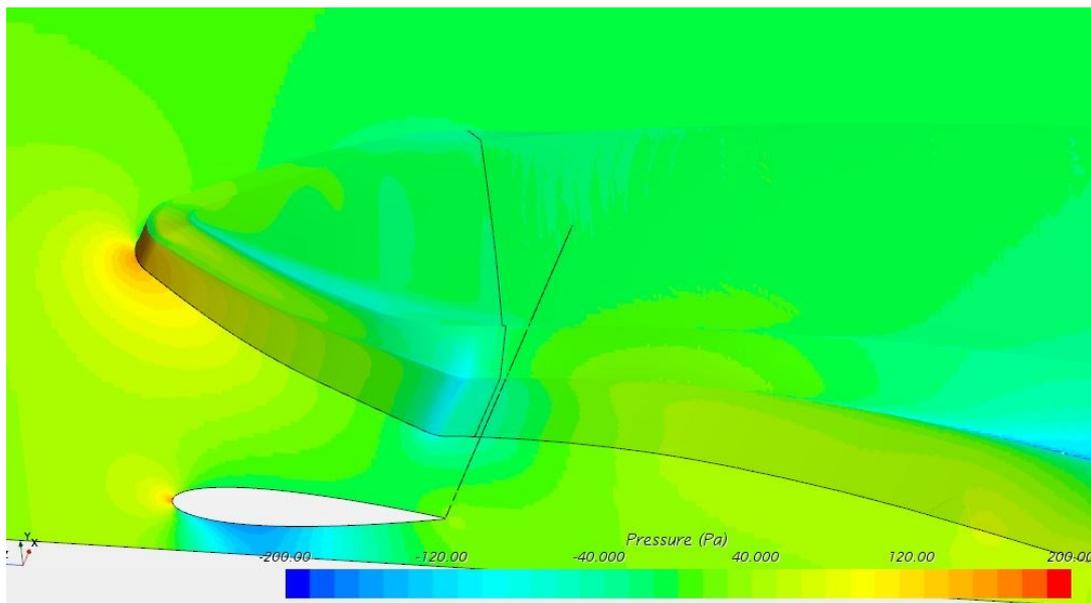


Figura 4.6 Distribuzione della pressione sul secondo modello del musetto nel CFD vista dal basso

Come possiamo vedere la situazione è migliorata, il punto di ristagno si è alzato e la sovrappressione sotto è diminuita. Si è quindi deciso di procedere su questa strada inclinando la parte superiore del muso in maniera quasi speculare alla parte inferiore al fine di ottenere una forma più affusolata per cercare di eliminare la zona di depressione nella zona superiore.

Da notare che in queste immagini l'ala è stata nascosta per far apprezzare maggiormente le mappe delle pressioni sul musetto, la zona bianca che vediamo è solo l'impronta dell'ala sul piano di simmetria.

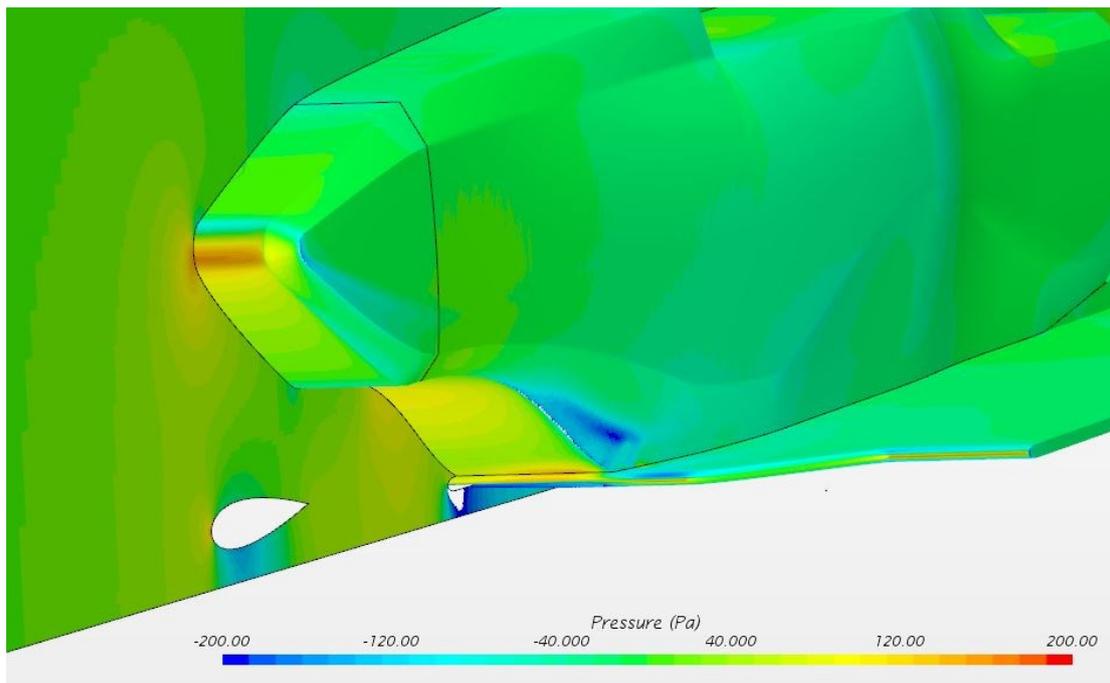


Figura 4.7 Distribuzione della pressione sul modello finale del musetto nel CFD vista dall'alto

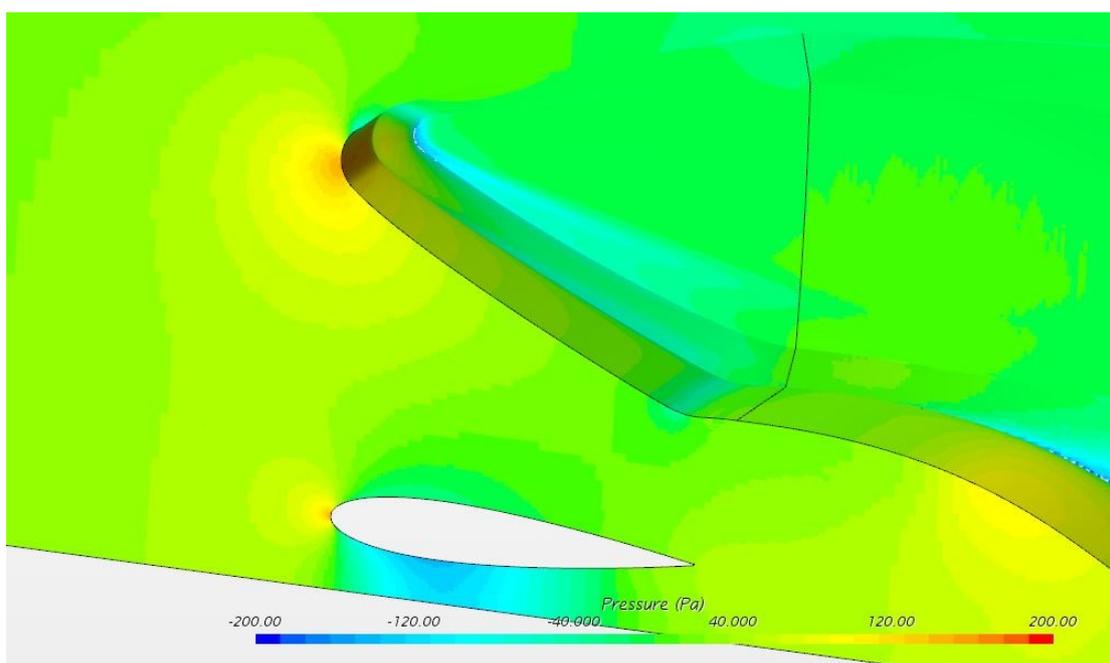


Figura 4.8 Distribuzione della pressione sul modello finale del musetto nel CFD vista dal basso

Le immagini sovrastanti mostrano la distribuzione di pressione nel modello finale del musetto. La posizione del punto di ristagno è soddisfacente così come le pressioni nella parte inferiore e superiore del muso.

Il muso risulta avere una lift di 4 [N] con lo stesso valore di drag, si può quindi concludere dicendo che è stata raggiunta una configurazione sostanzialmente neutra dal punto di vista della portanza e l'obiettivo dello studio è stato raggiunto.

4.3 Fondo

Lo studio del fondo si è focalizzato sulla parte anteriore. Per sfruttare tutto il flusso d'aria in arrivo dalla parte frontale della vettura, grazie alla decisione discussa precedentemente sull'adozione del muso alto, si è deciso di ricorrere al Tea-Tray, soluzione già adottata con successo sulla P4 Evoluzione.

4.3.1 Introduzione del Tea-Tray

Il Tea-Tray è una porzione di fondo che fuoriesce dalla parte anteriore del monoscocca. Nel dettaglio questo componente altro non è che una lastra piana con all'estremità un profilo biconvesso simmetrico. Il compito del Tea-Tray è creare una zona di ristagno tra il monoscocca ed esso stesso. In questo modo l'aria in arrivo è costretta a curvare velocemente in prossimità della sua estremità, dove si trova il profilo biconvesso, generando così una zona di depressione.

Lo studio di questo componente deve avvenire in maniera accurata perché una errata progettazione rischia di creare una zona di sovrappressione tra Tea-Tray e scocca, rendendo quest'ultima portante.

