



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**Analisi numerica di sidepods ad alta deportanza per
autovettura Formula S.A.E. elettrica**

**High downforce sidepods for electric powered Formula
S.A.E. car**

Relatore: **Chiar.mo**

Prof. Ricci Renato

Tesi di Laurea di:

Frascaria Vincenzo

Correlatore:

Dott. Falone Matteo

A.A. 2022 /2023

INDICE

SOMMARIO	3
CAPITOLO 1: LA FORMULA SAE	4
1.1 La competizione	4
1.2 Le gare.....	6
1.2.1 Gli eventi statici.....	7
1.2.2 Gli eventi dinamici	8
1.3 Il Polimarche Racing Team.....	11
CAPITOLO 2: CENNI DI AERODINAMICA.....	14
2.1 Cenni storici	14
2.2 L’Aerodinamica nelle corse automobilistiche	17
2.3 I profili alari	18
2.4 Le forze aerodinamiche.....	20
2.5 Le Streamlines.....	21
2.6 Lo strato limite	23
2.8 La distribuzione di pressione	26
2.9 I coefficienti CL e CD	28
2.10 L’Effetto suolo	30
CAPITOLO 3: IL SIDEPOD	32
3.1 Il sidepod: primi utilizzi ed evoluzione.....	32
3.2 Dalle limitazioni ai giorni nostri	35
CAPITOLO 4: RICHIAMI DI CFD.....	43
4.1 Il CFD.....	43
4.2 I programmi utilizzati.....	44
4.3 Impostazione di una simulazione CFD	45
4.4 I metodi di risoluzione	46
4.4.1 Confronto tra LES e RANS	47
4.5 I modelli di turbolenza utilizzati	48
4.5.1 Modello di Transizione Gamma Re-Theta	48
4.5.2 Modello di Turbolenza K-Epsilon.....	49
4.5.3 Il modello di Turbolenza K- Omega	49

4.5.4 Il modello di Turbolenza SST Omega.....	50
4.6 La discretizzazione del dominio.....	51
4.6.1 Il metodo dei Volumi Finiti.....	52
4.7 Le simulazioni 2D.....	53
4.7.1 Impostazione della mesh.....	53
4.7.2 Impostazione della Fisica e delle condizioni al contorno.....	56
4.8 Le simulazioni CFD 3D.....	57
4.8.1 Il dimensionamento del dominio.....	57
4.8.2 Impostazione della mesh.....	58
4.8.3 Impostazione della Fisica e delle condizioni al contorno.....	61
CAPITOLO 5: LA PROGETTAZIONE DEL SIDEPOD.....	62
5.1 Approccio alla progettazione.....	62
5.2 Il sidepod.....	64
5.2.1 Scelta del profilo.....	66
5.2.2 Prove svolte su Xfoil.....	67
5.2.3 La validazione del modello.....	73
5.3 Simulazioni 2D in Star CCM+.....	75
5.4 Realizzazione del modello iniziale e simulazioni 3D.....	77
5.5 I nuovi modelli.....	82
5.5.1 Endplate 1 ed Endplate 2.....	83
5.5.2 Endplate 3.....	87
5.6 Confronto tra le simulazioni.....	89
CAPITOLO 6: CONCLUSIONI E SPUNTI FUTURI.....	106
RINGRAZIAMENTI.....	107
BIBLIOGRAFIA.....	109

SOMMARIO

L'evoluzione tecnologica è il tema principale che le grandi aziende mondiali perseguono fin dalla prima rivoluzione industriale.

In un mondo in continua evoluzione, la ricerca e lo sviluppo di nuove idee è fondamentale per aumentare il proprio Know-How ed essere competitivi sul mercato, in particolar modo nel settore automotive.

Questo ha comportato lo sviluppo di nuove tecnologie, come nuove alimentazioni per generare movimento e migliorare prestazioni ed efficienza in campo aerodinamico.

Tali innovazioni, spesso, vengono ideate e migliorate grazie alle corse automobilistiche, un primo vero banco di prova in movimento, per far sì che queste siano applicabili per la produzione di veicoli comuni.

In questi ultimi anni, lo sviluppo si è concentrato su nuove motorizzazioni, accoppiando, e/o sostituendo, i motori termici con motori elettrici, riduzione della resistenza all'avanzamento e, nello stesso momento, generare un elevato carico aerodinamico.

Il Polimarche Racing Team, in seguito a questi nuovi principi, sta sviluppando e realizzando una nuova vettura, chiamata P5, che sarà alimentata da un propulsore elettrico e caratterizzata da un nuovo concetto aerodinamico per garantire il massimo delle prestazioni possibili.

Nello specifico, si andranno a descrivere la valutazione e una prima progettazione dei SIDEPOD, ovvero le fiancate laterali della nuova vettura che parteciperà alla competizione Formula SAE.

Infine, dopo una breve introduzione su quest'ultima e il Polimarche Racing Team, si introdurranno alcuni concetti di base di Aerodinamica e CFD, in modo tale da comprendere la descrizione del lavoro svolto sui sidepod in questo elaborato.

CAPITOLO 1: LA FORMULA SAE

1.1 La competizione

La Formula SAE è una competizione universitaria internazionale organizzata dalla Society of Automotive Engineers (SAE), basata sulla progettazione e la realizzazione di un'auto da corsa.

Venne istituita nel 1981 per dare l'opportunità agli studenti universitari di mettere in pratica tutte le conoscenze acquisite durante il percorso di studi e per confrontarsi con altre squadre provenienti da numerose università (figura 1.1).

Questa competizione è diffusa in tutto il mondo, ed è caratterizzata da svariati eventi annuali organizzati direttamente dalla SAE o da associazioni nazionali di ingegneri e tecnici del settore automotive.

L'idea di base è quella di organizzare ogni team come una piccola azienda: ognuno deve creare, sviluppare, produrre e gareggiare con la propria auto, seguendo un regolamento tecnico. L'obiettivo della competizione è formare gli studenti in ambito automotive, lavoro di squadra, organizzazione generale, il rispetto di regolamenti e scadenze progettuali.



Figura 1.1: Partecipanti della Formula ATA 2022

Le categorie di ogni competizione sono 4:

- classe 1C-Combustion (per i veicoli con motore a combustione);
- classe 1E-Electric (per i veicoli elettrici);
- classe 1D-Driverless (per i veicoli dotati di guida autonoma);
- classe 3, a cui partecipano le squadre che presentano solo il progetto della vettura, non partecipando agli eventi statici e dinamici.

Ad ogni manifestazione è possibile totalizzare un massimo di 1000 punti distribuiti tra varie prove per le categorie combustion ed electric vehicle, mentre sono 600 i punti ottenibili per le competizioni driverless (figura 1.2).

	CV & EV	DC
Static Events:		
Business Plan Presentation	75 points	-
Cost and Manufacturing	100 points	-
Engineering Design	150 points	150 points
Dynamic Events:		
Skid Pad	50 points	-
DV Skid Pad	75 points	75 points
Acceleration	50 points	-
DV Acceleration	75 points	75 points
Autocross	100 points	-
DV Autocross	-	100 points
Endurance	250 points	-
Efficiency	75 points	-
Trackdrive	-	200 points
Overall	1000 points	600 points

Figura 1.2: Sistema di punteggio delle gare

Ogni evento organizzato per la Formula SAE si compone complessivamente di quattro giornate di gare, svolte in alcuni dei circuiti più famosi del mondo.

Gli eventi sono tutti basati su un unico regolamento (riportato sul sito di FSG), ma costituiscono ognuno una competizione indipendente, cioè senza l'assegnazione di

punti per un campionato. Nonostante ciò, viene sempre definita una classifica mondiale annuale, ma non comporta alcun riconoscimento.

Ciascun evento presenta un proprio “handbook”, un manuale nel quale sono riportate regole specifiche e informazioni utili alle squadre partecipanti.

Tutti i membri, compresi i piloti, devono essere studenti e il lavoro sulla vettura deve essere svolto esclusivamente da questi ultimi.

L’obiettivo della Formula SAE è quello di creare un evento universitario regolamentato, che porti i seguenti benefici per gli studenti e le aziende:

- aumento di offerte lavorative;
- preparazione alla vita lavorativa;
- sviluppo di ingegneri;
- incoraggiare la ricerca e l'innovazione rispettando un determinato budget;
- sviluppo delle soft skills (organizzazione, lavoro in gruppo).[1]

1.2 Le gare

Le giornate di gare prevedono diversi eventi, quali prove Tech, eventi Statici ed Eventi Dinamici.

La prova tech si divide in:

- *Pre-Inspection*: pre-ispezione dell’auto; vengono controllati i dispositivi di sicurezza come tute, caschi ed estintori;
- *Mechanical Inspection*: i giudici verificano che la macchina sia in sicurezza per scendere in pista, controllandone ogni parte;
- *Tilt Test*: l’auto viene inclinata prima di 45° e poi di 60° per controllare che non ci siano perdite di liquidi (simula il comportamento in curva) (figura 1.3);
- *Brake Test*: si simula una frenata di emergenza, in cui l’auto deve fermarsi rimanendo dritta e bloccando tutte le ruote;

- *Egress Test*: il pilota deve uscire dall'auto, togliendo il volante dalla sede e slacciandosi le cinture entro 5 secondi (per simulare l'uscita in caso di emergenza);
- *Noise Test*: si verifica che il rumore del motore sia inferiore ai 103 dB a minimo regime e ai 110 dB per una velocità del pistone pari a 15,25 m/s;
- *Vehicle Weighting*: si pesa il veicolo senza il pilota ma con carico di carburante.

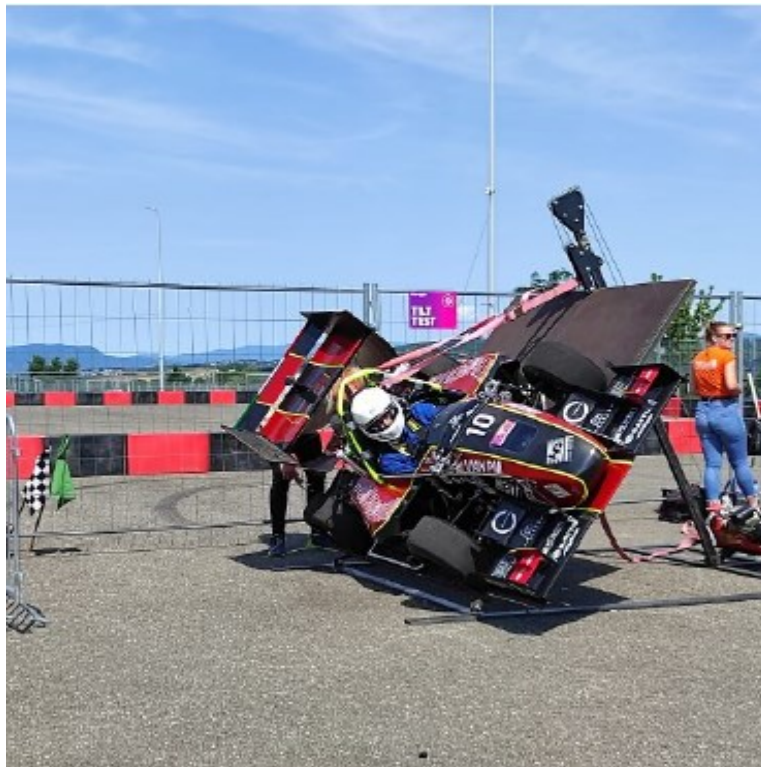


Figura 1.3: Vettura del Polimarche durante il Tilt Test

1.2.1 Gli eventi statici

Durante gli eventi statici si analizza il progetto della vettura senza l'accensione o il movimento dell'auto. Vengono divisi in:

- Business Plan Presentation Event (75 pt):

ogni squadra deve esporre un business plan, in cui si va a promuovere l'auto come un prodotto finale, escludendo la performance. In questa fase I giudici vengono considerati come dei veri e propri investitori;

- **Cost and Manufacturing Event (100 pt):**

in seguito alla presentazione del business plan, si andranno ad illustrare tutti i processi produttivi e i costi associati all'auto, tenendo conto dei compromessi progettuali;

- **Engineering Design Event (150 pt):**

durante questa fase vengono trattati i processi di progettazione e di validazione dei componenti, motivandone le scelte fatte.

Si parla sia di pezzi prodotti dagli studenti, sia di quelli acquistati dal mercato.

1.2.2 Gli eventi dinamici

L'ultima categoria di eventi riguarda quelli dinamici, in cui la macchina questa volta deve muoversi attraverso un percorso prestabilito:

- **Acceleration Event (75 pt)**

La prova si svolge su un percorso di 75 metri di lunghezza e 5 di larghezza, in cui la macchina deve partire da ferma e compiere questo tratto nel minor tempo possibile. Viene effettuata da due piloti diversi e ciascun pilota ha a disposizione due tentativi;

- **Skidpad Event (75 pt)**

La macchina percorre una pista a forma di 8, con due cerchi concentrici (due per lato), che vanno a indicare i limiti della carreggiata, che è di 5 m. I piloti devono affrontare prima due curve a destra, di cui solo la seconda è

cronometrata, e di seguito due a sinistra (vale lo stesso anche qui). Il diametro interno è di 15,25 m e la distanza tra i due centri è di 18,25 m.

Il tempo finale sarà ottenuto dalla media dei due giri cronometrati (figura 1.4,1.5);

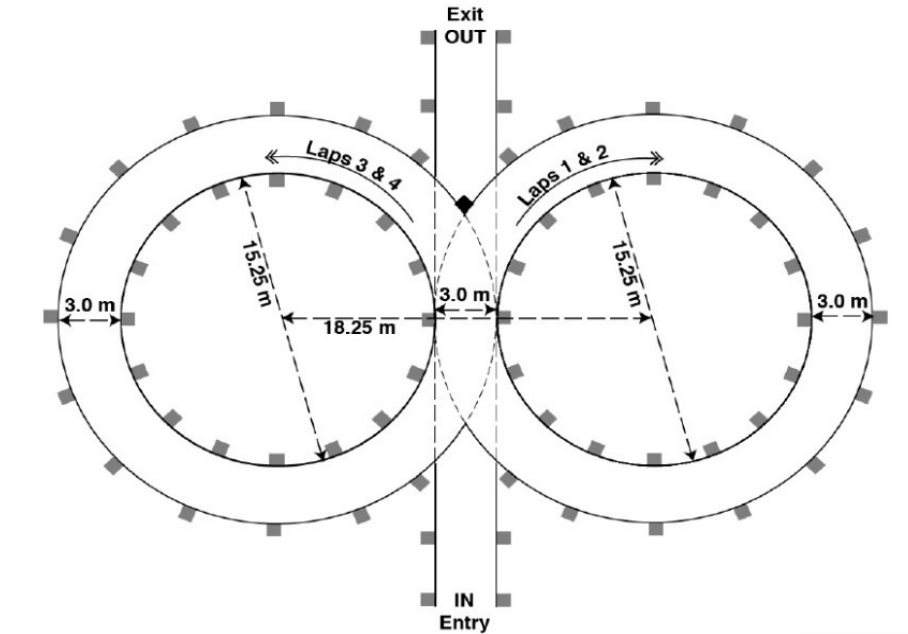


Figura 1.4: Layout dello Skydpad



Figura 1.5: Prova Skydpad durante una manifestazione

- Autocross Event (100 pt):

La prova viene svolta sempre da due piloti, con due tentativi a testa. L'obiettivo è di completare un layout di pista improvvisato nel minor tempo possibile in cui i margini del circuito sono caratterizzati da coni. Se durante la prova si tocca o si oltrepassa la carreggiata definita da questi ultimi si incorre in una penalità di tempo. L'unico modo per conoscere la pista è attraverso un trackwalk (figura 1.6);



Figura 1.6: esempio di circuito per l'Autocross Event

- Endurance Event (325 pt):

Si svolge su un tracciato simile a quello definito per l'Autocross, ma questa volta si percorre una gara di resistenza della durata di 22 km, che prevede un cambio pilota a metà di essa.

L'obiettivo è quello di portare a termine la prova nel minor tempo possibile. Inoltre, le penalità imposte nella prova di Autocross valgono anche per quest'ultima;

- Efficiency Event (100 pt):

Questo evento serve a valutare l'efficienza e dei consumi della vettura.

Viene svolto solo dalle squadre che riescono a completare la prova di Endurance e consiste nel determinare un *Efficiency Factor*, ovvero un coefficiente che indica l'efficienza dell'auto in funzione del tempo di completamento della prova precedente e del volume del serbatoio.

Una volta determinato il valore, si va ad assegnare il rispettivo punteggio [2][3].

1.3 Il Polimarche Racing Team

L'università Politecnica delle Marche partecipa alla competizione dal 2013 con il nominativo di "Polimarche Racing Team" (figura 1.7).



Figura 1.7: Foto di squadra scattata durante la Formula ATA 2022

Attualmente sono 50 i membri che fanno parte della squadra e per la progettazione delle vetture il gruppo è suddiviso in 6 reparti:

- Aerodinamica;
- Telaio;
- Pacco Batterie;
- Dinamica;
- Elettronica;
- Marketing.

Ciascun reparto ha il compito di progettare i diversi componenti della vettura seguendo le linee guida stabilite all'inizio della stagione.

Il reparto di aerodinamica, per la nuova vettura elettrica, si pone come obiettivo quello di aumentare la downforce, riducendo il peso delle componenti aerodinamiche al fine di ridurre il consumo del pacco batterie, migliorandone di conseguenza le prestazioni.

Gli studi aerodinamici si suddividono nelle seguenti fasi (figura 1.8):

- disegnata la geometria, si studiano le possibili combinazioni dei componenti e dei profili da utilizzare;
- si passa poi ad una analisi mediante programmi di CFD;
- si effettuano prove in galleria del vento utilizzando dei modelli in scala del componente da realizzare;
- si confrontano i dati ottenuti analizzando il reale comportamento dell'aerodinamica sull'auto.

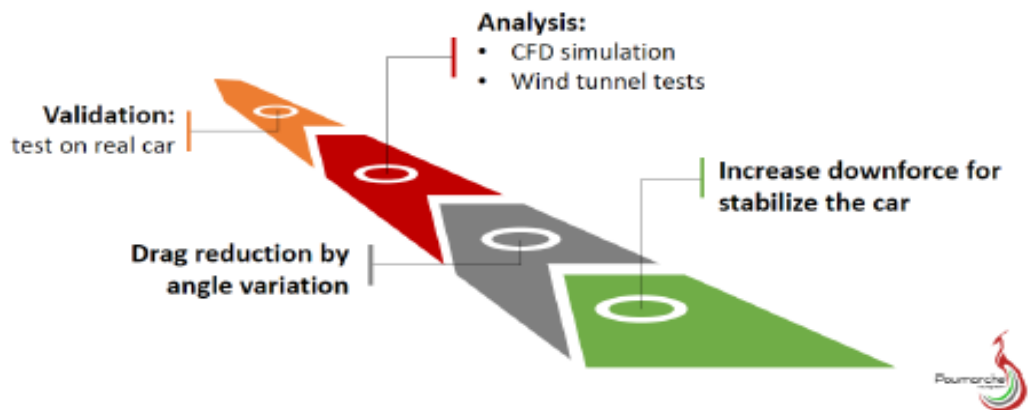


Figura 1.8: Schema del metodo di lavoro (design event 2022)

Per comprendere i risultati ottenuti durante le varie fasi di questo elaborato, occorre approfondire alcune nozioni fondamentali di questa materia (l'aerodinamica) [1].

CAPITOLO 2: CENNI DI AERODINAMICA

2.1 Cenni storici

L'Aerodinamica è la branca della Fluidodinamica che studia la dinamica dei gas e la loro interazione con corpi solidi. Nasce grazie ai primi studi effettuati in campo aeronautico, ma assume notevole rilevanza nel settore automobilistico durante i primi anni del Novecento.

L'evento che ha contribuito alla diffusione di questa materia avvenne nel 1903 (figura 2.1), quando i fratelli Wright riuscirono a compiere il primo volo della storia a bordo del primo vero prototipo di aeroplano [3].

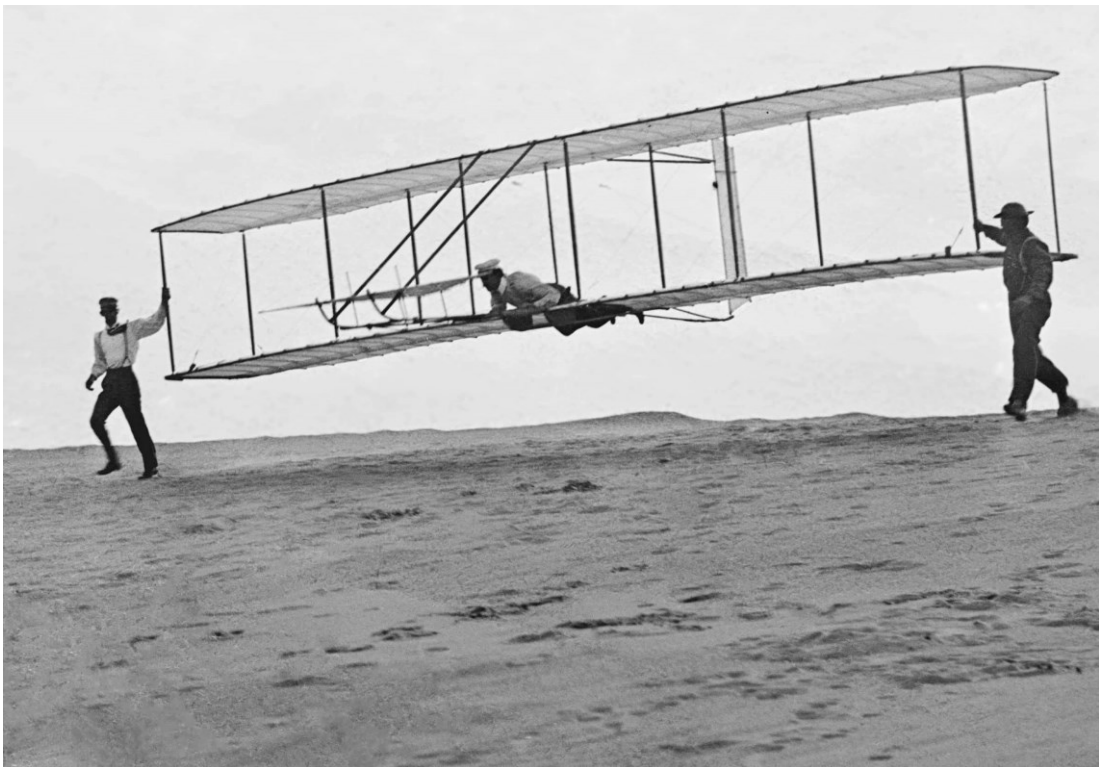


Figura 2.1: Il primo volo dei fratelli Wright nel 1903

Le prime applicazioni ad essere studiate e applicate su veicoli terrestri erano caratterizzate da forme molto semplici, comunemente chiamate *Basic Shape*, le quali

predevano spunto da profili alari utilizzati in campo aeronautico, chiamati *Airship Basic Shape*.

Sviluppando questi elementi, si crearono i primi veicoli con corpi vettura aerodinamicamente validi, costituiti da telai su cui era possibile montare carrozzerie derivate dalle Basic Shapes.

Il salto di qualità avvenne quando si iniziarono ad utilizzare gallerie del vento aeronautiche adattate per veicoli terrestri, permettendo così lo sviluppo di nuove forme, più dettagliate e ottimizzate, capaci di migliorare notevolmente gli andamenti dei flussi sulle vetture.

Alcuni esempi da ricordare sono:

- *La Teardrop Car*, basata su un'ala verticale trasportata da ruote, (figura 2.2);

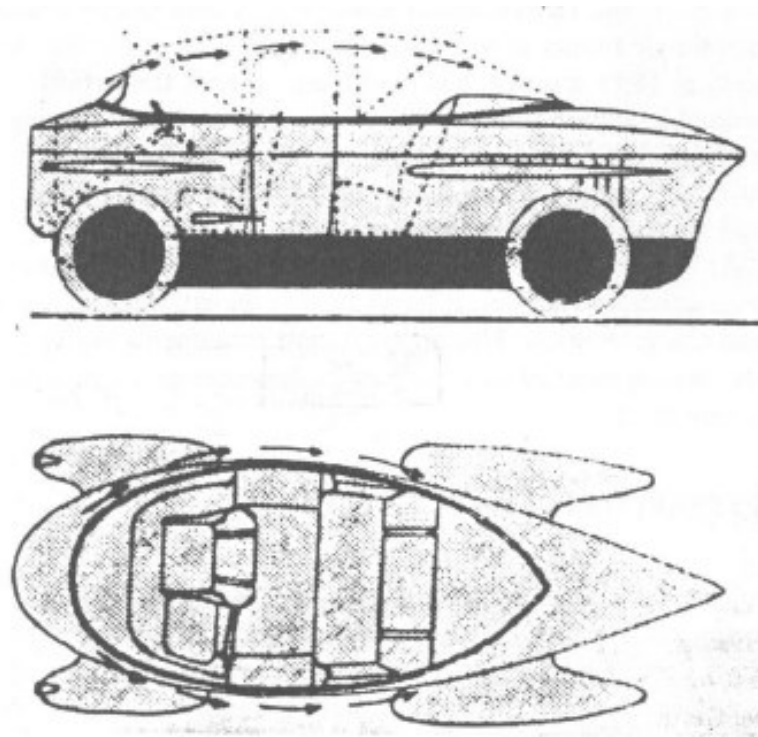


Figura 2.2: Esempio di Teardrop Car

- *La Schlor Car*, basata sull'utilizzo di profili alari disposti radialmente rispetto l'asse longitudinale (figura 2.3);

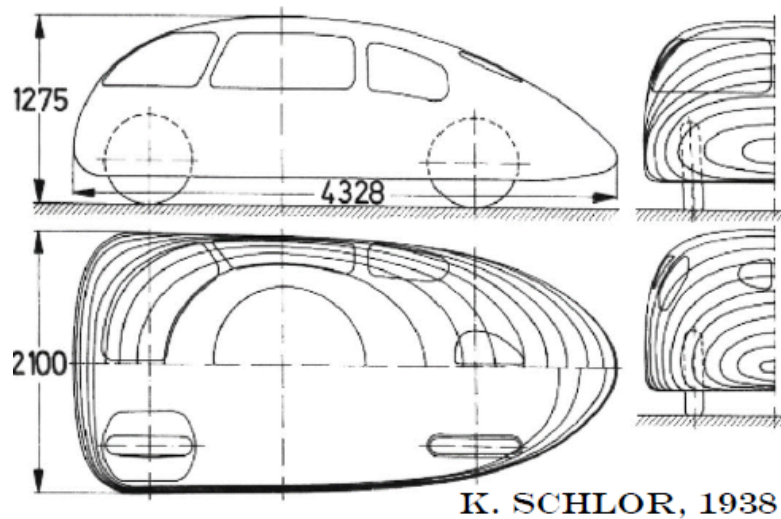


Figura 2.3: La Schlor Car, realizzata nel 1938

- *La Lange Car*, (figura 2.4), basata sull'utilizzo della sovrapposizione verticale di due profili alari, in cui il primo va a formare la scocca inferiore, mentre il secondo parte dal parabrezza e corre lungo tutto il tetto. Quest'ultimo è molto riconoscibile, visto che è tutt'ora utilizzato dalle autovetture costruite dalla nota casa automobilistica tedesca Porsche (figura 2.5) [4].

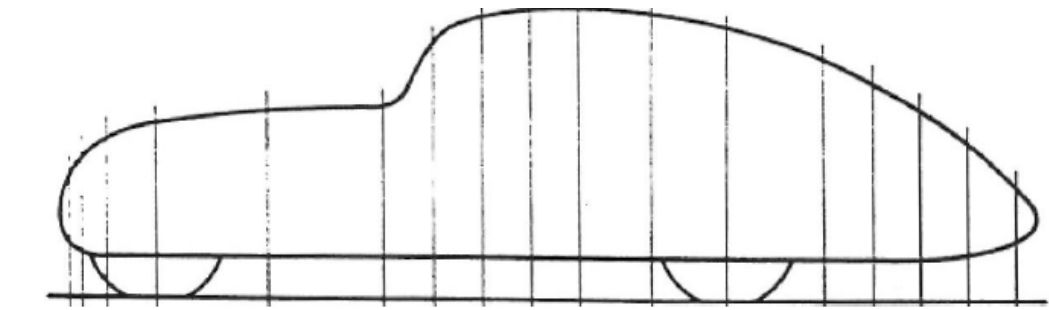


Figura 2.4: Esempio di Lange Car



Figura 2.5: Modello della Lange Car applicato sulla nuova Porsche 911

2.2 L'Aerodinamica nelle corse automobilistiche

Le prime evoluzioni aerodinamiche applicate a vetture da corsa compaiono durante le prime competizioni nate negli Anni 30. Lo scopo principale era ottenere velocità di punta molto elevate tramite la riduzione della resistenza aerodinamica, caratterizzando le vetture con scocche molto affusolate, reinterpretando le fusoliere progettate in campo aeronautico.

Seguendo questo principio però, si aumentava l'instabilità in curva dell'auto, compromettendo la performance e aumentando i rischi per il pilota. Di conseguenza, per migliorare la stabilità e la maneggevolezza, gli ingegneri hanno deciso di utilizzare superfici alari capovolte, capaci di creare portanza negativa, ovvero deportanza

Vista la loro efficacia, tale soluzione venne perfezionata e migliorata negli anni, diventando una delle principali innovazioni tecniche presenti sulle vetture di Formula 1 degli anni 70, le cosiddette *Wing Car* (figura 2.6).



Figura 2.6: La Ferrari 312B, la prima vettura in Formula 1 ad applicare profili aerodinamici

La costante evoluzione e la ricerca esasperata della deportanza, hanno portato la Federazione Internazionale dell'Automobile (FIA), a stabilire delle restrizioni nel 1983. Questo evento ha portato alla nascita di regolamenti tecnici atti a limitare, ma non bloccare, lo sviluppo dell'Aerodinamica nel mondo delle corse.

2.3 I profili alari

L' aumento delle prestazioni sulle auto da corsa in chiave aerodinamica, è dovuto alle numerose prove svolte sui profili alari. Effettuando numerosi test, gli ingegneri hanno studiato il corretto utilizzo di questi elementi, in modo da generare una forza verso il basso, detta deportanza, 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, garantisce elevate prestazioni in curva e aumenta la maneggevolezza del veicolo.

Al tempo stesso, questo fenomeno comporta la formazione di una forza contraria al movimento, detta Resistenza, dovuta ad effetti viscosi che determinano il mancato o completo recupero di pressione in uscita dal profilo, e al contatto delle ruote sul terreno.

Per limitarne gli effetti, sono state effettuate continue ricerche per garantire i massimi valori possibili di carico aerodinamico generabili dai profili.

Gli elementi che caratterizzano un profilo alare sono (figura 2.7):

- ASSE DI CORDA, asse su cui si costruisce il profilo;
- ESTRADOSSO, parte superiore del profilo;
- INTRADOSSO, parte inferiore del profilo;
- LINEA DI CAMBER, linea media tra i punti di estradosso e intradosso;
- FRECCIA DI CAMBER, distanza massima tra asse di corda e linea di camber;
- SPESSORE MASSIMO: distanza massima tra estradosso e intradosso;
- LEADING EDGE, bordo di entrata (primo punto del profilo ad essere investito dal flusso);

- TRAILING EDGE, bordo di uscita (ultimo punto del profilo ad essere investito dal flusso);
- RAGGIO DI NASO;
- ANGOLO DI ATTACCO (AoA), l'angolo con cui il profilo fende il fluido.