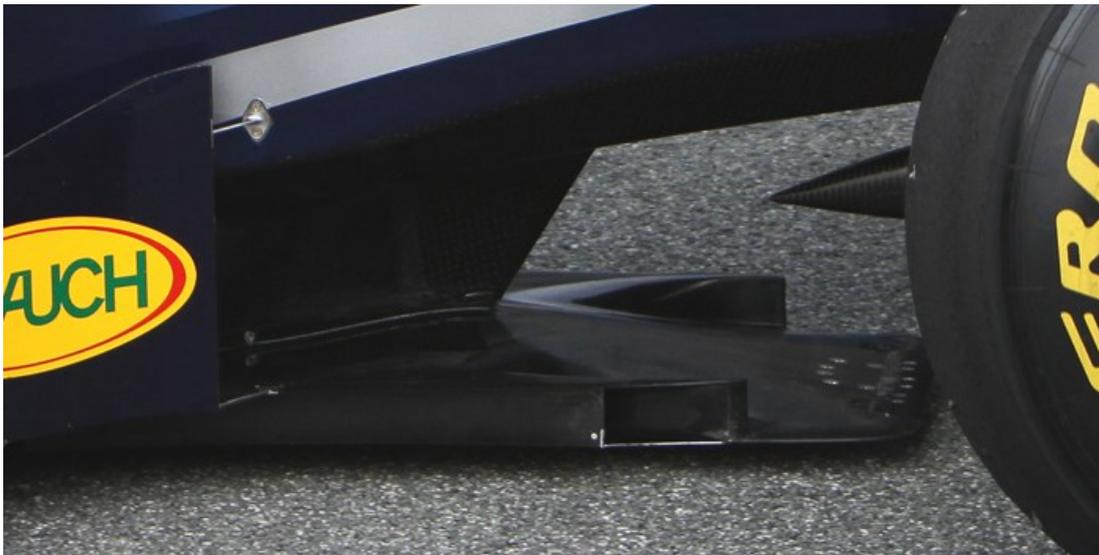


Figura 4.9 Dettaglio del Tea Tray su una vettura di F1

4.3.2 Progetto del Tea-Tray

Lo studio del Tea-Tray è stato condotto in parallelo allo sviluppo del muso, infatti, l'interazione tra questi due componenti risulta fondamentale.

Come primo modello è stato replicato quello già presente sulla P4 Evoluzione per avere un punto di partenza già funzionante e valutare l'interazione con la nuova configurazione.

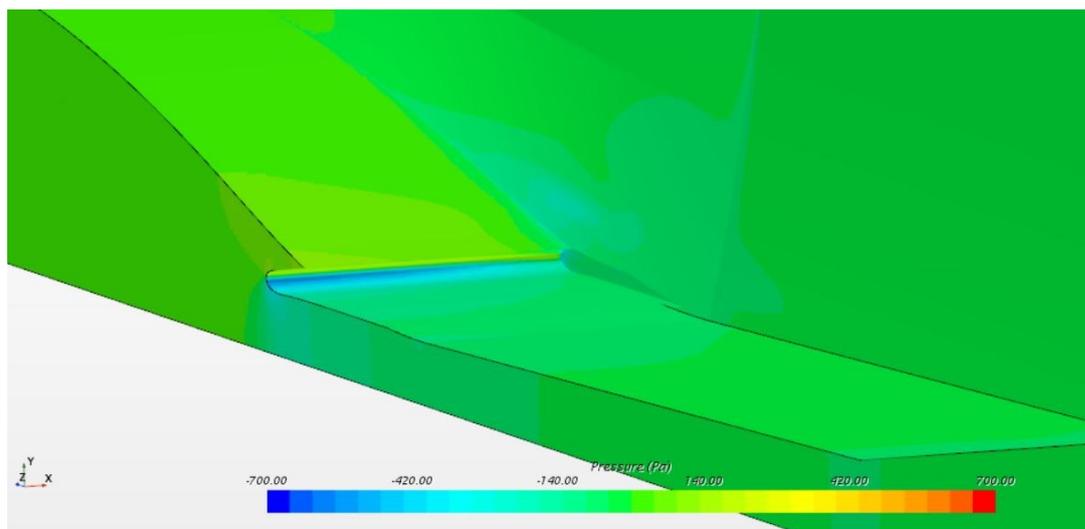


Figura 4.10 Distribuzione della pressione sul primo modello di Tea Tray nel CFD vista dal basso

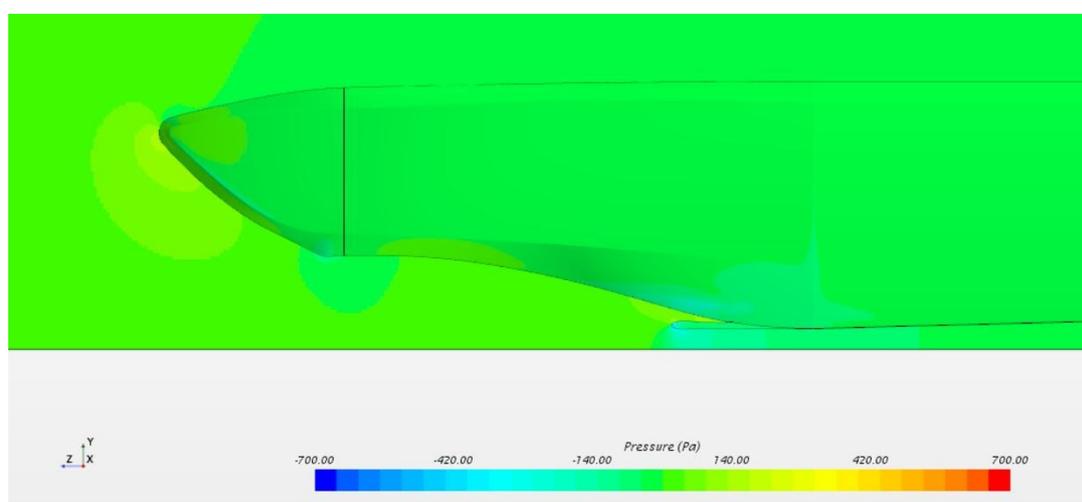


Figura 4.11 Distribuzione della pressione sul primo modello di Tea Tray nel CFD vista laterale

Come si può notare dalle precedenti immagini già il primo modello generava una buona zona di depressione ma, com'era prevedibile, anche una zona non indifferente di sovrappressione sulla scocca. Da qui si è deciso di procedere aggiungendo un primo modello semplificato di ala anteriore, parallelamente a quello che era stato fatto per il muso, ed accorciare il Tea-Tray provando a generare una zona di depressione senza la conseguente zona di sovrappressione.

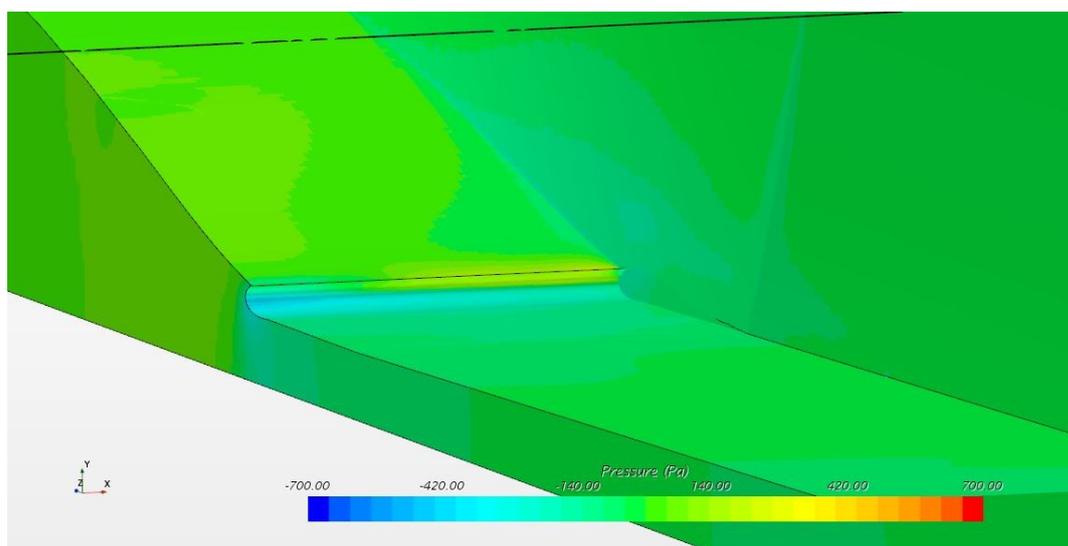


Figura 4.12 Distribuzione della pressione sul secondo modello di Tea Tray nel CFD vista dal basso

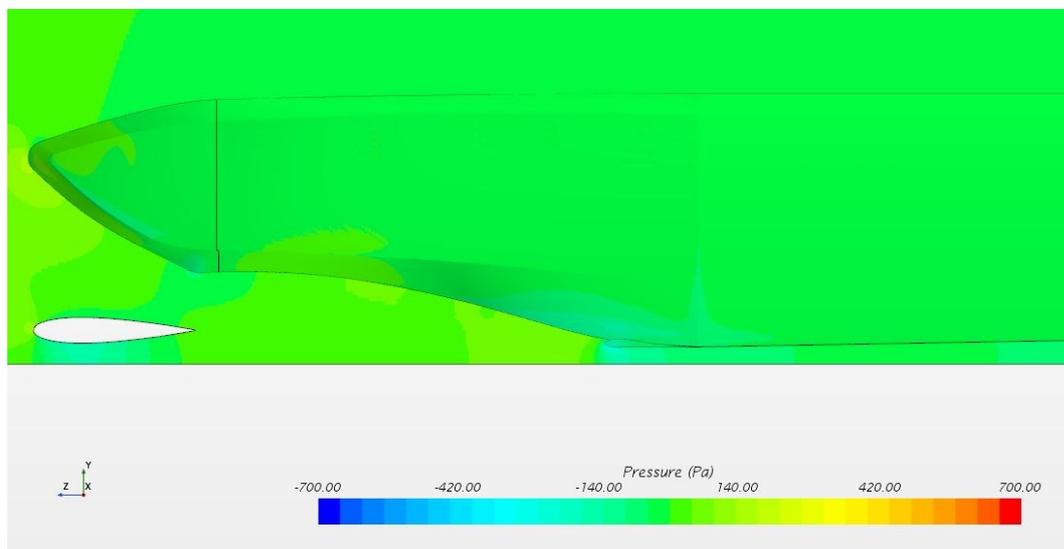


Figura 4.13 Distribuzione della pressione sul secondo modello di Tea Tray nel CFD vista laterale

Grazie a questa soluzione la parte in sovrappressione si è ridotta notevolmente. A questo punto si è deciso di procedere allo step successivo, aggiungere una prima versione di fondo laterale, molto semplificata, fino a dove concesso dal regolamento e anche qui provare due versioni di Tea-Tray diverse, un versione lunga e una versione corta.