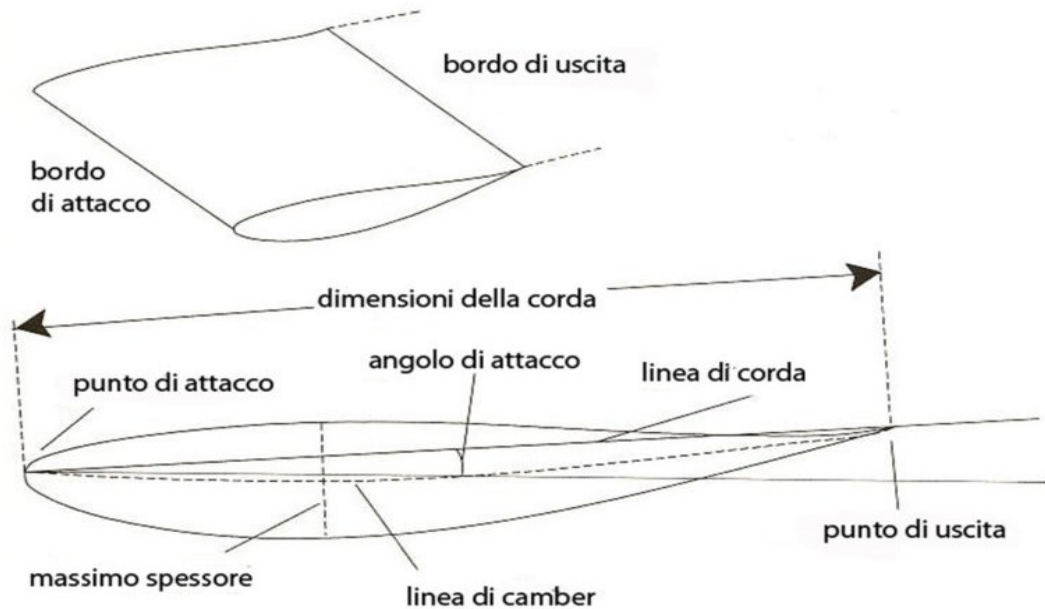


Figura 2.7: Caratteristiche di un profilo alare

Successivamente, oltre alle caratteristiche elencate precedentemente, bisogna introdurre le varie forme che possiamo associare ai profili alari (figura 2.8)[9]:

- CONCAVO CONVESSO: estradosso e intradosso hanno la parte centrale della curvatura che risulta essere più in alto dei punti di ingresso e uscita;
- PIANO CONVESSO: l'estradosso rimane invariato, ma l'intradosso risulta piano;
- BICONVESSO: l'estradosso e l'intradosso hanno curvature opposte. Questa tipologia si divide in:
 1. ASIMMETRICO, se estradosso e intradosso hanno curvature differenti;
 2. SIMMETRICO, se estradosso e intradosso hanno stessa curvatura.



Figura 2.8: Forme dei profili alari

2.4 Le forze aerodinamiche

In seguito all'introduzione dei profili alari, bisogna definire le forze che si sviluppano sulla superficie di un corpo solido quando viene investito da un fluido (in questo caso l'aria).

Dall'interazione di questi due elementi si genera:

- un'azione verticale alla direzione del flusso, definita **PORTANZA** (in inglese LIFT), e nelle formule viene indicata con la lettera **L**;
- un'azione parallela alla direzione del flusso, definita **RESISTENZA** (in inglese DRAG), e nelle formule viene indicata con la lettera **D**;
- un'azione detta **FORZA AERODINAMICA**, ovvero la somma vettoriale delle due forze precedenti. Viene applicata in un solo punto sul corpo, detto **CENTRO DI PRESSIONE**.

La portanza e la resistenza vengono calcolate tramite le seguenti formule:

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_D \cdot S \cdot v^2$$

$$\mathbf{L} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_L \cdot S \cdot v^2$$

Dove:

- ρ = densità dell'aria (1,225 kg/m³ al livello del mare);
- v = velocità del flusso indisturbato;
- S = superficie alare, definita come $C \cdot B$ (con B che indica l'apertura alare);
- C_L = il coefficiente adimensionale denominato **Coefficiente di portanza**;
- C_D = il coefficiente adimensionale denominato **Coefficiente di resistenza**.

2.5 Le Streamlines

Per visualizzare l'andamento di un fluido che investe un corpo, si utilizzano le *streamlines* (figura 2.9), ovvero lo strumento che permette di verificare come il fluido scorre sul corpo (in questo caso il profilo alare), utilizzando un fumo colorato che ha la stessa densità del fluido analizzato, iniettandolo in diversi punti davanti al corpo.

Dagli studi effettuati tramite le *streamlines*, si possono definire due andamenti tipici del flusso:

- Se le linee seguono la forma del profilo il flusso è detto **ATTACCATO**;
- Se le linee tendono a distaccarsi, creando un regime debole e instabile, è detto **SEPARATO**.

Per ottenere buoni risultati e incrementare i livelli di deportanza, è importante che il flusso resti il più possibile attaccato al corpo (figura 2.10).

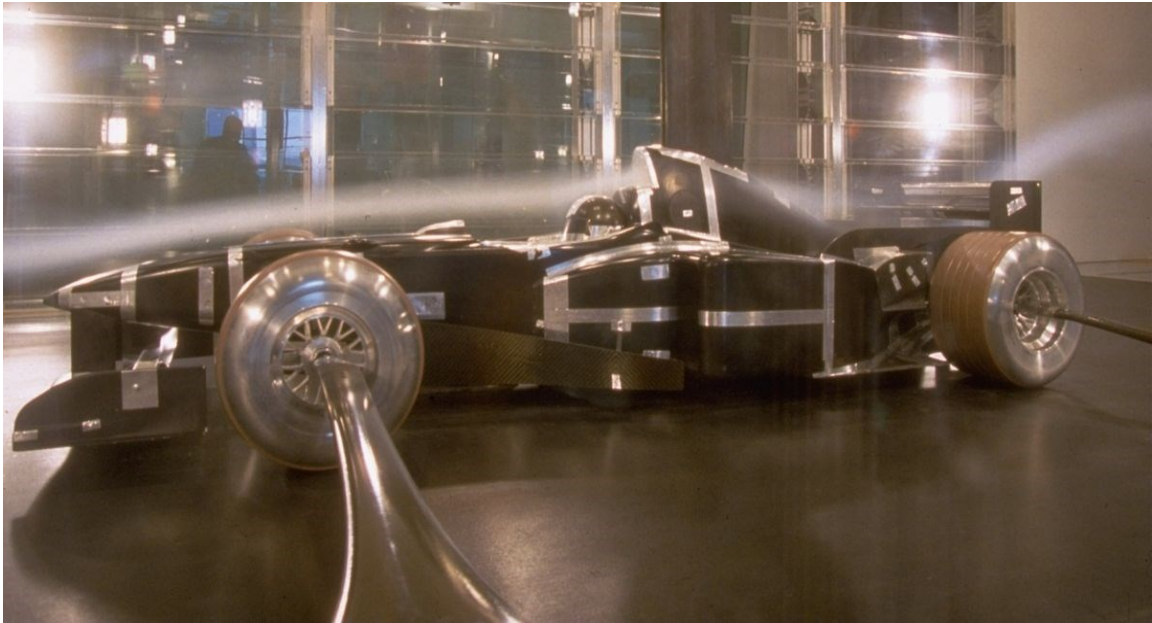


Figura 2.10: Utilizzo delle Streamlines sul prototipo della Ferrari F399

Negli ultimi anni, per verificare se l'aerodinamica di una vettura di Formula 1 è estremamente valida, si utilizza una particolare vernice fluorescente, detta *Flow Viz* (figura 2.11), che permette di visualizzare come il flusso segue il profilo dell'auto.



Figura 2.11: Applicazione della Flow Viz sul sidepod della Red Bull RB19

Oltre ad utilizzare questi metodi pratici, è possibile realizzare e visualizzare le streamlines su un corpo tramite simulazioni CFD, ovvero programmi di analisi numerica (figura 2.12). Spesso, questo metodo viene utilizzato come prima verifica durante le prime fasi di sviluppo di un determinato componente, in modo tale da poterlo realizzare e studiare in galleria del vento o in pista.

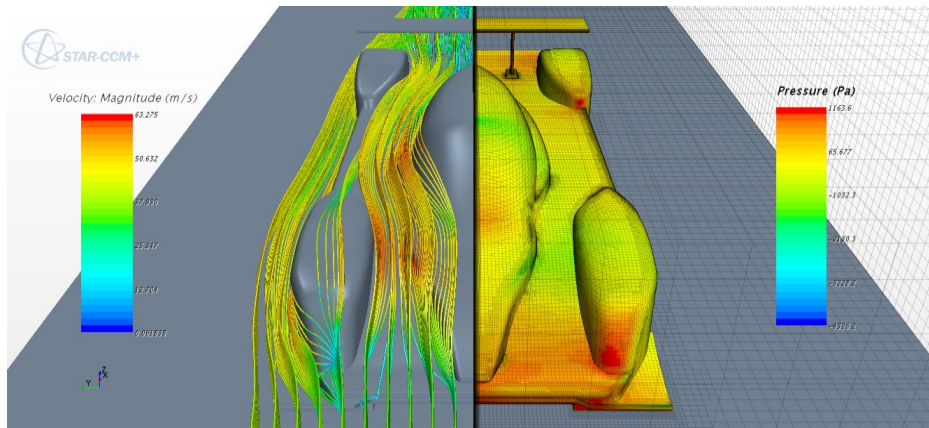


Figura 2.12: Esempio di streamlines visualizzate tramite programmi CFD

2.6 Lo strato limite

Lo strato limite, in inglese Boundary layer (figura 2.13), viene definito per descrivere la distribuzione della velocità che si genera quando il fluido è in contatto con un corpo in movimento.

Questo comporta che la velocità del fluido risulterà variabile in base alla distanza che quest'ultimo ha dalla superficie del corpo.

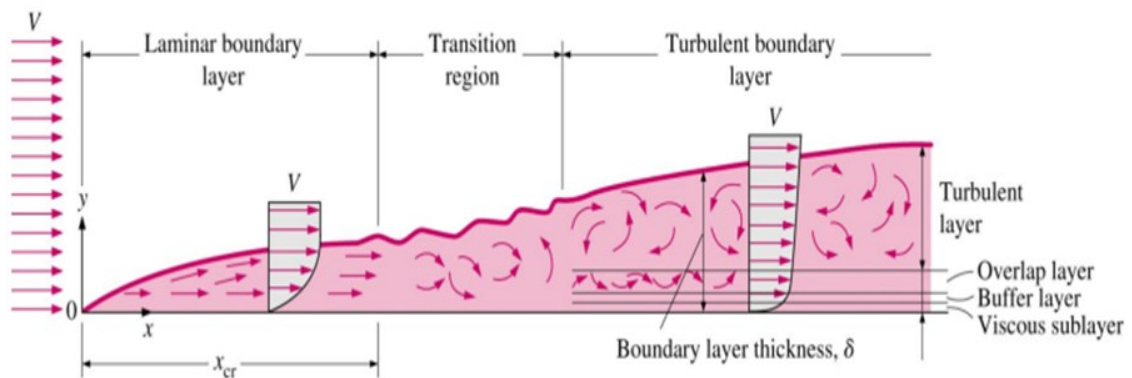


Figura 2.13: Lo strato limite

Nella zona di contatto il fluido avrà velocità nulla, mentre crescerà man mano che la distanza aumenterà, fino a raggiungere il valore in cui la velocità del flusso risulterà pari a quella del flusso indisturbato.

Tramite queste considerazioni, si può completare la descrizione dello strato limite con due proprietà relative al flusso indisturbato:

- Se le linee di flusso sono tutte parallele tra loro, il flusso è detto LAMINARE. Il fluido sarà caratterizzato da una velocità massima molto più elevata rispetto a quella media;
- Se le linee di flusso seguono direzioni differenti, il flusso è detto TURBOLENTO. Il fluido sarà caratterizzato da una velocità massima molto simile a quella media.

Per gli ingegneri di auto da corsa, è molto importante scoprire come e dove il flusso passa da laminare a turbolento, visto che tale fenomeno va a modificare drasticamente i valori di deportanza e resistenza.

2.7 Lo spessore dello strato limite

Per completare il discorso sullo strato limite, bisogna menzionare un altro concetto strettamente ad esso, ovvero lo spessore dello strato limite.

Quest'ultimo, infatti, non è formato da uno strato costante, ma varia in base alla posizione che si studia. La zona frontale, ovvero quella in cui avviene il contatto tra corpo e fluido, risulta molto piccola (mm), rispetto quella finale (cm). Viene simboleggiato con δ , il quale indica la distanza tra la superficie del corpo e il punto in cui la velocità del fluido è la medesima di quella indisturbata.

Nella zona iniziale è presente un moto laminare, ma con l'aumento della distanza percorsa diventa turbolento. Inoltre, la regione in cui si presenta il passaggio da un moto all'altro è detta *Zona di transizione*.

L'aumento dei valori dello spessore comporta l'innalzamento dell'attrito tra il profilo e il fluido, quindi maggiore drag. Per valutare ciò, si definisce un coefficiente adimensionale, detto *Coefficiente di Attrito*, che viene calcolato con la formula seguente:

$$C_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2}$$

in cui si ha:

- $\tau = \text{sforzo di attrito viscoso}$
- $\rho = \text{densità del fluido}$
- $V_\infty = \text{velocità del flusso indisturbato.}$

Tenendo conto di questi effetti, si cerca di ottenere una prevalenza di moto laminare rispetto ad uno turbolento, dato che garantisce minori attriti con la superficie del corpo, quindi prestazioni più elevate.

Per ottenere ciò, si considerano alcuni effetti, tra i quali la *Laminar Bubble* (figura 2.14), utilizzato per ottimizzare i flussi nel caso in cui si sta studiando un corpo che presenta elevate curvature. Lo scopo è separare il flusso indisturbato per poi farlo riattaccare a causa del passaggio a regime turbolento dello strato limite. In questo modo si induce una maggiore quantità di moto nel fluido, che ritarda o annulla la separazione del flusso.

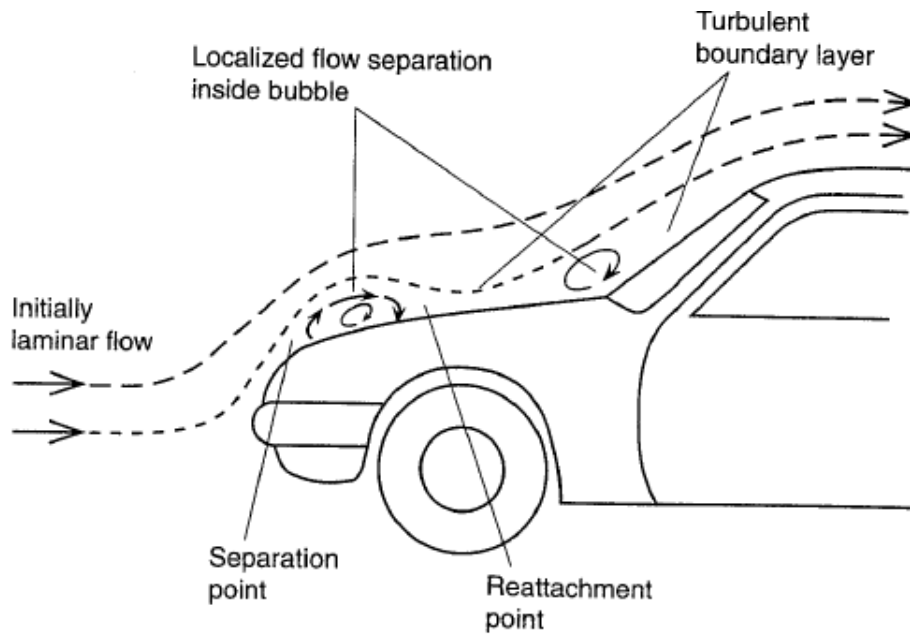


Figura 2.14: Descrizione visiva della formazione delle Laminar Bubble

2.8 La distribuzione di pressione

Nella determinazione dei carichi aerodinamici che si sviluppano su un profilo, risulta di grande importanza la conoscenza della distribuzione di pressione a cui è soggetto (figura 2.15).