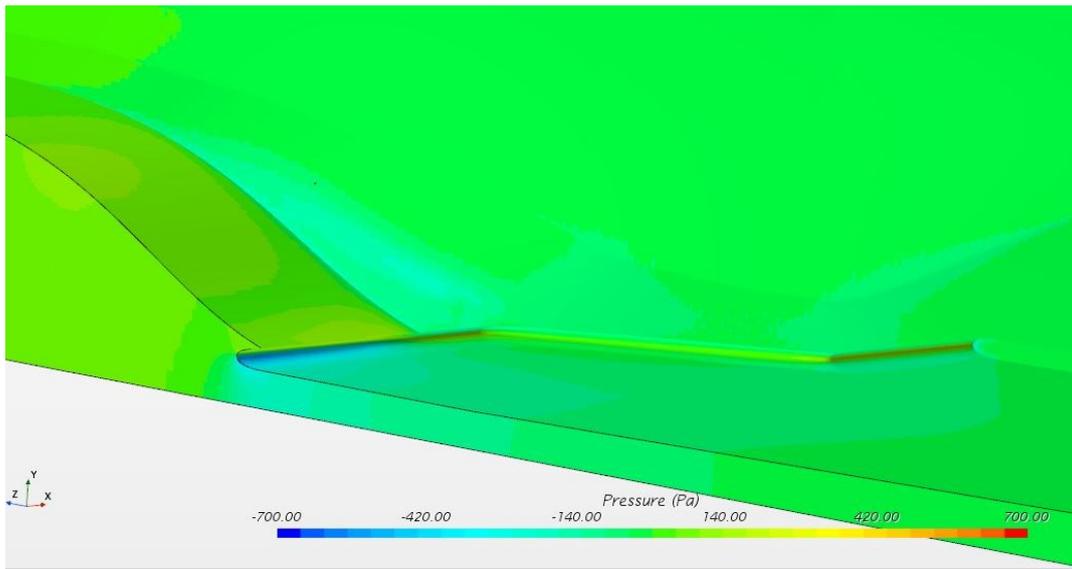


Figura 4.14 Distribuzione della pressione sul modello finale di Tea Tray corto nel CFD vista dal basso

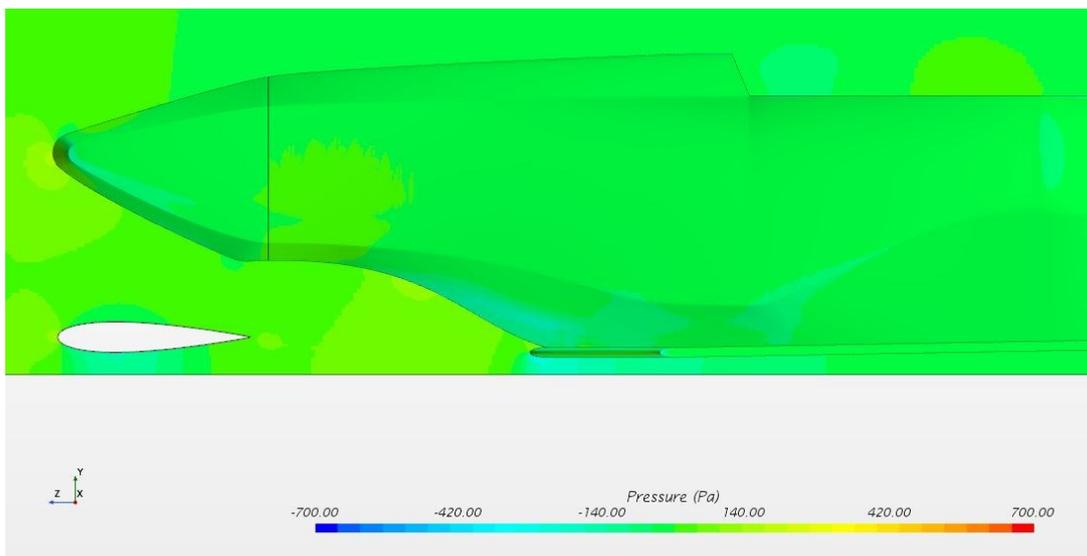


Figura 4.15 Distribuzione della pressione sul modello finale di Tea Tray corto nel CFD vista laterale

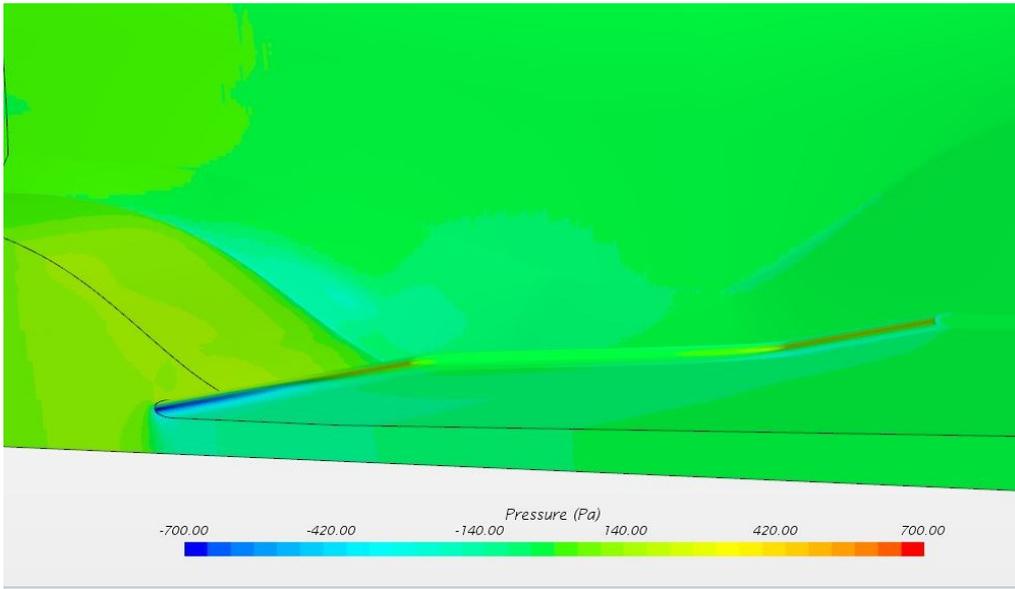


Figura 4.16 Distribuzione della pressione sul modello finale di Tea Tray lungo nel CFD vista dal basso

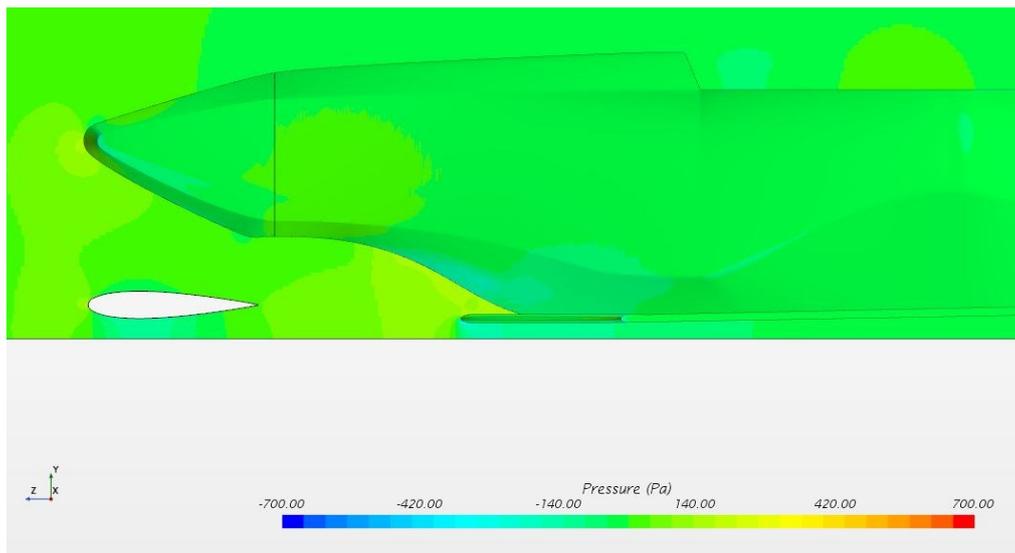


Figura 4.17 Distribuzione della pressione sul modello finale di Tea Tray lungo nel CFD vista laterale

Come prevedibile, in entrambi i casi, la depressione è aumentata notevolmente, infatti aumentando la superficie del fondo l'aria che è costretta a passare al di sotto della vettura aumenta in modo sostanziale e, a maggiore portata d'aria che accelera, corrisponde una generazione di depressione maggiore.

Nel caso del Tea-Tray lungo il picco di depressione è leggermente maggiore ma la zona di sovrappressione sul monoscocca vanifica il vantaggio creato. Per questo motivo si è deciso di optare per la soluzione con il Tea-Tray corto.

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.

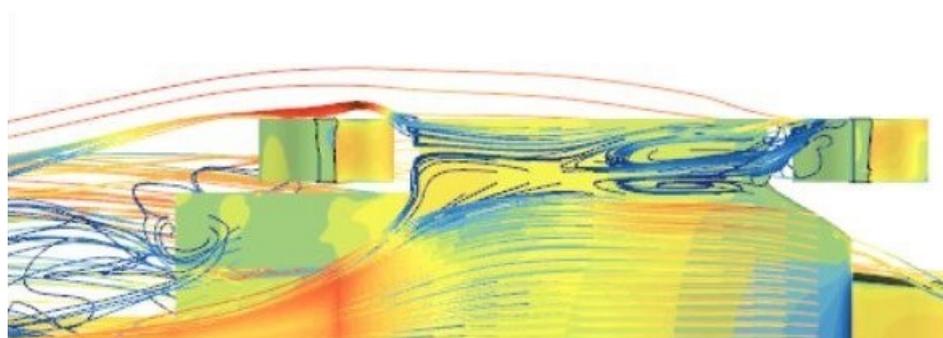


Figura 4.18 Mappa delle pressioni e linee di corrente sul fondo da una vista dal basso del CFD della vettura

Come si può notare anche il confinamento del flusso sul fondo, nonostante non fosse un obiettivo dello studio, è 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 soddisfacente in questa fase.