In questo caso, si introduce il *Coefficiente di Pressione* C_p :

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2}$$

dove:

- p = pressione
- p_∞ = pressione del flusso indisturbato
- ρ = densità del fluido
- V_∞ = velocità del flusso indisturbato

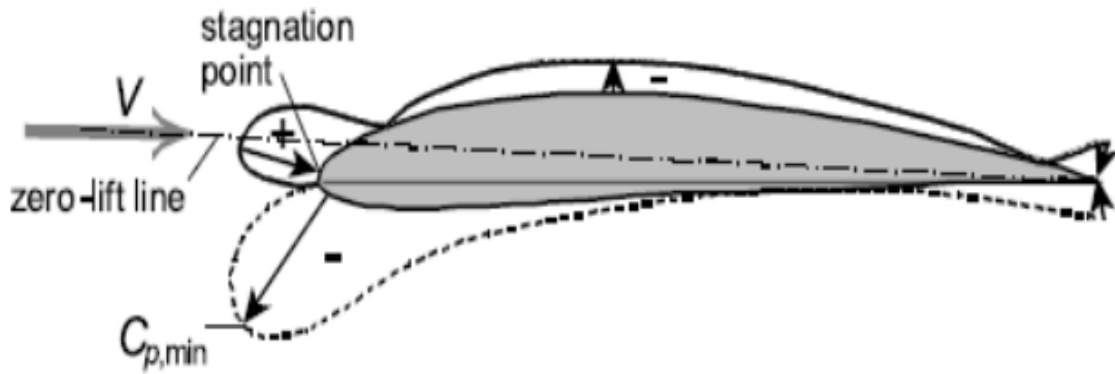


Figura 2.15: Distribuzione di pressione su un profilo alare

Il valore che si ottiene è adimensionale ed è indipendente dalla velocità. Inoltre, nel *Punto di Ristagno*, ovvero il punto del corpo investito dal fluido in cui la velocità istantanea locale è zero, il valore del coefficiente è uguale ad 1. Successivamente, tende a diminuire fino ad arrivare ad un valore negativo per i punti in cui la pressione risulta minore rispetto a quella del flusso indisturbato p_∞ per poi risalire.

Se si analizza un profilo aerodinamico deportante (figura 2.16), nella zona inferiore il fluido scorre “più velocemente” rispetto a quello nella zona superiore. Questo perché la conformazione del profilo tende a creare una zona di bassa pressione che “accelera” le particelle di fluido che scorrono vicino al profilo, al contrario della zona superiore, in cui le particelle subiscono maggiormente gli effetti degli attriti e della forza di gravità, risultando più lente.

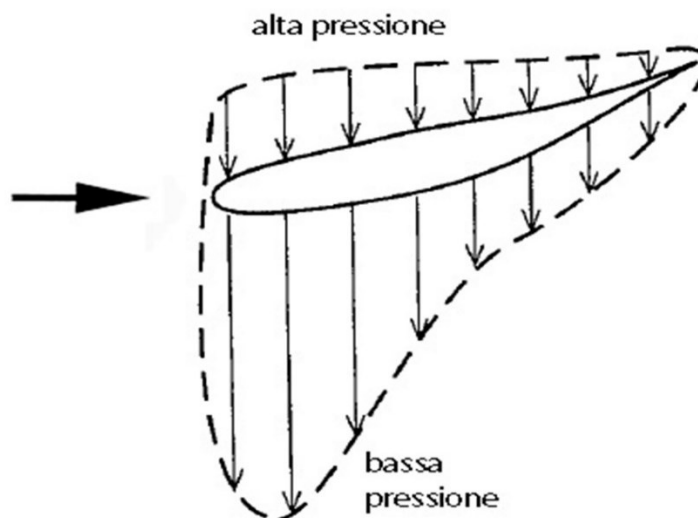


Figura 2.16: Variazione della distribuzione di pressione su un profilo deportante

2.9 I coefficienti C_L e C_D

Come definito precedentemente, le forze aerodinamiche sono causate dall'interazione tra un corpo solido e un fluido che lo investe, in particolare dall'attrito e dalla pressione che si generano sulla superficie.

Questo comporta la formazione di una forza risultante divisibile in due componenti, ovvero la RESISTENZA, che agisce in direzione parallela al moto del corpo, e la PORTANZA, che agisce invece in direzione perpendicolare.

A queste due azioni bisogna associare dei rispetti coefficienti, ovvero il **Coefficiente di Resistenza (C_D)**, e il **Coefficiente di Portanza (C_L)**, indipendenti dalla velocità del corpo e correlati alla geometria del corpo, in particolare dalla sua area frontale (figura 2.17).

Le formule che si utilizzano per calcolarli sono:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A}$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A}$$

In cui si ha:

- D = forza di Resistenza;
- L = forza di Portanza;
- ρ = densità del fluido;
- V_∞ = velocità del flusso indisturbato.

Per valutare gli effetti della variazione dei coefficienti, si possono utilizzare alcuni indicatori, quali il Numero di Reynolds (R_e), e l'Angolo di Attacco (AoA).

Il Numero di Reynolds va ad influenzare in maniera ragionevole il coefficiente di Resistenza. Infatti, per valori di $R_e < 1$, è determinato solamente dalla componente di

attrito. Al contrario, per $R_e > 1$, il valore diminuisce, data la formazione dello strato limite in prossimità del corpo.

Analizzando l'Angolo di Attacco, invece, si nota che il valore del coefficiente di Portanza varia in funzione della distribuzione di pressione. Nello specifico, dipende solamente da quest'ultima nel caso di angoli piccoli, mentre, per valori più elevati, dipende anche da una componente derivata dall'attrito.

In seguito, confrontando i due coefficienti, risulta che il valore del C_L è sempre maggiore del C_D in modulo, dato che bisogna specificare la configurazione del profilo che si sta studiando. In configurazione portante, il valore sarà positivo, mentre in configurazione deportante sarà negativo.

Questi coefficienti, inoltre, sono molto importanti, dato che sono utilizzati per valutare se il profilo alare studiato garantisce buone prestazioni aerodinamiche.

Dal rapporto del Coefficiente di Portanza e Resistenza, si determina l'EFFICIENZA AERODINAMICA:

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

Con questa espressione si evidenzia che una buona efficienza può essere garantita se il profilo preso in considerazione permette di avere valori di C_L molto elevati e, allo stesso tempo, valori di C_D estremamente bassi.


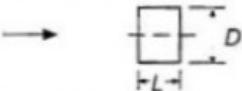
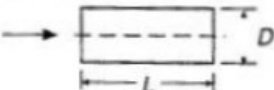




			C_L	C_D
1	Circular plate		0	1.17
2	Circular cylinder $L/D < 1$		0	1.15
3	Circular cylinder $L/D > 2$		0	0.82
4	Low drag body of revolution		0	0.04
5	Low drag vehicle near the ground		0.18	0.15
6	Generic automobile		0.32	0.43
7	Prototype race car		-3.00	0.75

Figura 2.17: Valori per forme fondamentali

2.10 L'Effetto suolo

Un ultimo importante fenomeno da considerare è l'EFFETTO SUOLO.

Si tratta di un fenomeno molto utilizzato nelle auto da corsa, che sfrutta l'aria passante nella parte sottostante la vettura mediante una configurazione particolare del fondo.

Fisicamente, si sfrutta una zona di depressione sotto il veicolo, così da generare una forza deportante che aumenti il carico applicato sulle ruote. L'effetto che si genera è detto EFFETTO VENTURI.

Nello specifico, si va a creare un volume di sezione ridotta tra il fondo e l'asfalto, in modo tale da avere una accelerazione del flusso e una pressione minore rispetto a quello nella parte superiore della vettura [4].

Per quanto riguarda il fondo, la conformazione longitudinale è caratterizzata dalle seguenti componenti (figura 2.18; 2.19):

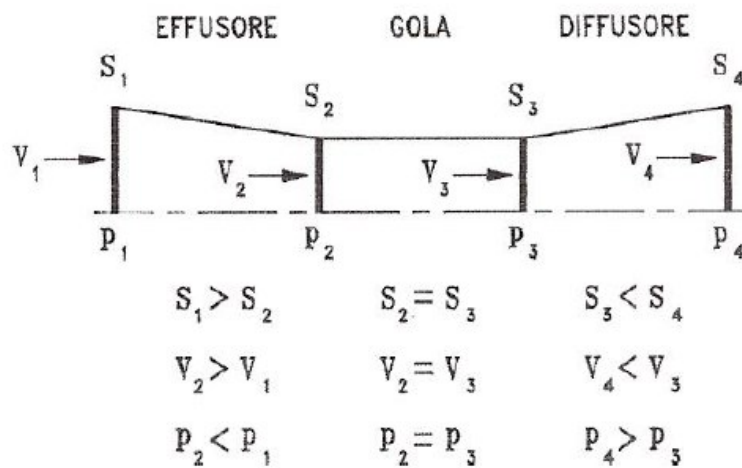


Figura 2.18: Schema longitudinale del fondo per generare l'Effetto Venturi

- EFFUSORE o CONVERGENTE, costituito dal bordo di entrata, realizzato in modo tale da accogliere la maggior quantità di flusso possibile;
- GOLA, costituito da un tratto costante per stabilizzare la velocità del flusso;
- DIFFUSORE o DIVERGENTE, costituito dal bordo di uscita, che consente di effettuare un'aspirazione del flusso, funzionando così da estrattore.

La generazione di questo effetto è strettamente legata alla distanza dal suolo. Infatti, al diminuire della distanza, questo comportamento aumenta in maniera considerevole fino a valori di 20-30 mm. Diminuendo ancor di più tale distanza però, il fenomeno si riduce fino a raggiungere un valore che ne comporta l'annullamento [5].

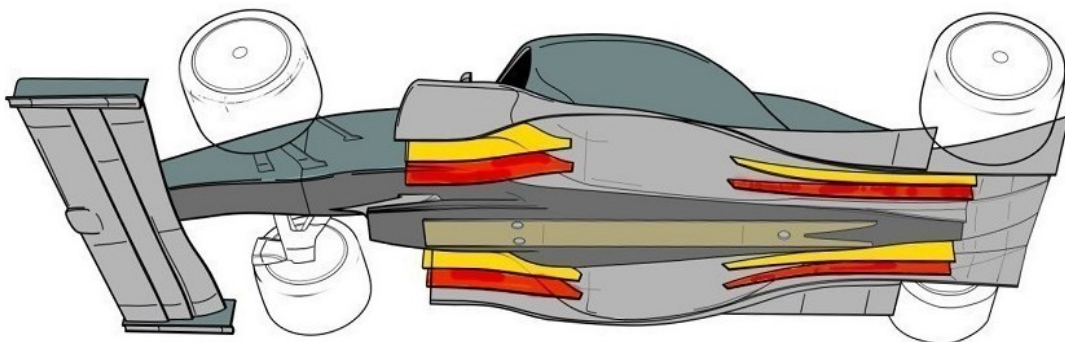


Figura 2.19: Fondo per effetto suolo nelle Vetture di Formula 1

CAPITOLO 3: IL SIDEPOD

3.1 Il sidepod: primi utilizzi ed evoluzione

I sidepod (o Pance Laterali), hanno un ruolo molto importante nel mondo delle competizioni automobilistiche, in particolare quelle dedicate alle monoposto, tra le quali la Formula 1 e le categorie minori associate.

Negli anni, per migliorare la loro funzione aerodinamica e strutturale, ingegneri e aerodinamici hanno sviluppato nuovi concetti per permettere alle vetture di raggiungere e superare limiti prestazionali che si pensava irraggiungibili.

Inizialmente, le vetture non erano dotate di questo elemento, dato che gli studi aerodinamici erano ancora poco sviluppati e gli unici riferimenti possibili imponevano auto caratterizzate da forme affusolate, definite a “sigaro “, testimoniato dalle prime vetture di Formula 1 nate negli anni Cinquanta.

Successivamente, visto l’enorme successo della competizione e lo sviluppo tecnologico, gli ingegneri hanno iniziato a sviluppare progetti che prevedevano una parziale trasformazione delle vetture nella zona laterale, come la Lancia D50 del 1954, (figura 3.1), dotata di “scatoloni laterali” per alloggiare i serbatoi del carburante e per migliorare il bilanciamento della vettura. Questa soluzione, però, non ebbe molto successo e venne accantonata dopo alcuni anni.



Figura 3.1: Lancia D50 del 1954

La vera evoluzione dei sidepod in ambito aerodinamico però, inizia negli anni 70, quando la scuderia March presenta la sua vettura per il campionato del 1970, la March 701 (figura 3.2). L'auto era dotata di due profili alari rovesciati, con lo scopo di migliorare la downforce e il bilanciamento della vettura in curva. Vista la buona competitività della vettura, questo nuovo concetto aerodinamico verrà poi copiato e migliorato dalle altre scuderie durante lo svolgimento del campionato. Inizia così l'era delle "wing cars".



Figura 3.2: March 701 del 1970

La massima espressione di questa soluzione si ritrova nella Lotus 78 del 1977 (figura 3.3). La vettura progettata da Colin Chapman era dotata di pance laterali molto lunghe, in cui erano presenti due ali rovesciate chiuse lateralmente tramite delle paratie laterali, e delle "minigonne" nella parte inferiore (figura 3.4), utilizzate per sigillare la macchina al terreno e per creare un effetto di "risucchio", denominato Effetto Venturi (figura 3.5).



Figura 3.3: Lotus 78 del 1977

Questa tipologia garantiva prestazioni aerodinamiche molto elevate ma, di conseguenza, rendeva le auto molto pericolose. Infatti, sia per la rottura dei meccanismi che regolavano le minigonne, sia per tratti di pista molto sconnessi, l'auto perdeva questo effetto e, in casi più gravi (ad esempio incidenti), l'auto poteva sollevarsi dal suolo. Per limitare ciò, nel 1983 la FIA impose restrizioni sull'utilizzo delle pance e l'abolizione dell'effetto suolo, il tutto per aumentare la sicurezza e garantire l'incolumità dei piloti. Si passò così al *Fondo Piatto*, in modo tale da garantire la downforce tramite l'ala anteriore, l'ala posteriore e il corpo vettura.