4.4 Montanti per generazione vortice Y250

4.4.1 Introduzione vortice Y250

Le moderne vetture da competizione utilizzano largamente i vortici generati da apposite appendici aerodinamiche per diversi scopi. Il principale è sicuramente quello di confinare il flusso in precise zone della vettura. Tra i vortici uno dei più diffusi e utilizzati è l'Y250, il nome stesso dice già molto su cosa sia e dove si trovi. Questo vortice è chiamato così perché, tipicamente, viene generato dai montanti dell'ala anteriore e in una precisa zona della vettura, esattamente ad una distanza di 250mm dal piano di simmetria trasversale.

Lo scopo di tale vortice è quello di confinare il flusso disturbato dalle ruote lontano dalla scocca della vettura, per evitare che abbia una cattiva influenza su di essa e sulle altre componenti aerodinamiche situate nella zona posteriore.



Figura 4.19 Vortice Y250 sulle vetture di F1

4.4.2 Progettazione dei montanti

Dopo una ricerca bibliografica 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. Per aumentare l'intensità di tale vortice si è deciso 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.

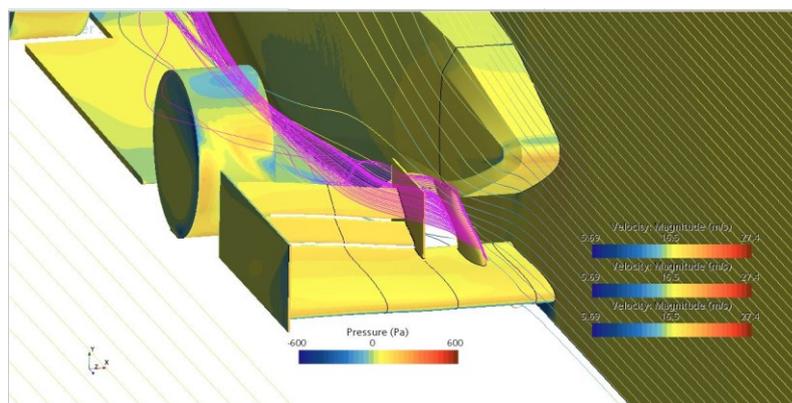


Figura 4.20 Vortice Y250 (in viola) generato del Pilone dell'ala anteriore

Come si può notare 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 pilone per ottenere un vortice che soddisfa le necessità del caso.

Capitolo 5

Progettazione dell'ala anteriore

Come detto nei capitoli introduttivi, nella progettazione delle auto elettriche è fondamentale massimizzare l'efficienza, perciò, l'obiettivo di questo studio è quello di ottenere valori di downforce simili a quelli presenti sull'ala anteriore della P4 evoluzione ma con livelli di drag inferiore.

Lo studio preliminare riguardante la ricerca dei profili migliori, dei parametri fondamentali come lunghezza della corda, angolo di attacco, posizione relativa tra flap e profilo principale, è stato svolto dal mio collega e amico Ludovico Croce. Questa prima parte è stata svolta attraverso simulazioni fluidodinamiche 2D

In questo capitolo si illustrerà il lavoro di ottimizzazione dell'ala svolto attraverso simulazioni 3D.

5.1 Regolamento e limitazioni

Come in ogni 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 si citeranno per ogni tipo di implementazione fatta quelle che erano le limitazioni precedenti che esigeva il regolamento.

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.

T 2 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.

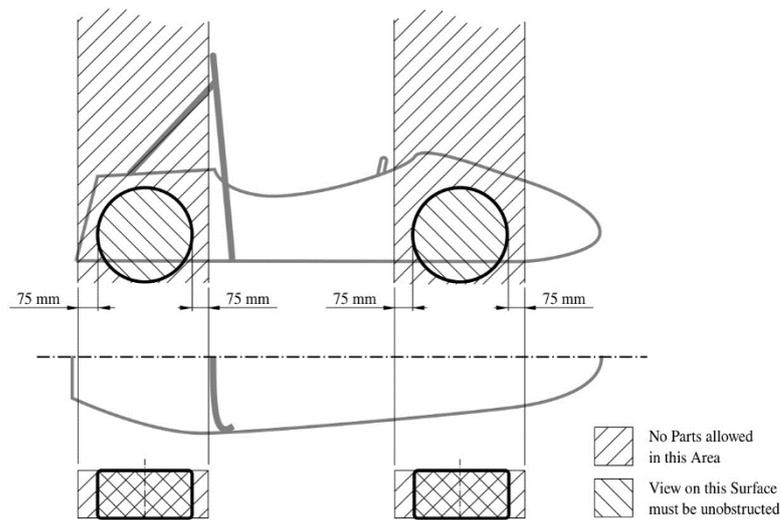


Figure 3: Keep-out-zones for the definition of an open-wheeled vehicle.

Figura 5.1 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.

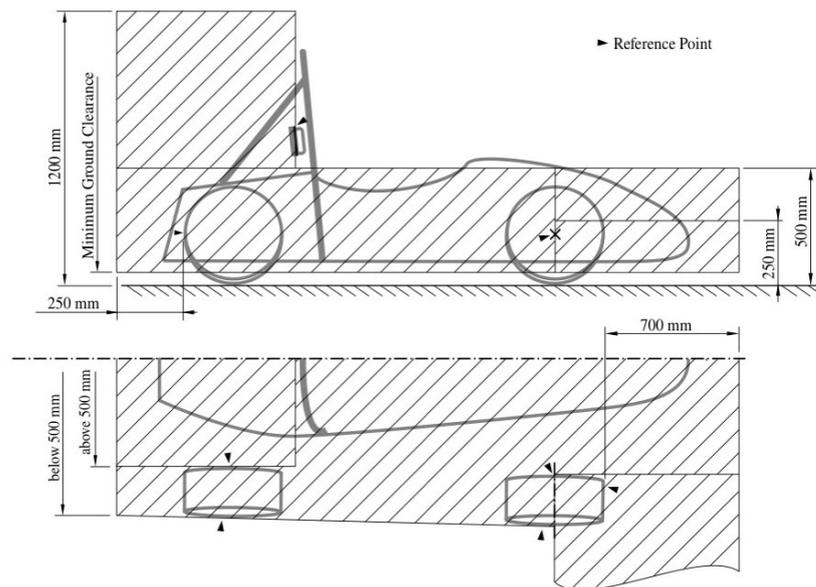


Figure 15: Maximum dimensions and positioning of aerodynamic devices. The positioning space is further restricted, see T2.1.

Figura 5.2 secondo estratto di regolamento

5.2 Primo modello dell'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.

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 di 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.

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

Si sottolinea, come si può 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+

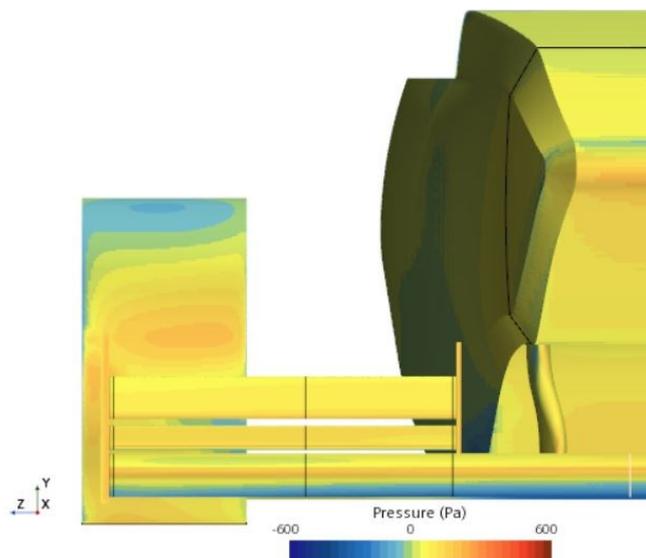


Figura 5.3 visualizzazione frontale delle pressioni della prima versione del modello 3D dell'ala

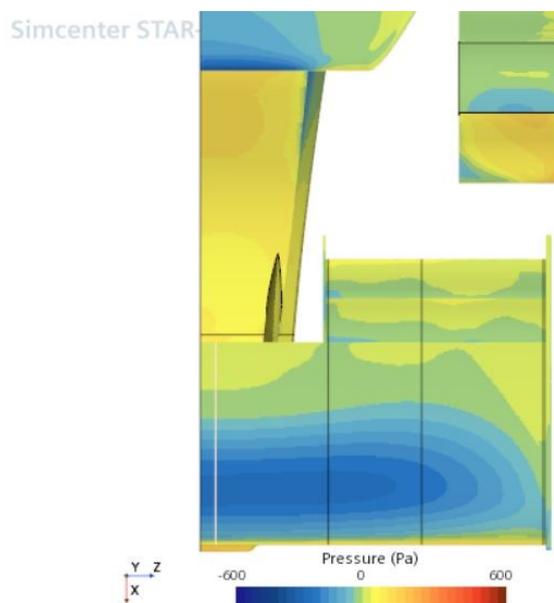


Figura 5.4 visualizzazione da sotto delle pressioni della prima versione del modello 3D dell'ala

La simulazione ha dato come risultati: 98 [N] di Lift e 12 [N] di drag con un'efficienza di 8,2

Come possiamo osservare dalle figure 5.3 e 5.4, 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.

Questo drastico abbassamento delle prestazioni si è intuito già da subito 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 lunghezza dell'apertura dell'ala al fine 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.