Figura 3.4: Pance e minigonne della Lotus 78

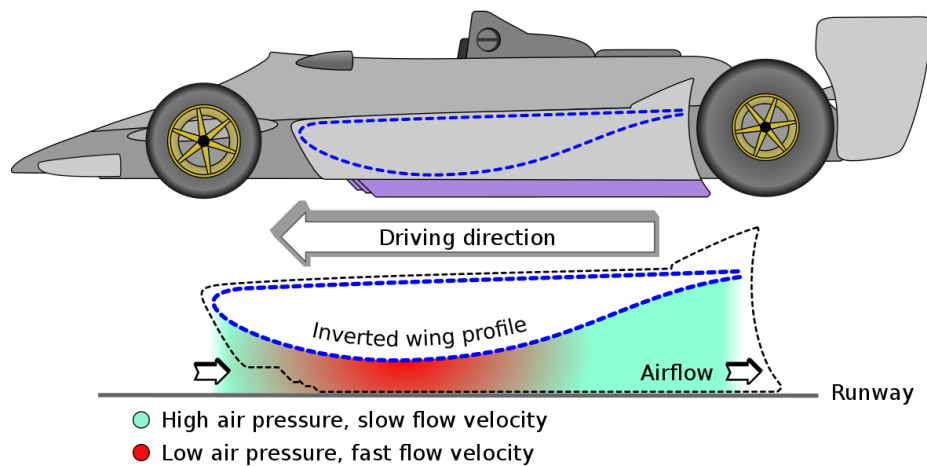


Figura 3.5: Effetto suolo generato tramite le pance della Lotus 78

3.2 Dalle limitazioni ai giorni nostri

Nonostante le limitazioni, i sidepod hanno mantenuto una notevole importanza negli studi aerodinamici e nel tempo hanno subito molti sviluppi in merito alla sicurezza, alla riduzione della resistenza all'avanzamento, all'aumento della deportanza e al raffreddamento delle componenti termiche della vettura.

In particolare, gli ingegneri hanno applicato sulle monoposto il modello del sidepod “a condotto” (figura 3.6), composto da un elemento aerodinamico chiuso nelle pareti laterali e aperto in ingresso e in uscita. Il tutto per migliorare la resistenza della vettura in caso di impatti laterali e per contenere le masse radianti collegate al comparto motore, garantendo così un maggiore livello di affidabilità ed efficienza. Nello specifico, questa tipologia era molto utilizzata data la buona gestione dei flussi verso la zona posteriore della vettura, dovuta ad una forte rastremazione che conferiva all'auto una forma a “collo di bottiglia” (figura 3.7), e l'evacuazione dei flussi caldi provenienti dal motore (garantita in uscita dal condotto e da aperture aerodinamiche dette *Prese Naca*).



Figura 3.6: Esempio di sidepod "a condotto" applicato sulla McLaren MP4/6 del 1991



Figura 3.7: Williams FW14B, caratterizzata dal collo di bottiglia nella zona posteriore

I test e le sperimentazioni in pista hanno portato alla creazione di diverse varianti di questi sidepod, tanto da diversificare la ricerca della prestazione e le auto in pista (figura 3.8; 3.9,3.10).



Figura 3.8: La Lambo 291 del Modena Team, caratterizzata da bocche di ingresso triangolari



Figura 3.9: Jordan 196 del 1996, dotata di sidepods con due ingressi



Figura 3.10: Ferrari 310 del 1996

L'aggiornamento dei regolamenti tecnici definito negli anni seguenti ha permesso di aumentare ancor di più le prestazioni e, contemporaneamente, la competitività delle varie squadre partecipanti al campionato. Pertanto, la sfrenata ricerca della prestazione e del successo ha portato i tecnici a sfruttare ogni minimo dettaglio dei regolamenti tecnici, determinando un ulteriore miglioramento delle nozioni e dei progetti studiati negli anni precedenti. In particolare, anche i sidepod hanno avuto un netto miglioramento, ottenuto tramite la reinterpretazione dei modelli sviluppati negli anni.

Un esempio lampante di questo sviluppo tecnologico è dimostrato dalla Ferrari F2004 progettata da Ross Brawn e Rory Byrne (figura 3.11), dotata di appendici aerodinamiche molto ricercate e da deviatori di flusso molto complessi (detti *Guide Vanes*), in modo tale da migliorare i flussi scorrono nella parte laterale ed eliminare vortici dannosi per le prestazioni della vettura.



Figura 3.11: La Ferrari F2004

Per il campionato di Formula 1 del 2022, i tecnici della FIA hanno reintrodotta l'Effetto Suolo, visti gli enormi passi avanti effettuati sulla sicurezza e, soprattutto, per aumentare il numero di sorpassi e rendere ancor più spettacolari le gare. In questo caso, quindi, la deportanza viene generata maggiormente dal fondo vettura, mentre la restante parte dalle ali e pance laterali.

Tramite queste ultime modifiche regolamentari, i sidepod, oltre a svolgere le funzioni di contenimento di radiatori e intercooler per la Power Unit (motore termico ed elettrico), subiscono modifiche aerodinamiche per far sì che generi minor drag possibile. Tutte queste modifiche risultano necessarie soprattutto per adattarli agli scopi definiti dal nuovo regolamento, ma allo stesso tempo per sfruttare l'effetto Venturi in modo ottimale. In particolare, si sono definite tre filosofie di pance laterali che hanno caratterizzato questo nuovo regolamento, ovvero quelle sviluppate da Red Bull, Ferrari e Mercedes (figura 3.12).



Figura 3.12: Confronto tra le filosofie applicate dalla Mercedes, Red Bull e Ferrari

La squadra austriaca della Red Bull ha sviluppato per la sua vettura, la RB18 (figura 3.13), un sidepod a condotto compatto, caratterizzato da una parte inferiore molto scavata e da uno “scivolo” nella parte posteriore, in modo tale da deviare il flusso verso la parte superiore del fondo e sfruttare il carico aerodinamico generabile dal diffusore e l’ala posteriore della vettura.



Figura 3.13: Dettaglio delle pance laterali della Red Bull RB18

Rispetto alla squadra avversaria, la Ferrari F1-75 (figura 3.14), presenta pance laterali totalmente differenti. In questo caso, sono molto larghe e generano deportanza tramite delle depressioni presenti sulla parte superiore, in modo tale da accelerare il flusso che scorre sul corpo vettura. Inoltre, sono presenti vistose aperture, simili a “branchie”, utilizzate per migliorare la dissipazione del calore proveniente dal motore.



Figura 3.14: Vista laterale del sidepod della Ferrari F1-75

Infine, sulla vettura della squadra tedesca Mercedes AMG, denominata W13 (figura 3.15), gli ingegneri hanno sviluppato la filosofia dello “Zero Sidepod”. Questa particolare configurazione prevede pance laterali molto strette e ravvicinate al telaio, e bocche di aspirazioni verticali. Inoltre, nella zona anteriore sono presenti delle specifiche appendici aerodinamiche per convogliare i flussi correttamente nella zona posteriore e lungo il corpo vettura.

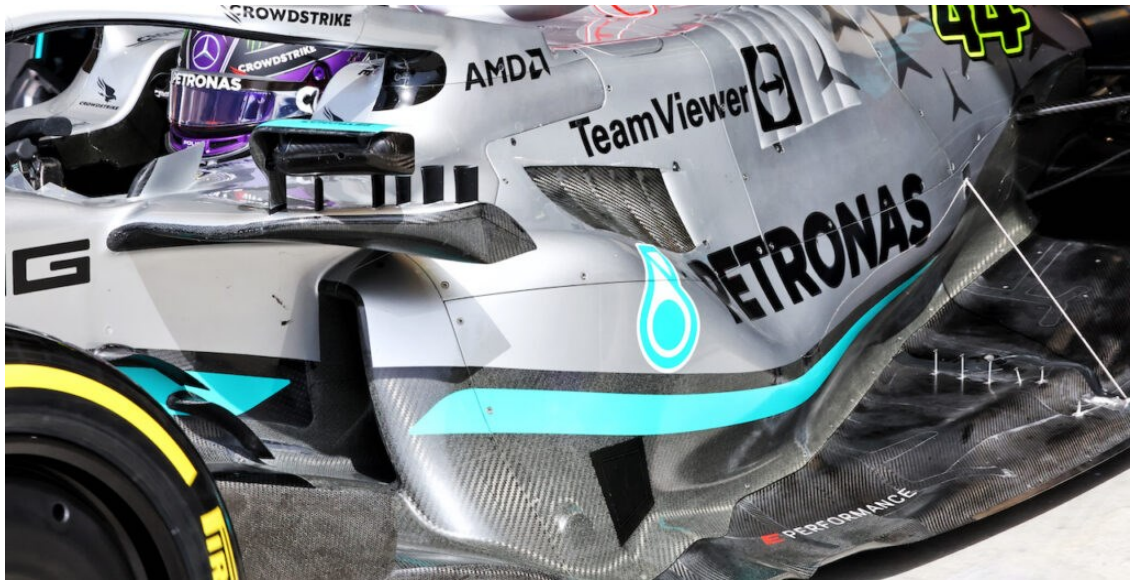


Figura 3.15: Dettagli del sidepod della Mercedes W13

CAPITOLO 4: RICHIAMI DI CFD

La risoluzione di problemi tramite l'analisi fluidodinamica è da sempre molto importante in ambito ingegneristico, in particolare in ambito automotive.

La complessa applicazione e le scarse potenze di calcolo delle apparecchiature durante i primi anni di sviluppo, ne hanno limitato l'utilizzo a soli casi molto basici, dato che i modelli matematici basati su equazioni differenziali utilizzati risultavano irrisolvibili analiticamente. Tuttavia, l'avanzare delle tecnologie e la maggiore comprensione dei metodi di risoluzione hanno permesso di sviluppare un nuovo metodo di calcolo, molto più veloce e preciso, ovvero la *Fluidodinamica Computazionale*. [10]

4.1 Il CFD

Il CFD (acronimo di Computational Fluid Dynamics), viene definito come un insieme di metodi numerici utilizzato per definire delle soluzioni approssimative di problemi fluidodinamici e di trasferimento del calore. Quindi, si basa sull'applicazione di modelli matematici sviluppati per ottenere risultati relativi allo studio di masse e scambi termici, considerando inoltre le proprietà di temperatura, densità e velocità. [2]

Dal punto di vista fisico, le equazioni che vengono considerate sono:

- Conservazione della Massa;
- Conservazione del Momento (II legge di Newton);
- Conservazione dell'Energia (I legge della Termodinamica).

L'analisi numerica serve principalmente a discretizzare il problema, ossia sostituire la soluzione di un insieme di equazioni approssimative valide di un dominio continuo in uno discretizzato. Perciò, il volume considerato verrà suddiviso in tanti volumi finiti, nel quale verranno applicati i metodi dell'analisi numerica. [3]

4.2 I programmi utilizzati

Per effettuare l'analisi numerica e valutare le prestazioni di una determinata configurazione aerodinamica, sono stati utilizzati due programmi:

- XFOIL: un programma interattivo utilizzato per la progettazione e l'analisi di profili alari subsonici isolati. Nello specifico, date le coordinate di un determinato profilo alare da analizzare in 2D e il numero di Reynolds, questo programma può determinare la distribuzione di pressione e le proprietà di portanza e resistenza. Inoltre, permette di variare il profilo dati dei parametri predefiniti (figura 4.1).
- STAR CCM+: un software commerciale di proprietà della Siemens, utilizzato per la fluidodinamica computazionale. Nello specifico, viene utilizzato per effettuare l'analisi numerica basata sul metodo dei volumi finiti (figura 4.2).[3]

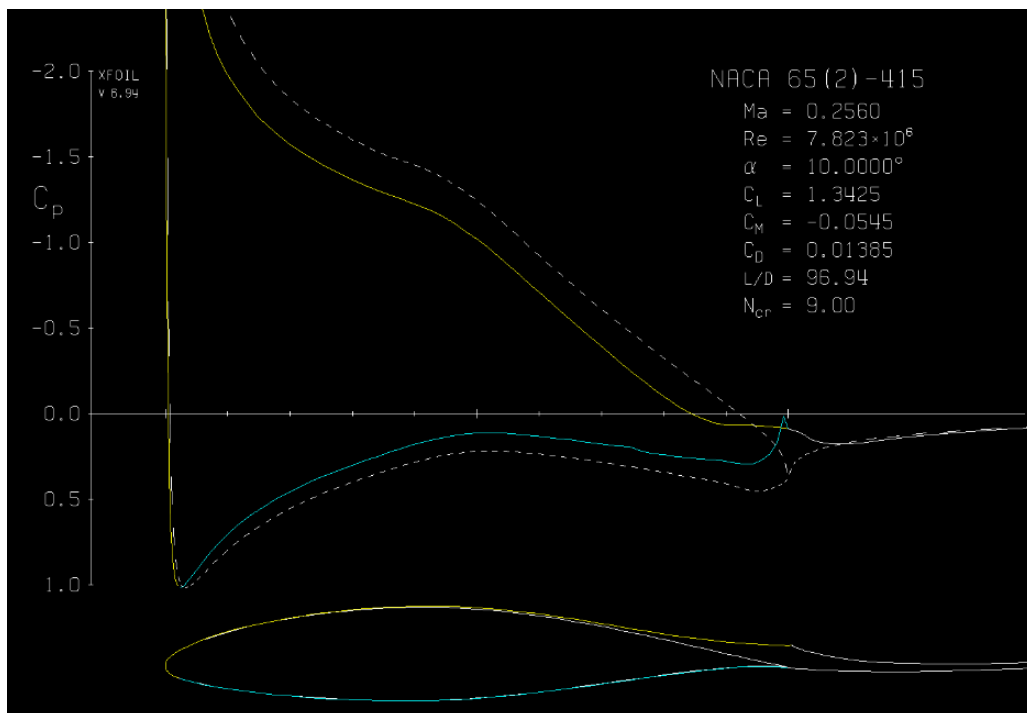


Figura 4.1: Esempio di analisi 2d effettuata in XFOIL

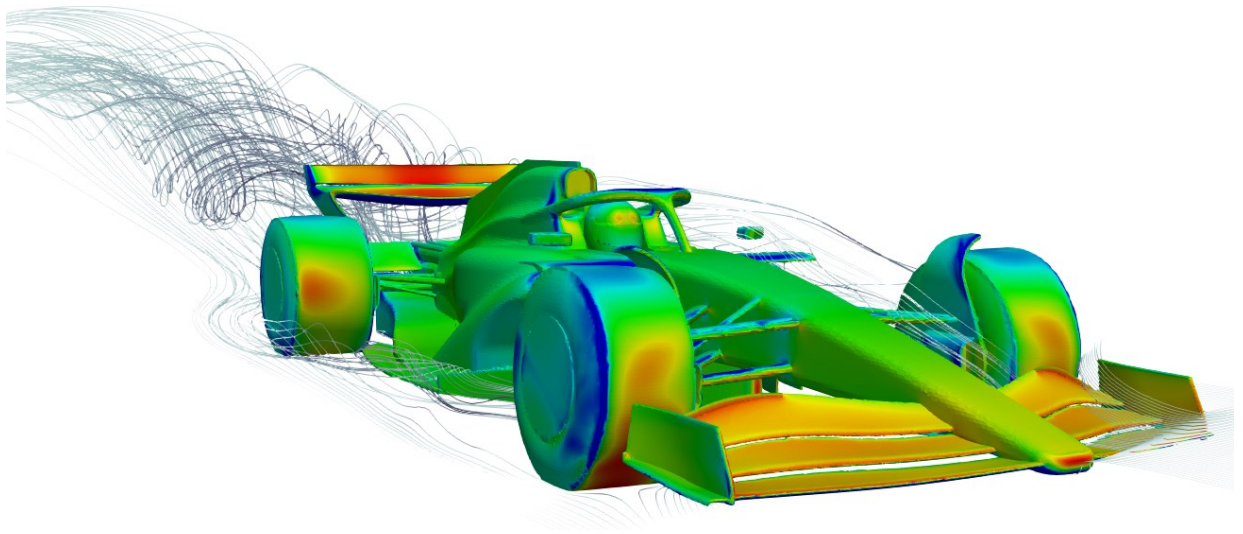


Figura 4.2: Esempio di analisi fluidodinamica in STAR CCM+

4.3 Impostazione di una simulazione CFD

Per ottenere uno studio corretto sull'aerodinamica di una vettura, è necessario specificare le fasi principali che caratterizzano l'impostazione di una simulazione CFD.

Queste fasi si dividono in:

- **IMPOSTAZIONE DELLA GEOMETRIA E REALIZZAZIONE DEL DOMINIO:** tramite appositi comandi, è possibile importare una geometria realizzata mediante programmi di Disegno Assistito al Calcolatore (CAD), e, in seguito, si procede realizzando attorno al modello un volume, che permette di studiare la geometria e simulare gli stessi fenomeni che si ottengono in una galleria del vento.
- **REALIZZAZIONE DELLA MESH:** in questa fase si realizza la discretizzazione del volume di controllo, ovvero, si divide il volume attorno al modello in volumi finiti. Per ottenere ciò, bisogna impostare diversi parametri,

riguardanti la forma e le dimensioni dei volumi e le diverse aree di studio. Inoltre, in casi in cui si vogliono ottenere soluzioni molto precise, si può discretizzare anche la geometria tramite il *Surface Wrapper*; in modo tale da facilitare la discretizzazione del volume di controllo attorno ad esso.

- **IMPOSTAZIONE DELLA FISICA E DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO:** prima di avviare l'analisi numerica, occorre impostare quali condizioni fisiche si hanno all'interno del volume di controllo. Nello specifico, bisogna specificare la tipologia di fluido che investe il corpo, la sua velocità all'ingresso del dominio, la sua interazione con ogni superficie del modello e se il corpo analizzato si trova in moto. Se si impostano correttamente tutti i parametri, si ha la possibilità di ottenere una buona analisi numerica e una buona rappresentazione dei fenomeni reali sul modello.
- **POST PROCESSING:** in questa fase si vanno a raccogliere i dati ottenuti dalla simulazione e che vogliamo analizzare. Mediante appositi comandi è possibile creare grafici in grado di confrontare diversi parametri tra loro in una zona specifica del dominio, come, ad esempio, i valori di resistenza e deportanza, mappe di pressione e linee di flusso. [3]

4.4 I metodi di risoluzione

Lo studio fluidodinamico deve saper analizzare in modo corretto i flussi che caratterizzano il dominio in cui è inserito il corpo. In generale, il moto dei flussi attorno ad un corpo risulta turbolento e caotico, quindi difficile da analizzare.

Per via di questa natura instabile, risulta impossibile effettuare un'analisi numerica diretta utilizzando le equazioni di Navier-Stokes, se non per alcuni casi semplificati.

È possibile sfruttare due metodi dediti alla simulazione numerica di flussi turbolenti:

- Il metodo LES (Large Eddy Simulation).
- Il metodo RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations);[10]

4.4.1 Confronto tra LES e RANS

Come definito precedentemente, gli approcci più efficaci per impostare uno studio fluidodinamico sono il metodo LES e RANS.

La modellazione LES viene particolarmente utilizzata in quanto il campo di velocità viene mediato nello spazio e, inoltre, riesce a simulare nello stesso momento i fenomeni turbolenti corrispondenti allo stato iniziale dello spettro turbolento.

La simulazione dei fenomeni turbolenti iniziali viene preferita dato che questi eventi dipendono dalla natura degli stessi. Questo perché le strutture turbolente di grande scala hanno un comportamento dinamico, dipendente dal tipo di corrente e dalla direzione di osservazione. Al contrario, quelle di piccola scala sono isotrope ed universali; perciò, la loro dinamica avrà comunque una natura universale.

L'approccio RANS (il metodo utilizzato nelle simulazioni descritte in questo elaborato), rispetto al precedente, va a derivare le equazioni applicate per le sole grandezze mediate nel tempo, partendo dalle equazioni di Navier-Stokes.

Le equazioni mediate sono simili alle Navier-Stokes, fatta eccezione per la divergenza del tensore degli sforzi di Reynolds che aggiunge altre sei incognite al problema.

Il problema da risolvere è detto *Problema di Chiusura della Turbolenza*, il quale viene risolto introducendo di modelli per le fluttuazioni turbolente. Tali modelli vanno a riprodurre l'azione dei termini fluttuanti sul moto medio, riconducendo i valori degli sforzi turbolenti a sole grandezze relative del moto medio. In molti casi, si sceglie di troncare il numero delle equazioni ad un certo ordine e modellare le incognite di ordine superiore con delle relazioni approssimate.

In conclusione, il metodo RANS viene particolarmente utilizzato rispetto al LES perché, nonostante non produca una perfetta descrizione dei flussi, riesce a garantire minor tempo di calcolo, semplicità di applicazione e maggiore esperienza sullo studio di flussi turbolenti.[10][11][12].

4.5 I modelli di turbolenza utilizzati

Dopo aver definito il metodo di calcolo per la simulazione, occorre definire i modelli di turbolenza da considerare nello studio del dominio.

In questo particolare caso di studio, è stato deciso di simulare i componenti aerodinamici ipotizzando:

- *Incomprimibilità*, dato che le velocità raggiunte dalla vettura non sono estremamente elevate. Questo comporta che le equazioni del moto e della massa sono definite considerando flusso incomprimibile;
- *Nessuno scambio termico*, quindi non è presente una risultante dell'equazione dell'energia;
- *Modello di Transizione Gamma Re-Theta*, dovuto a valori di Reynolds relativamente bassi e alla possibilità di una separazione locale che potrebbe verificarsi su corpo (fenomeno della *Bolla di Separazione Laminare*). Quindi, si hanno equazioni di quantità di moto e massa in configurazione RANS per sforzi viscosi turbolenti;
- *Modelli di Turbolenza K-Epsilon, K-Omega e SST Omega*, definiti per analizzare l'andamento degli sforzi viscosi turbolenti del flusso nel dominio di studio.

4.5.1 Modello di Transizione Gamma Re-Theta

Il modello di transizione Gamma Re-Theta si presenta come un metodo di risoluzione a due equazioni, definito per la modifica delle equazioni di trasporto turbolento e per simulare stati laminari, turbolenti e passaggio da stati laminari a turbolenti di un flusso.

Tramite il sistema di due equazioni, è possibile modellare sia le tendenze locali che quelle globali. Infatti, con l'*intermittenza* (o gamma) (figura 4.3), si determina la percentuale di tempo in cui il flusso è turbolento (0 se completamente laminare, 1 se completamente turbolento).

Infine, il modello non va a modificare l'impostazione fisica della simulazione, ma introduce solamente nuovi processi di transizione nella sua formulazione. [13]

Per intermittenza γ

$$\frac{\partial(\rho\gamma)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \gamma)}{\partial x_j} = P_\gamma - E_\gamma + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_f}{\sigma_f} \right) \frac{\partial \gamma}{\partial x_j} \right]$$

Figura 4.3: Equazione per l'intermittenza

4.5.2 Modello di Turbolenza K-Epsilon

È il modello matematico più comunemente utilizzato in fluidodinamica computazionale, in particolare per simulare le caratteristiche medie del flusso in condizioni turbolente. Fa parte dei modelli a due equazioni, e dà una descrizione generale della turbolenza utilizzando due equazioni alle derivate parziali per il trasporto di K (l'energia cinetica turbolenta) ed ε (la velocità di dissipazione dell'energia cinetica turbolenta).

Nello specifico, si concentra sui meccanismi che vanno a modificare l'energia cinetica turbolenta, considerando come ipotesi principale l'isotropia di quest'ultima. [14]

4.5.3 Il modello di Turbolenza K- Omega

Come il modello precedente, il modello di Turbolenza K-Omega è determinato da un sistema di due equazioni, utilizzato per approssimare le equazioni di Navier-Stokes mediate nel tempo tramite due variabili, la K (l'energia cinetica turbolenta), e la ω (la velocità di dissipazione), e per prevedere gli andamenti turbolenti.

Il modello standard utilizza la “eddy viscosity” (ν_T), ossia una soluzione che ignora il moto dei vortici su piccola scala, mentre calcola quelli su larga scala con una viscosità effettiva.

La viscosità effettiva (ν_T), viene calcolata come K / ω , mentre, l’evoluzione di K e ω viene definita come (figura 4.4) [15]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} &= \rho P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_k \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \quad \text{with } P = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} &= \frac{\alpha \omega}{k} \rho P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_\omega \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\rho \sigma_d}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}.\end{aligned}$$

Figura 4.4: Equazioni di evoluzione per K e Ω

4.5.4 Il modello di Turbolenza SST Omega

Il modello SST K-Omega, meglio definito come *Shear Stress Transport di Menter* (figura 4.5), è un modello di turbolenza parassita a due equazioni. Viene introdotto per affrontare la forte sensibilità del flusso libero e per migliorare le previsioni sui gradienti di pressione avversi. Inoltre, va a combinare le caratteristiche dei metodi definiti precedentemente, in modo tale che la K-Omega venga utilizzato nella regione interna dello strato limite, mentre il K-Epsilon nella regione di flusso libero.

Viene regolato dalla viscosità effettiva e le equazioni che lo caratterizzano sono [16]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} &= P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} &= \frac{\gamma}{\nu_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\end{aligned}$$

Figura 4.5: Equazioni del modello SST-OMEGA

4.6 La discretizzazione del dominio

Per poter risolvere numericamente le equazioni Navier-Stokes, bisogna discretizzare il dominio di studio nello spazio e nel tempo. Discretizzare le equazioni nello spazio consiste nel suddividere il dominio fluido tramite una serie di volumi più piccoli, in modo da costruire una griglia di calcolo, detta *Mesh*.

Le griglie possono essere di diverso tipo a seconda del tipo di problema da analizzare. In generale, la distribuzione delle griglie si divide in:

- *Body-Fitted*, la griglia segue fedelmente la geometria dei contorni dello spazio fisico in cui il flusso si muove;
- *Griglie Cartesiane*, in cui la griglia non segue la geometria fisica del problema, ma presenta i bordi delle celle paralleli alle coordinate cartesiane.

La griglia di tipo *body-fitted* (figura 4.6), ha il vantaggio di essere più adatta alla risoluzione dei flussi di strato limite, di contro il suo utilizzo diventa più complicato per geometrie più complesse. La griglia di tipo *cartesiano* (figura 4.7), al contrario, risulta più adatta allo studio dell'evoluzione dei flussi.

Tuttavia, la necessità di controllare ciò che avviene all'interno dello strato limite ha fatto sì che, in ambito ingegneristico, la prima tipologia sia preferita [10].

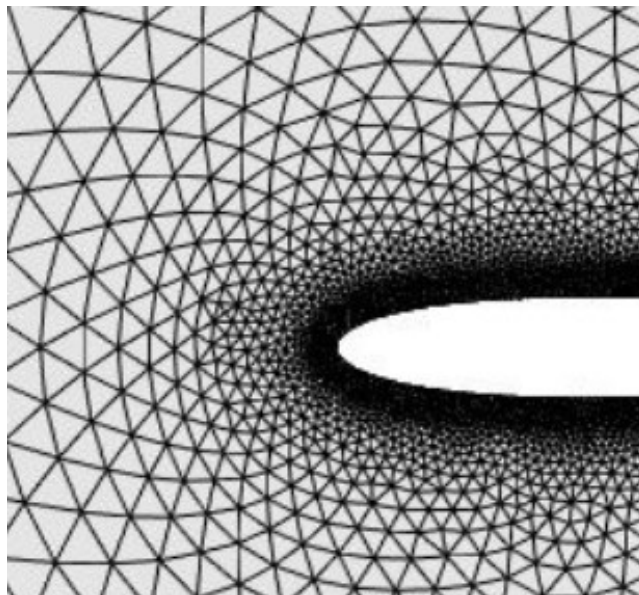


Figura 4.6: Griglia Body-Fitted

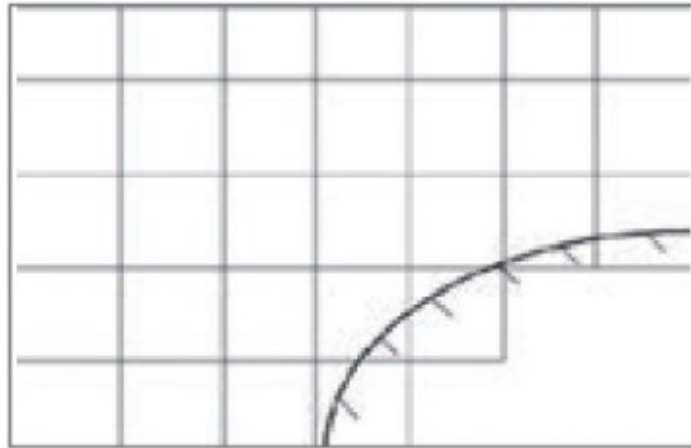


Figura 4.7: Griglia cartesiana

4.6.1 Il metodo dei Volumi Finiti

Esistono diversi metodi per discretizzare nello spazio le equazioni di Navier-Stokes. Questi possono essere raccolti in tre gruppi principali:

- schemi alle differenze finite;
- schemi a volumi finiti;
- schemi agli elementi finiti.

L'unico che si va ad approfondire è il secondo, in quanto è quello utilizzato per la discretizzazione delle simulazioni.

Questo viene utilizzato con la formulazione integrale delle equazioni di Navier-Stokes, in modo tale da soddisfare automaticamente le leggi di conservazione di massa, quantità di moto ed energia. La discretizzazione delle equazioni di Navier-Stokes parte dalla suddivisione del dominio fisico in un numero arbitrario di volumi di controllo poliedrici, con i quali è possibile approssimare gli integrali di superficie come somma dei flussi che attraversano le singole superfici dei diversi volumi di controllo.

I vantaggi introdotti dagli schemi ai volumi finiti sono diversi:

- buona capacità di adattamento a griglie body fitted o cartesiane (possibilità di studiare geometrie complesse);
- nessuna trasformazione del sistema di coordinate da fisico a numerico, visto che la discretizzazione è effettuata direttamente sullo spazio fisico [10]

4.7 Le simulazioni 2D

Le simulazioni 2D vengono sono effettuate nella prima fase di uno studio aerodinamico, ovvero la ricerca del profilo ideale.

Inizialmente, sono realizzate tramite XFOIL, per poi essere approfondite in STAR CCM+ nel caso in cui è necessario effettuare modifiche relative all'*Angolo di Attacco* (AoA) e alla posizione di eventuali flap aggiuntivi rispetto al profilo principale, detto *main*. [3]

4.7.1 Impostazione della mesh

Nelle simulazioni 2D effettuate in STAR CCM+, si è scelta una mesh poligonale, ovvero la più usata nello studio di profili 2D. In questa fase, inoltre, è fondamentale evitare brusche variazioni di dimensione delle celle durante la realizzazione della mesh, date che potrebbero causare errori numerici durante le iterazioni.

I parametri base impostati per realizzare la mesh 2D sono i seguenti (figure 4.8,4.9,4.10):

- Base Size: 0.1 [m];
- Target Surface Size: 0.1 [m];
- Minimum Surface Size: 0.001 [m].

Inoltre, sono stati applicati controlli specifici sulle seguenti superfici:

- In prossimità della superficie del profilo è stato applicato un Target Surface Size di 0.005 [m], un Minimum Surface Size di 0.001 [m] e 30 Prism Layer 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 di 0.01 [m] e 30 Prism Layer con uno spessore totale di 0.016 [m].

Infine, è stato inserito il seguente controllo:

- Controlli volumetrici in corrispondenza del bordo di attacco con una Custom Size di 0.003 [m].

Tramite queste impostazioni, si è ottenuta una mesh suddivisa in 517'949 celle [3].