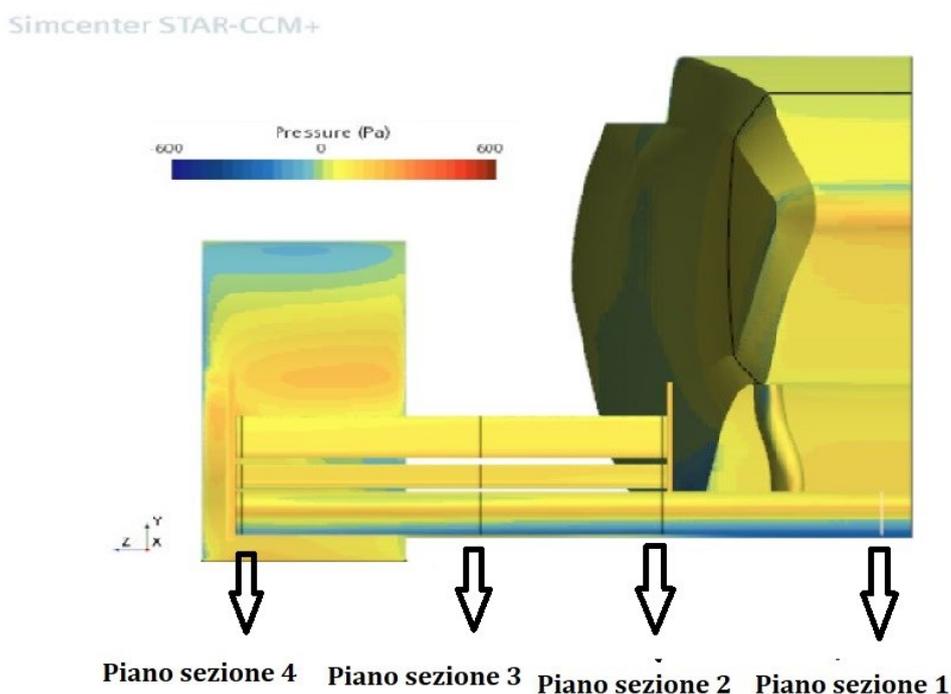


Figura 5.5 visualizzazione della collocazione dei piani presi in studio per il confronto dei c_p

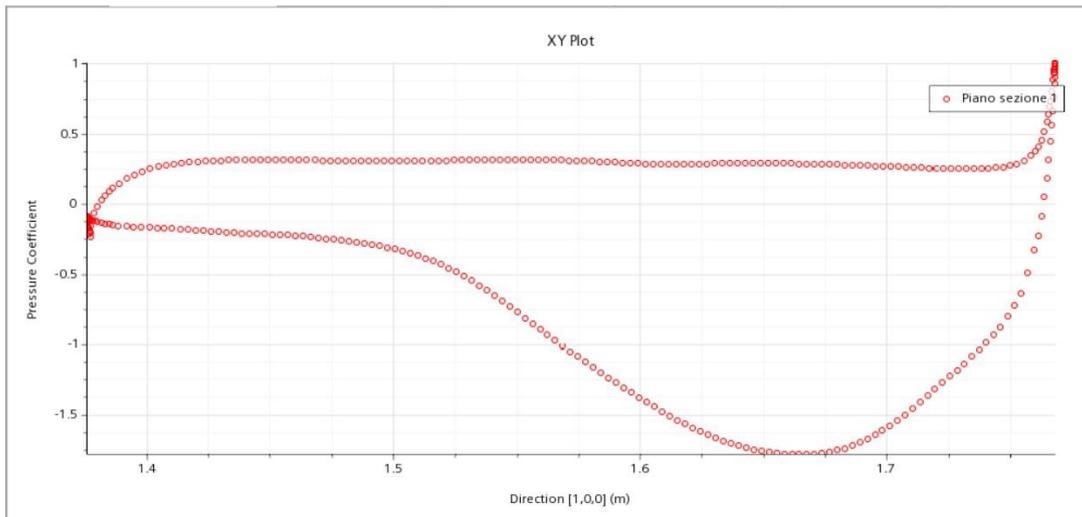


Figura 5.6 grafico del c_p della sezione 1 del modello 1

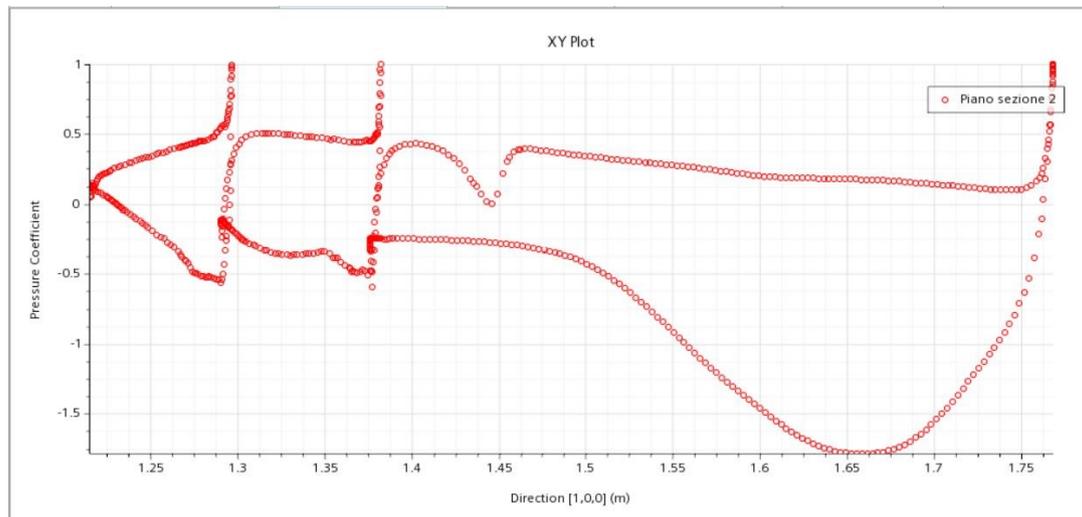


Figura 5.7 grafico del c_p della sezione 2 del modello 1

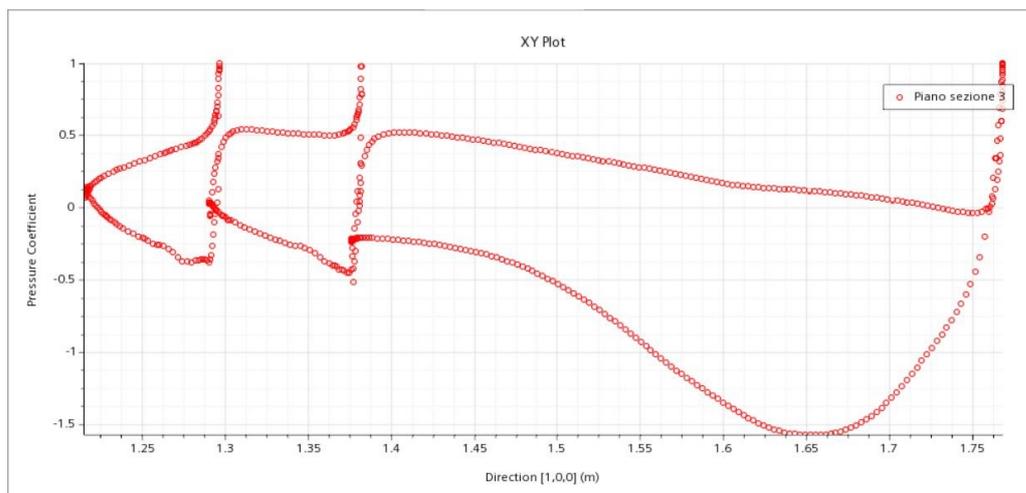


Figura 5.8 grafico del c_p della sezione 3 del modello 1

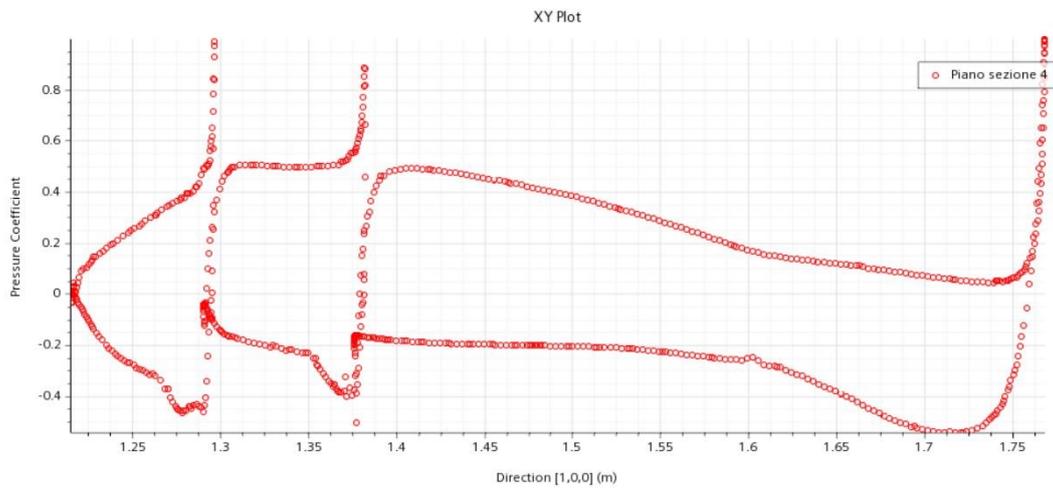


Figura 5.9 grafico del c_p della sezione 4 del modello 1

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.

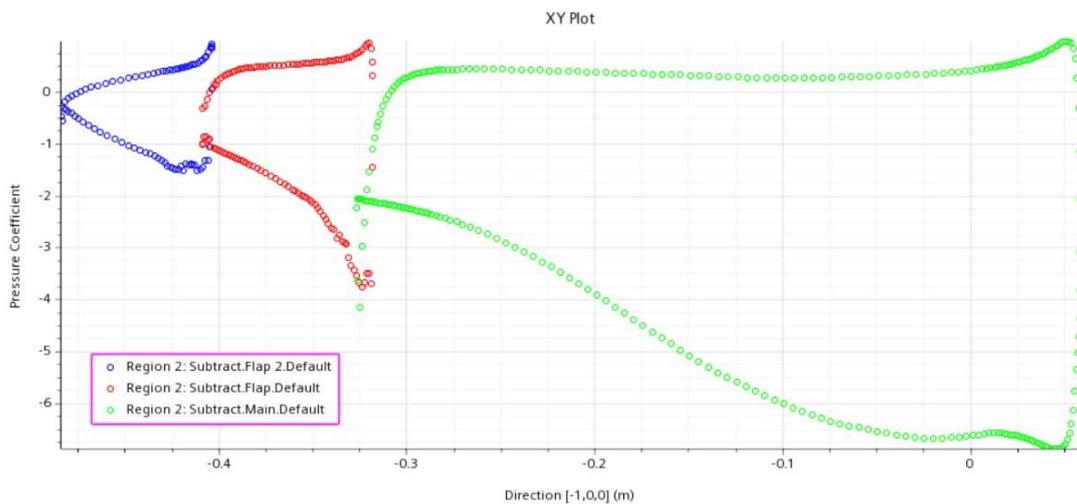


Figura 5.10 grafico del c_p della simulazione in 2D

Dalla figura 4.8 risulta 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.

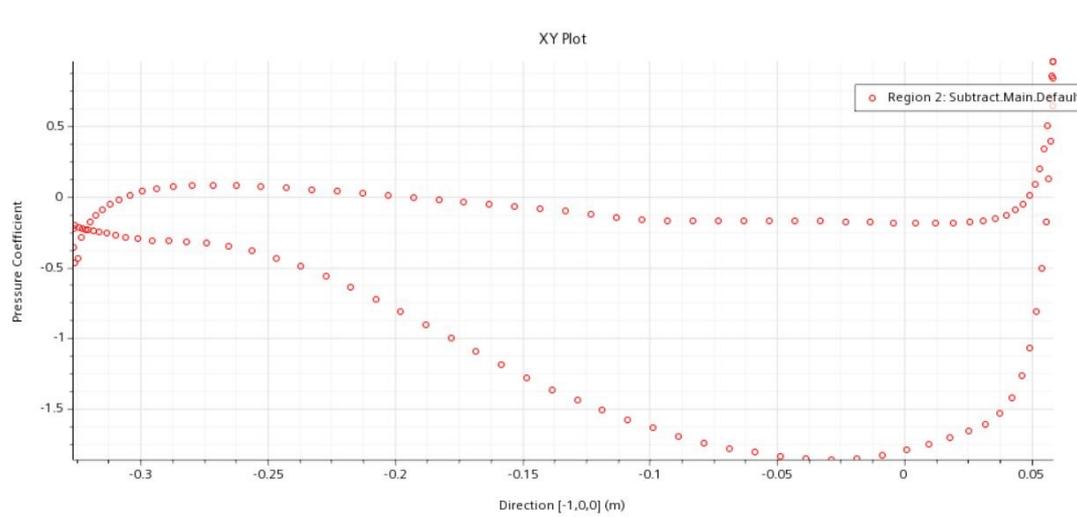


Figura 5.11 visualizzazione del c_p del main a 2.6° di angolo di attacco

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°).

5.3 Secondo modello (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.

Simcenter STAR-CCM+

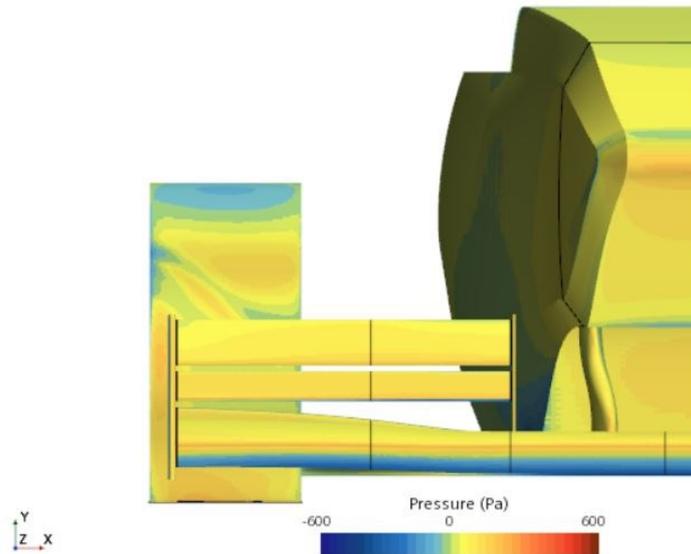


Figura 5.12 visualizzazione frontale delle pressioni della seconda versione del modello 3D dell'ala

Simcenter STAR-CCM+

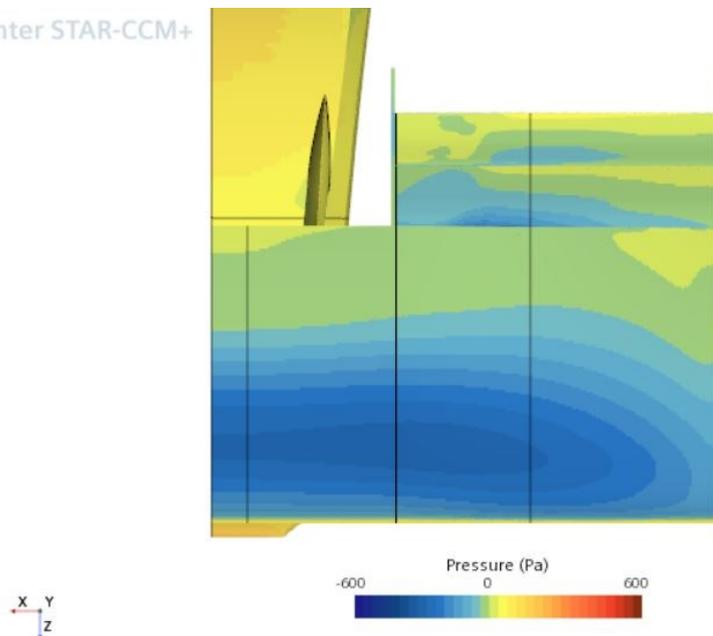


Figura 5.13 visualizzazione da sotto delle pressioni della prima versione del modello 3D dell'ala

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.