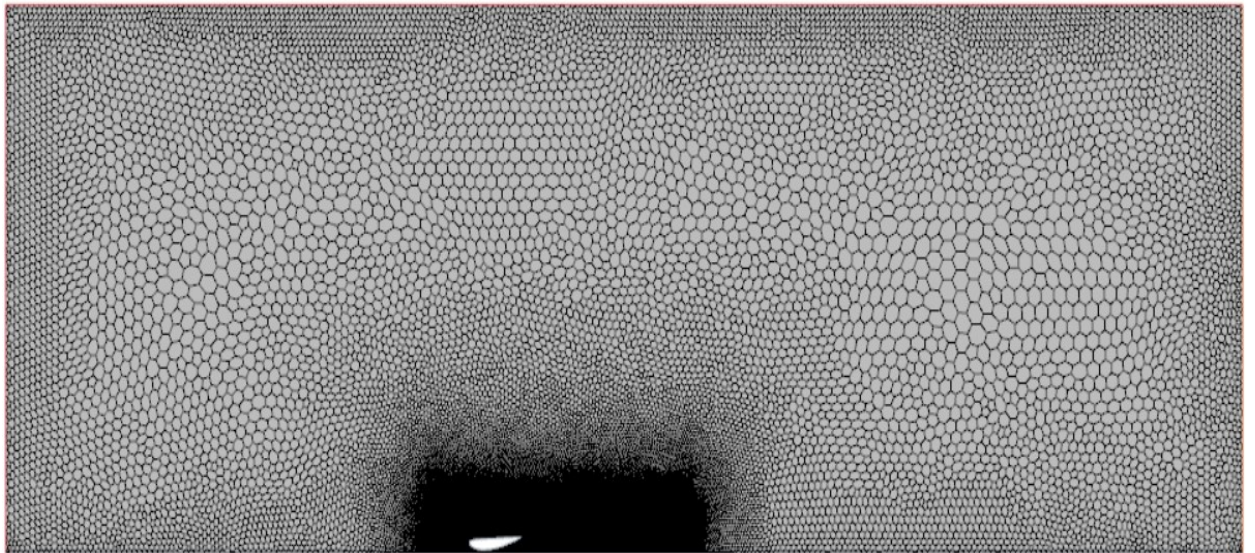


Figura 4.8: Mesh dell'intero dominio studiato in 2D su STAR CCM+

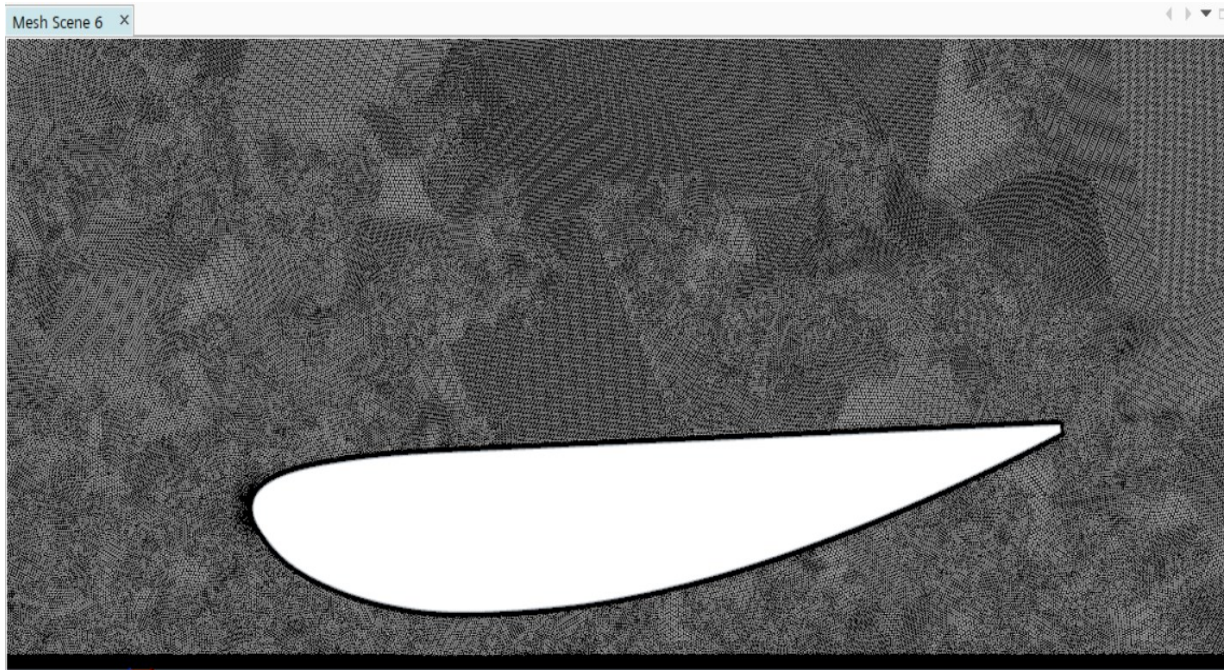


Figura 4.9: Mesh in prossimità del profilo

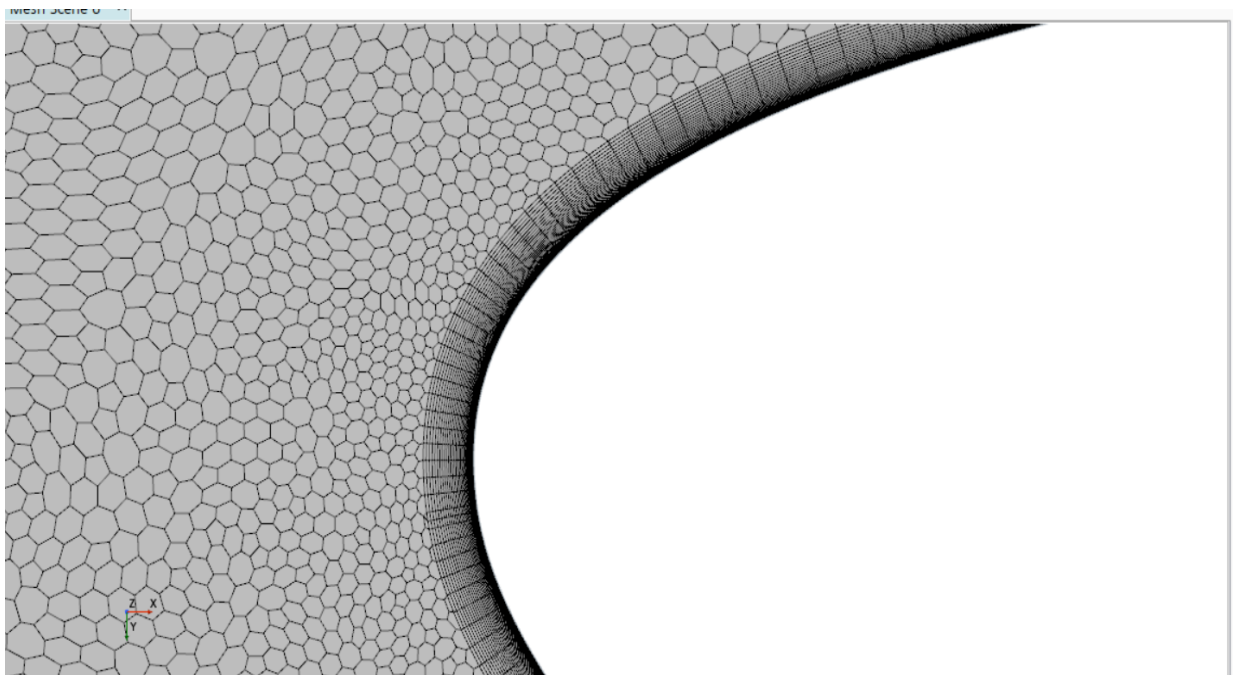


Figura 4.10: Dettaglio della mesh in prossimità del naso del profilo

4.7.2 Impostazione della Fisica e delle condizioni al contorno

Per le superfici che determinano il dominio di studio, sono state impostate le seguenti condizioni:

- Il terreno (o ground), è stato settato come *Wall* ed è stata impostata una velocità di 16 [m]/[s] lungo l'asse x (asse parallelo al terreno in questo caso);
- Tutte le superfici di studio sono state settate come *Wall* e con velocità nulla;
- La superficie di ingresso dell'aria nel dominio è stata impostata come *Velocity Inlet* e con una velocità dell'aria pari a 16 [m]/[s];
- La superficie di uscita è stata impostata come *Pressure Outlet* senza variare i valori di default [3].

Infine, i modelli utilizzati per la risoluzione delle equazioni sono (figura 4.11):

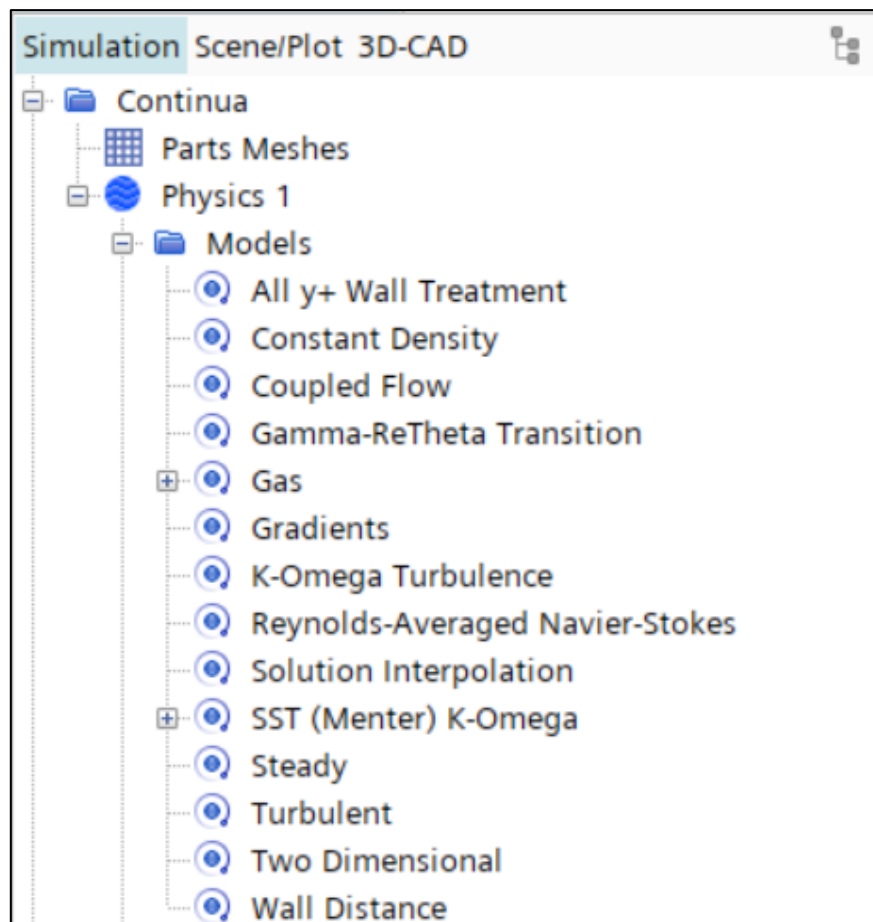


Figura 4.11: Modelli utilizzati per la simulazione 2D

4.8 Le simulazioni CFD 3D

In seguito ai risultati ottenuti mediante le simulazioni 2D, si procede con uno studio più approfondito della geometria tramite le simulazioni CFD in 3D. Come per le analisi precedenti, è importante impostare in maniera corretta i parametri necessari, il tutto per non compromettere le analisi svolte e i risultati. Per evitare ciò, è stata seguita una *Best Practice*, una guida fornita dalla Siemens, sviluppata appositamente per le esigenze delle squadre di Formula SAE.

Tutti i parametri settati sono comuni a tutte le simulazioni svolte e mostrate in seguito, in modo tale da poterle confrontare tra loro. Inoltre, i grafici ottenuti mediante le analisi variano in base ai dati che si vogliono confrontare.

In generale, i risultati più importanti in una analisi numerica per lo sviluppo aerodinamico sono i valori di deportanza, resistenza e i valori dei coefficienti adimensionali C_L e C_D [3].

4.8.1 Il dimensionamento del dominio

Nelle simulazioni 3D svolte si è scelto di simulare solamente la geometria relativa a un solo lato della vettura, in modo tale da diminuire i tempi delle iterazioni e favorire

la correttezza dei valori in uscita. In questo caso, il piano di simmetria della vettura è stato impostato come *Symmetry Plane*.

Successivamente, per la realizzazione e il dimensionamento del dominio sono stati seguiti i riferimenti presenti all'interno della guida di Siemens (figura 4.12) [3]:

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

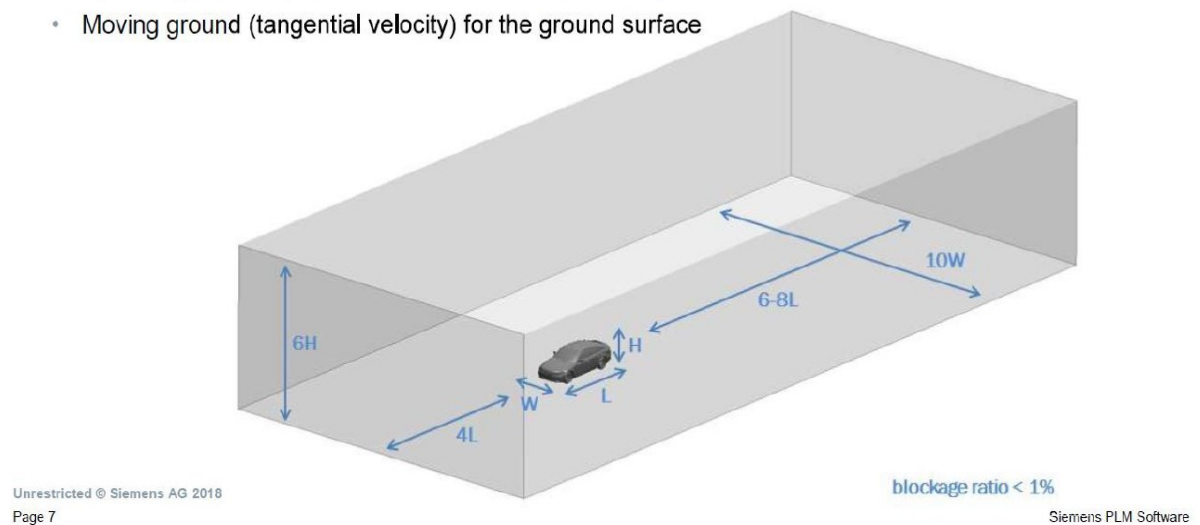


Figura 4.12: Dimensioni del dominio consigliate dalla guida della Siemens

4.8.2 Impostazione della mesh

I parametri base impostati per realizzare la mesh 3D (figure 4.13,4.14,4.15), sono i seguenti:

- Base size: 1.0 [m];
- Target Surface Size: 0.01[m];
- Minimum Surface Size: 0.001[m];

Inoltre, sono stati applicati controlli specifici sulle seguenti superfici:

- In prossimità delle superfici soggette allo studio aerodinamico è stato applicato un Target Surface Size di 0.002 [m], un Minimum Surface Size di 0.0005 [m] e 30 Prism layer con uno spessore totale di 0.005 [m];

- In prossimità della superficie relativa al terreno è stato un Target Surface Size di 0.1 [m], un Minimum Surface Size di 0.01 [m] e 30 Prism Layer con uno spessore totale di 0.016 [m];
- In prossimità della superficie relativa al telaio della vettura (symmetry Plane), è stato impostato un Target Surface Size di 0.2 [m], un Minimum Surface Size di 0.006 [m] e 2 Prism Layer con uno spessore totale di 0.006 [m].

Infine, è stato inserito il controllo volumetrico in corrispondenza del bordo di attacco con una Custom Size di 0.003 [m].

Tramite queste impostazioni, si è raggiunta una mesh con un numero complessivo di celle pari a 4 milioni.