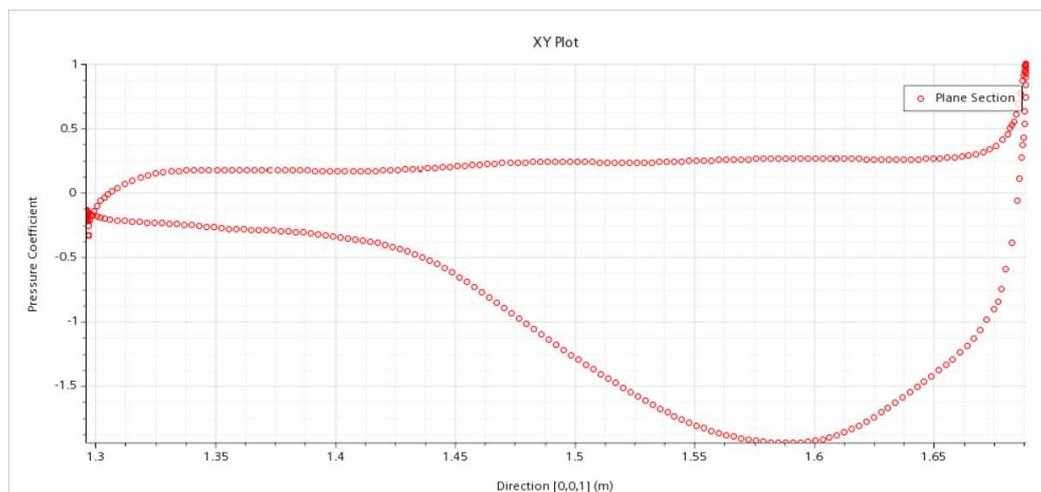


Figura 5.14 grafico del c_p della sezione 1 del modello 2

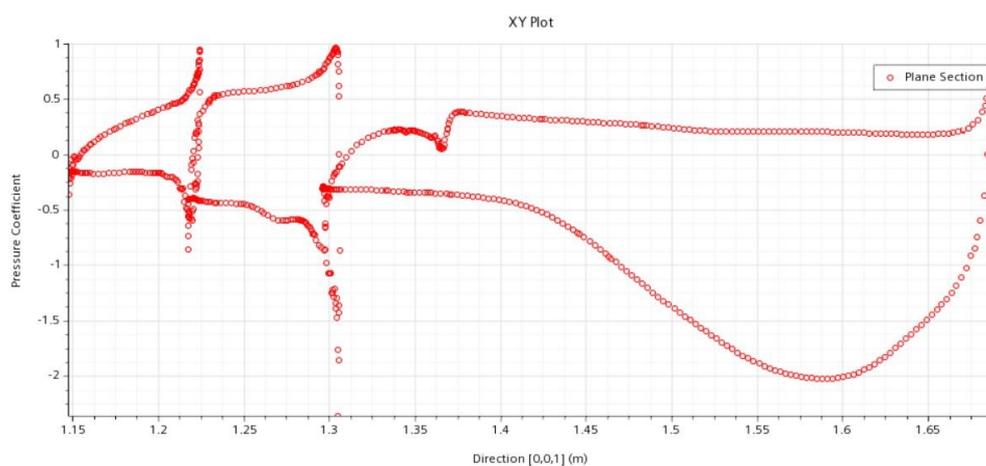


Figura 5.15 grafico del c_p della sezione 2 del modello 2

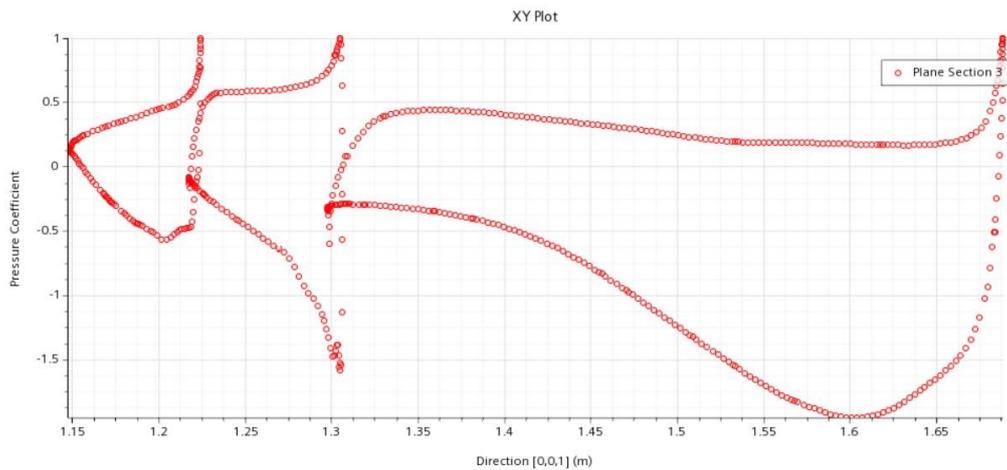


Figura 5.16 grafico del c_p della sezione 3 del modello 2

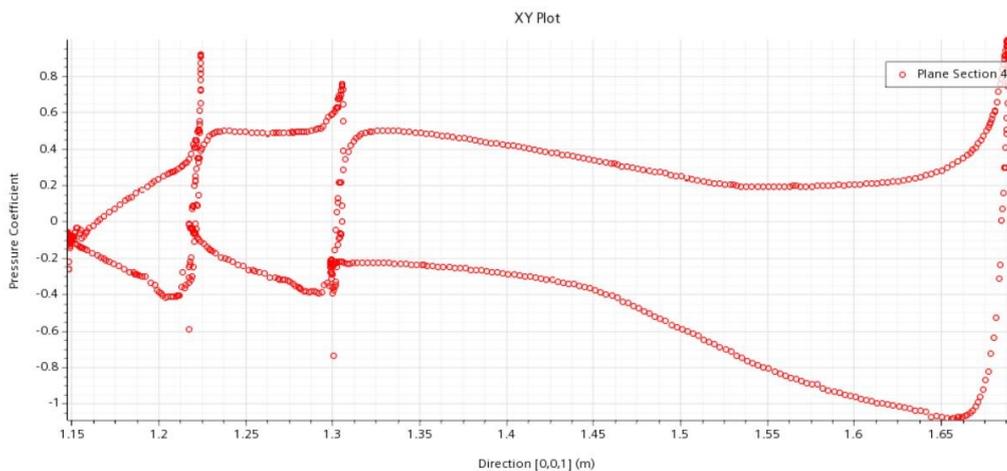


Figura 5.17 grafico del c_p della sezione 4 del modello 2

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 risultati: 118 [N] di Lift e 16 [N] di drag con un'efficienza di 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.

5.4 Terzo modello (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 quindi lo stesso angolo relativo profilo per profilo tra main e 1° flap e tra 1° flap e 2° flap

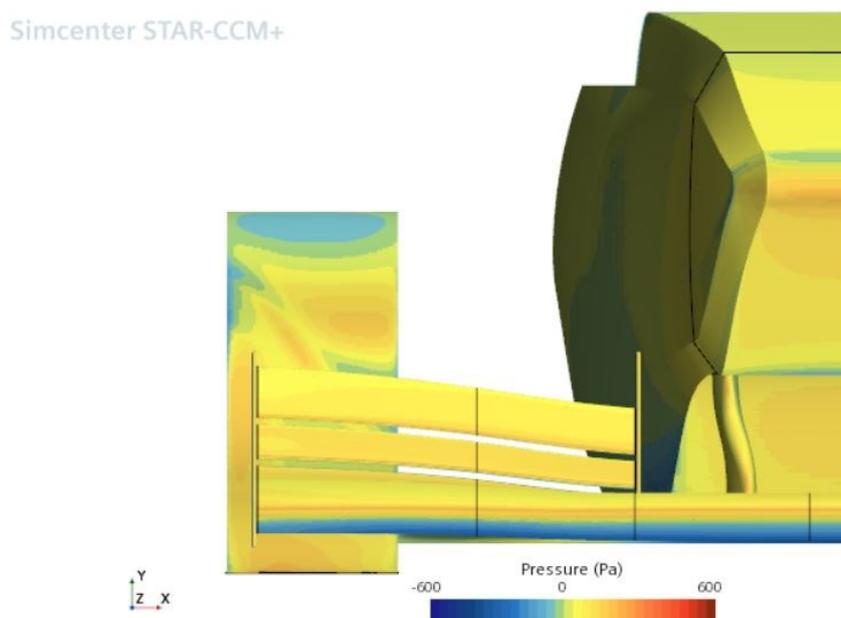


Figura 5.18 visualizzazione frontale delle pressioni della terza versione del modello 3D dell'ala

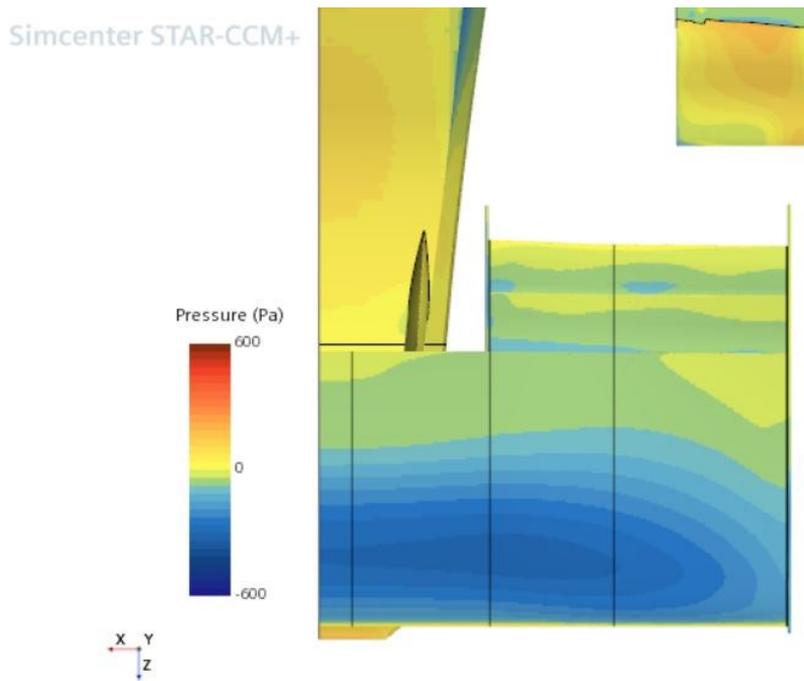


Figura 5.19 visualizzazione da sotto delle pressioni della terza versione del modello 3D dell'ala
 Si è completati poi il confronto valutando i c_p delle quattro sezioni prese in esame nei modelli precedenti.

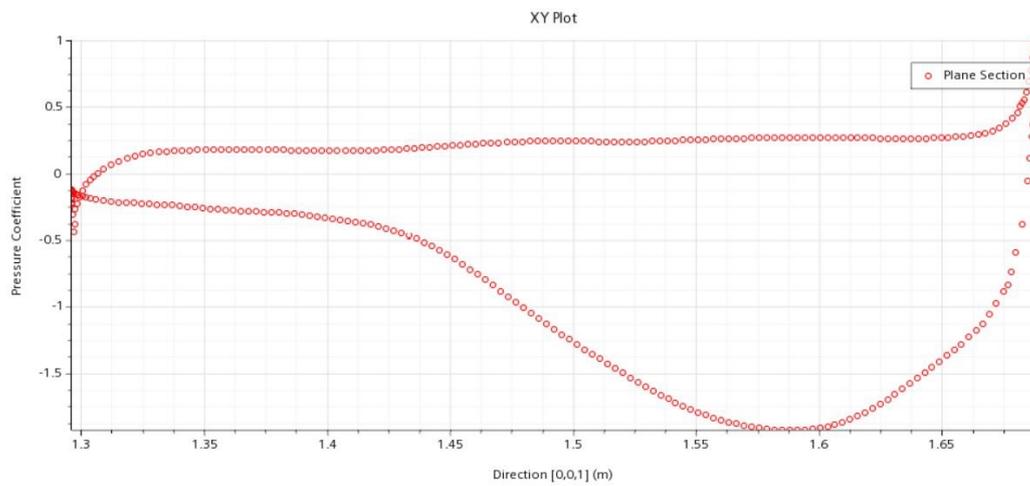


Figura 5.20 grafico del c_p della sezione 1 del modello 3

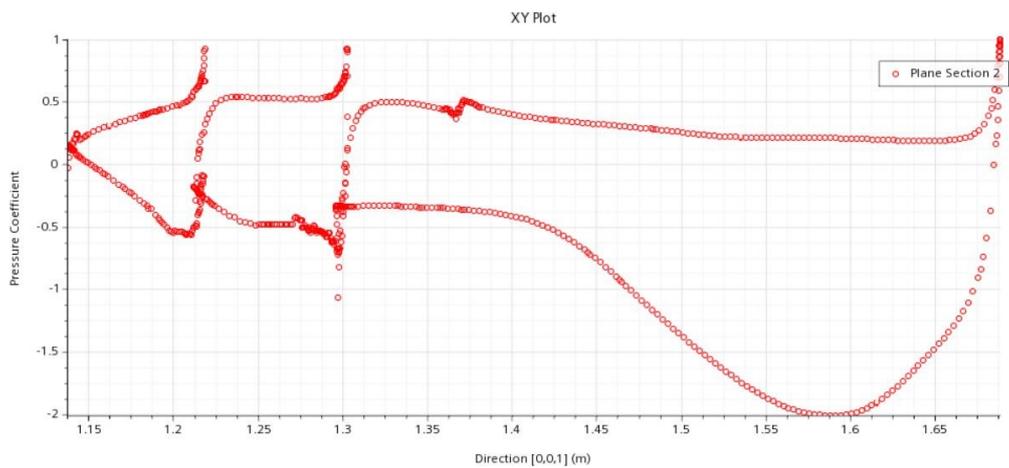


Figura 5.21 grafico del c_p della sezione 2 del modello 3

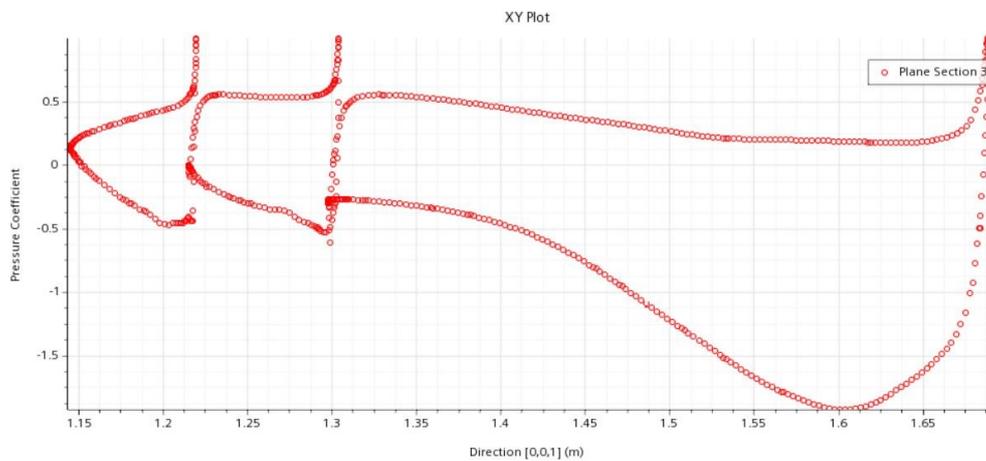


Figura 5.22 grafico del c_p della sezione 3 del modello 3

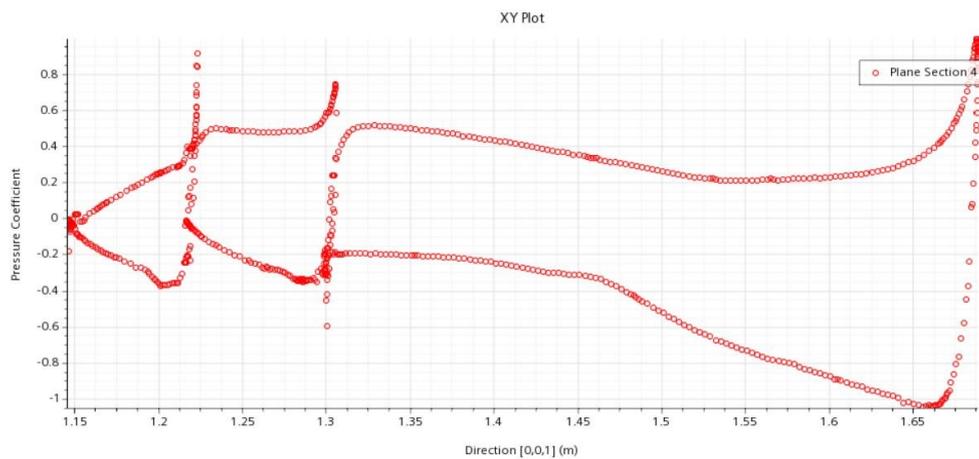


Figura 5.23 grafico del c_p della sezione 4 del modello 3

I risultati di c_p ottenuti con questo modello sono sostanzialmente sovrapponibili ai risultati conseguiti con il secondo modello.

Ma la resistenza è diminuita migliorando sensibilmente l'efficienza, infatti i risultati finali sono i seguenti: 117 [N] di deportanza e 14 [N] di drag e efficienza di 8,4

Nell'ala anteriore del modello della vettura precedente, la P4 Evoluzione si avevano i seguenti valori: 149 [N] di deportanza e una resistenza di 22 [N] con un'efficienza risultante di 6,8. Ovviamente i risultati di entrambi i valori sono stati ottenuti con le medesime velocità con cui è stato effettuato lo studio esposto in questo capitolo ovvero 16 [m]/[s].

In conclusione, si può dire che l'obiettivo di aumentare l'efficienza senza diminuire di troppo la deportanza è stato raggiunto. Infatti, nonostante la deportanza sia diminuita si è registrato una notevole diminuzione di drag con relativo aumento dell'efficienza.

Capitolo 6

Conclusioni

Come illustrato nei capitoli precedenti, l'obiettivo principale dello studio era quello di ottenere una parte frontale della vettura che garantisse un buon livello di downforce con elevati livelli di efficienza, fondamentale per le caratteristiche di una vettura elettrica.

I risultati a tal proposito sono soddisfacenti, in quanto:

- La nuova ala anteriore oggetto dello studio ha 117 [N] di downforce, 14 [N] di drag con un'efficienza di 8,4. L'ala anteriore della P4 Evoluzione aveva una downforce di 149 [N], una drag di 22 [N] con un'efficienza di 6,8. Come si può notare si ha una leggera diminuzione di downforce ma un consistente aumento di efficienza.
- Si è riusciti ad ottenere un musetto con una lift di 4 [N] con lo stesso valore di drag, si può quindi considerare sostanzialmente neutro a livello di portanza. Questo permette di recuperare in parte la downforce persa con l'ala anteriore.

L'altro obiettivo era quello di ottenere un buon flusso verso il fondo e sfruttarlo per creare downforce nella parte iniziale, obiettivo raggiunto introducendo il muso alto e il Tea-Tray.

Inoltre, grazie all'introduzione del pilone per generare il vortice Y250, si è riusciti ad isolare il corpo vettura dal flusso disturbato proveniente dalle ruote.

Ovviamente lo studio presentato all'interno di questa tesi non deve esser visto come un punto di arrivo, bensì come un punto di partenza per continuare la progettazione aerodinamica della vettura elettrica del Polimarche Racing Team.

In futuro si dovrà continuare la progettazione del fondo, ottimizzando la parte posteriore, allo scopo di estrarre efficacemente l'aria, creando una zona di depressione. Inoltre, occorrerà studiare tutte le altre appendici aerodinamiche come l'ala posteriore e le pance, cercando sempre di ottenere la massima efficienza. Infine, di fondamentale importanza, sarà il raffreddamento di tutte le componenti dell'elettronica di potenza e dei nuovi motori elettrici.

Ringraziamenti

Chi mi conosce lo sa, non sono uno sdolcinato o di tante parole, ma per questa occasione ho cercato di fare uno sforzo per ringraziare tutti quelli che in un modo o nell'altro mi hanno aiutato a compiere questa scalata interminabile verso la laurea.

Ringrazio Ludovico con il quale abbiamo condiviso un anno di lavoro e ci siamo aiutati e spronati a vicenda ogni giorno per raggiungere quest'obiettivo

Ringrazio il Professor Ricci, il Dottor Falone, i loro collaboratori e tutta l'Univpm che ci hanno permesso di portare a termine questo studio nel migliore dei modi.

Ringrazio i miei genitori che ogni giorno compiono sacrifici per permettermi di inseguire i miei sogni. È anche e soprattutto grazie a loro se oggi sono arrivato a questo obiettivo. Spero di continuare e renderli ogni giorno orgogliosi di me. Ovviamente ringrazio anche Lia, il mio cane, parte della laurea è anche la sua visto che ha passato tutto il tempo vicino a me mentre studiavo.

Ringrazio tutta la mia famiglia, i miei nonni, zii e cugine che fin dalla nascita mi hanno trasmesso il loro affetto facendomi crescere in un ambiente meraviglioso con dei valori preziosi.

Ringrazio Diego e Matteo, con i quali ho condiviso gioie, fatica e soprattutto divertimento negli ultimi tre anni instaurando un rapporto sempre più stretto. (Diego vedi di sbrigarti con gli esami perché voglio vedere il mio nome scritto a caratteri cubitali tra i tuoi ringraziamenti)

Ringrazio i miei amici "storici" che ogni fine settimana erano pronti per farmi passare momenti di svago e spensieratezza condividendo divertimento e passioni. Spero che il nostro legame continui a rafforzarsi e che i nostri sogni si realizzino per trovarci un giorno a guardare indietro essendo orgogliosi l'un l'altro dei risultati raggiunti.

Infine, ringrazio tutto il Polimarche Racing Team una vera e propria seconda famiglia pronta ad aiutarti e a farti crescere professionalmente e personalmente. L'esperienza fatta in questa squadra ha un valore inestimabile, mai avrei pensato di percorrere il rettilineo dell'Hungaroring a bordo di una monoposto.

In particolare, ringrazio tutti i membri del CDA: Alessia, Marco, Sergio, Luca, Gianluca, Giacomo e Gioele, con i quali abbiamo condiviso ore interminabili di lavoro ma anche soddisfazioni enormi.

Tutti i ragazzi passati e presenti del reparto di aerodinamica, in particolare Lorenzo Menichetti, che mi ha permesso di assumere il suo incarico, Lorenzo Lamponi, che in realtà fa anche parte degli amici storici ed è stato lui a convincermi ad entrare in questa squadra, Alessio e Lorenzo Muselli con i quali si è creato un legame che va oltre il lavoro.

Tutti i Ragazzi della divisione Telaio con i quali abbiamo condiviso giorni di lavoro da HP (loro anche notti in realtà) e soprattutto ci siamo insultati a vicenda sapendo che in realtà ci stimavamo l'un l'altro (per lo meno per me era così se ci sono rimasto fregato fatemelo sapere che cancello questa parte dai ringraziamenti).

Bibliografia

- [1] Croce, L. (2021). Progetto delle superfici aerodinamiche di un'autovettura Formula SAE. Tesi di laurea magistrale 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] External Aerodynamics with STAR-CCM+ Best Practice Guidelines. (2018). Siemens
- [4] Formula Student Rules, Version 0.9. (2021)
- [5] <https://mondointasca.it/2019/03/12/leonardo-da-vinci-visions-le-sfide/>
- [6] https://www.univpm.it/Entra/Engine/RAServeFile.php/f/P002449/allegati_doc/Lezione_2.pdf
- [7] <http://www.adag.unina.it/italiano/didattica/lezione4.pdf>
- [8] https://www.univpm.it/Entra/Engine/RAServeFile.php/f/P002449/allegati_doc/Lezione_1.pdf
- [9] <https://it.wikipedia.org/wiki/Portanza>
- [10] <https://www.f1sport.it/2013/04/f1-che-cose-il-t-tray/>
- [11] <https://www.f1sport.it/2018/12/f1-il-vortice-y250-cose-e-perche-e-così-importante/>
- [12] <https://it.wikipedia.org/wiki/Aerodinamica>
- [13] <https://cfd2012.com/star-ccm.htm>
- [14] J. KATZ. Race Car Aerodynamics designed for speed. (1995). Bentley Publishers