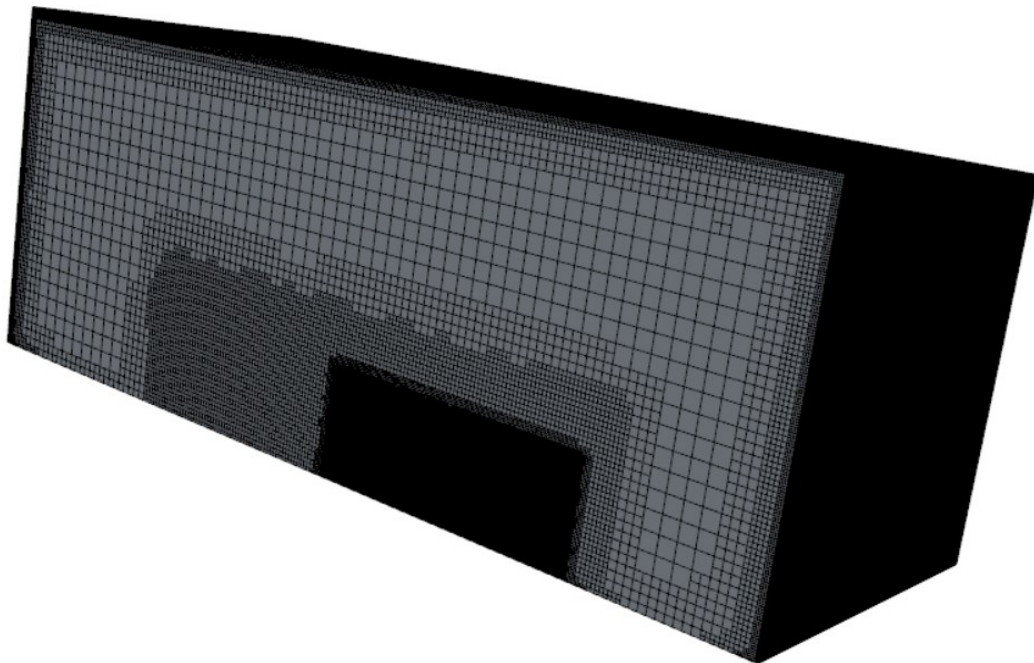


Figura 4.13: Mesh 3D del dominio di studio

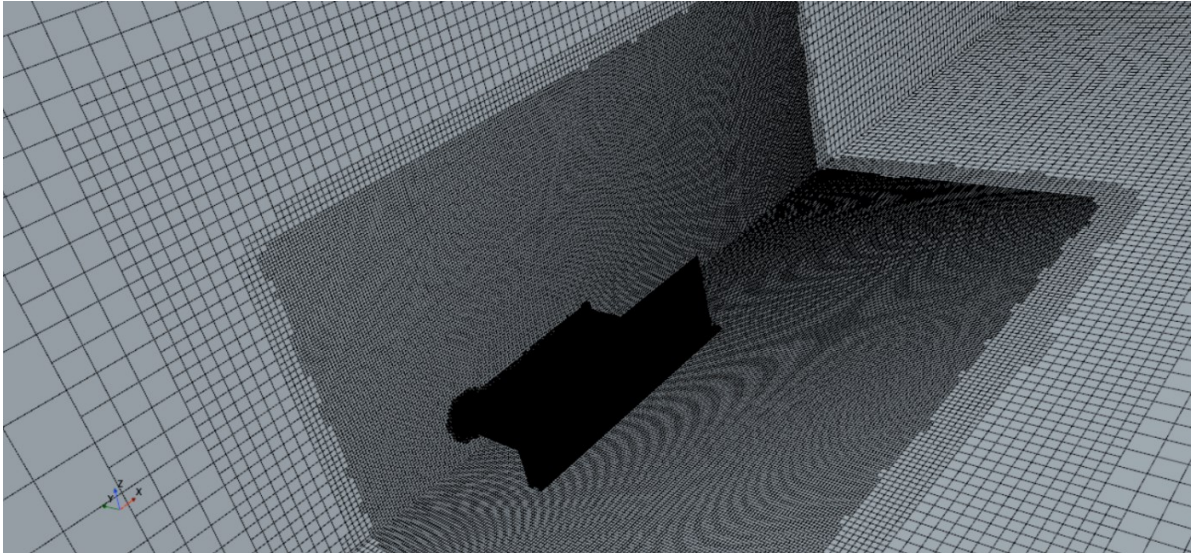


Figura 4.14: Dettaglio della mesh intorno al sidepod

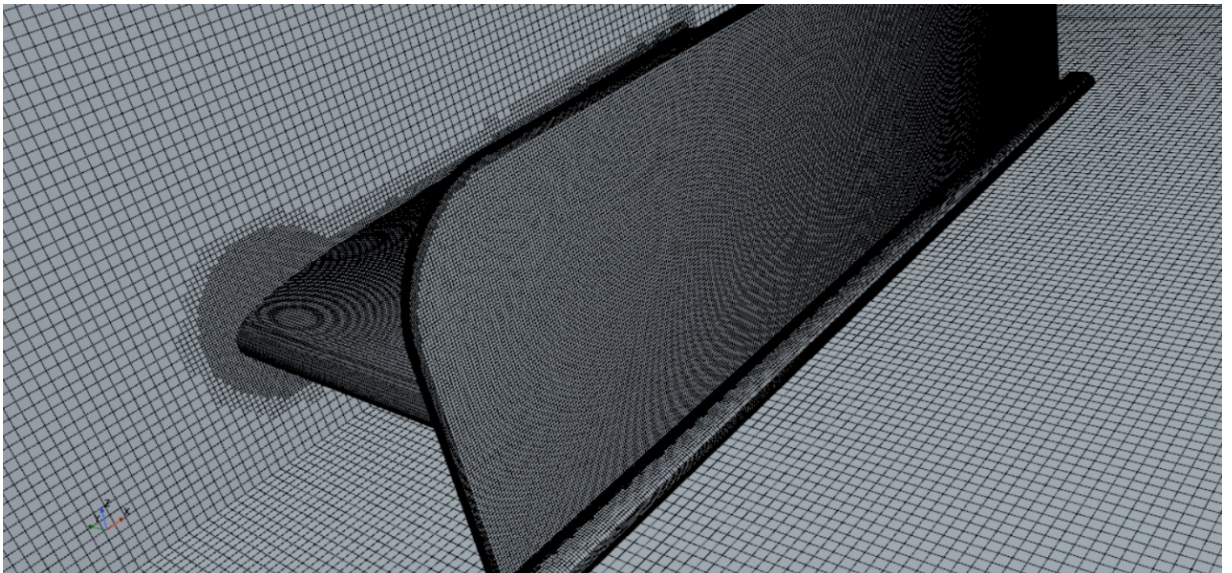


Figura 4.15: Mesh 3D sul sidepod

4.8.3 Impostazione della Fisica e delle condizioni al contorno

Per le superfici che determinano il dominio di studio, sono state impostate le seguenti condizioni:

- Il terreno (o ground), è stato settato come *Wall* ed è stata impostata una velocità di 16 [m]/[s] lungo l'asse x (asse parallelo al terreno);
- Tutte le superfici di studio sono state settate come *Wall* e con velocità nulla;
- La superficie di ingresso dell'aria nel dominio è stata impostata come *Velocity Inlet* e con una velocità 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 utilizzati per la risoluzione delle equazioni sono (figura 4.16):

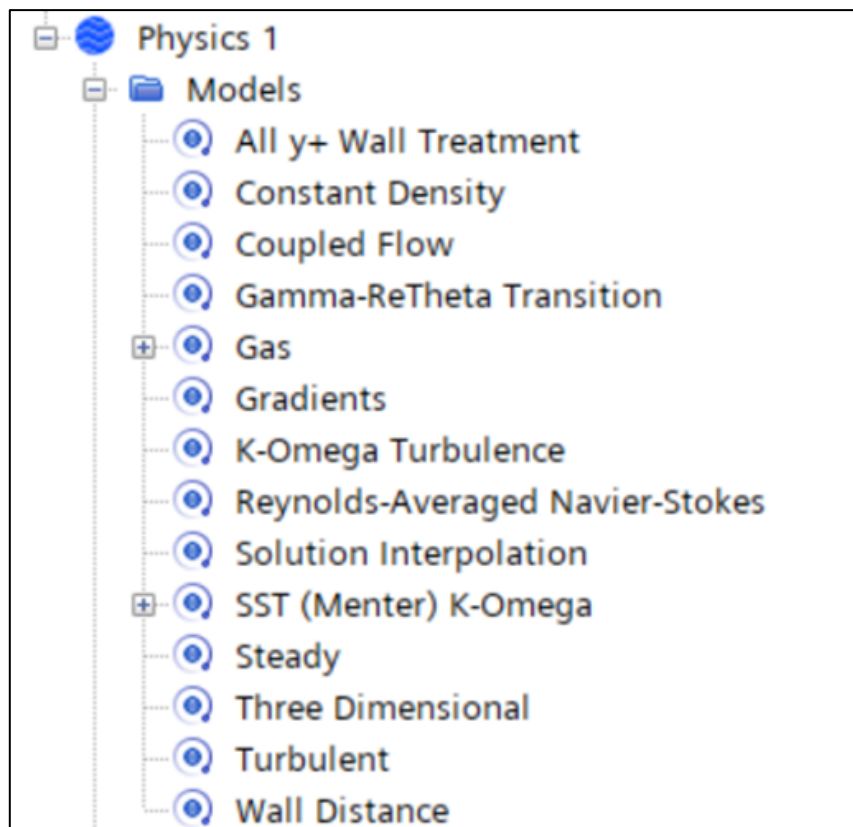


Figura 4.16: Modelli fisici impostati per lo studio 3D

CAPITOLO 5: LA PROGETTAZIONE DEL SIDEPOD

Il passaggio da una vettura dotata di un motore a combustione interna ad una con motore elettrico ha permesso al Polimarche Racing Team di rivedere i concetti utilizzati nelle vetture precedenti e apportare modifiche e miglioramenti in ogni settore di lavoro, compreso il reparto di Aerodinamica.

Quindi, risulta fondamentale impostare uno studio corretto per l'aerodinamica della nuova auto, la P5, considerando sia l'aspetto progettuale sia quello di realizzazione e test.

A tal proposito, in questo capitolo si vanno a descrivere i passaggi principali per la prima valutazione e progettazione del sidepod, evidenziandone i punti di forza e le eventuali criticità.

5.1 Approccio alla progettazione

Prima di procedere con la progettazione, è necessario consultare il regolamento redatto dalla Formula S.A.E, in modo tale da rispettare tutti i parametri progettuali richiesti.

Secondo il regolamento tecnico:

- nella zona laterale della vettura, non è possibile posizionare elementi sopra ed all'esterno delle ruote, mentre si può sfruttare lo spazio interno compreso tra quest'ultime e telaio;
- si può utilizzare tutta la zona definita dal passo della vettura, a patto che il sidepod mantenga una distanza di 75 [mm] dalle ruote, e un'altezza minima dal terreno di 30 [mm];
- le componenti aerodinamiche nella zona laterale della vettura non possono essere più larghe dello spazio definito tra telaio e la parte esterna delle ruote;
- l'altezza massima delle componenti aerodinamiche deve essere al massimo di 500 [mm] partendo dal terreno;

- i bordi che possono essere a contatto con persone devono avere un raggio minimo di 5 [mm] orizzontalmente e 3 [mm] verticalmente (figura 5.1).

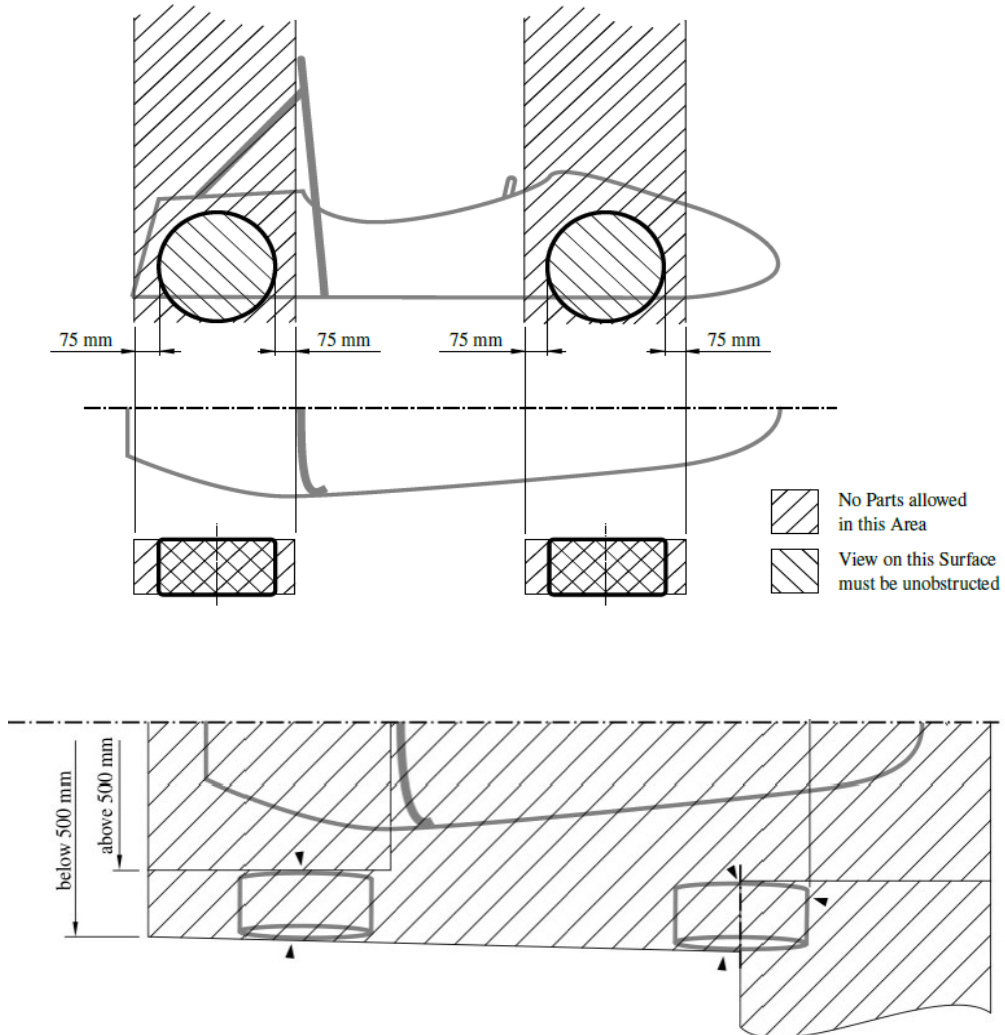


Figura 5.1: Regolamento Formula S.A.E

Tenendo conto di questi riferimenti, è possibile definire la tipologia di sidepod che si vuole studiare e adottare sulla vettura.

5.2 Il sidepod

Come definito precedentemente in questo elaborato, la scelta di sviluppare una vettura elettrica ha determinato uno stravolgimento dei concetti aerodinamici adottati sulla vettura precedente della squadra, la P4 EVO (figura 5.2).

In particolare, sono stati presi in esame i sidepod e il fondo piatto utilizzati fino ad ora, considerati non adatti agli obiettivi posti per la realizzazione della P5. Questo perché:

- i sidepods, nonostante fossero caratterizzati da una geometria abbastanza complessa, venivano utilizzati per contenere le masse radianti dedicate al raffreddamento del motore termico. Inoltre, rispetto alle altre superfici aerodinamiche, generavano una forza portante;
- il fondo non funzionava correttamente vista la sua estrema dipendenza dal *T-tray* (figura 5.3), dal *diffusore* (figura 5.4), e per la sua difficile progettazione.



Figura 5.2: La P4 EVO durante una manifestazione

Per cercare di risolvere queste problematiche, si è scelto di adottare un *sidewing* (figura 5.5), con lo scopo di sostituire entrambi i componenti e ottenere:

- minore ingombro rispetto ai sidepods precedenti, dovuto allo spostamento delle masse radianti nella zona posteriore della vettura, liberando lo spazio necessario all'applicazione dell'effetto suolo;
- massimizzazione della downforce, date le buone proprietà aerodinamiche dei profili alari deportanti e le molteplici configurazioni applicabili per tale soluzione.

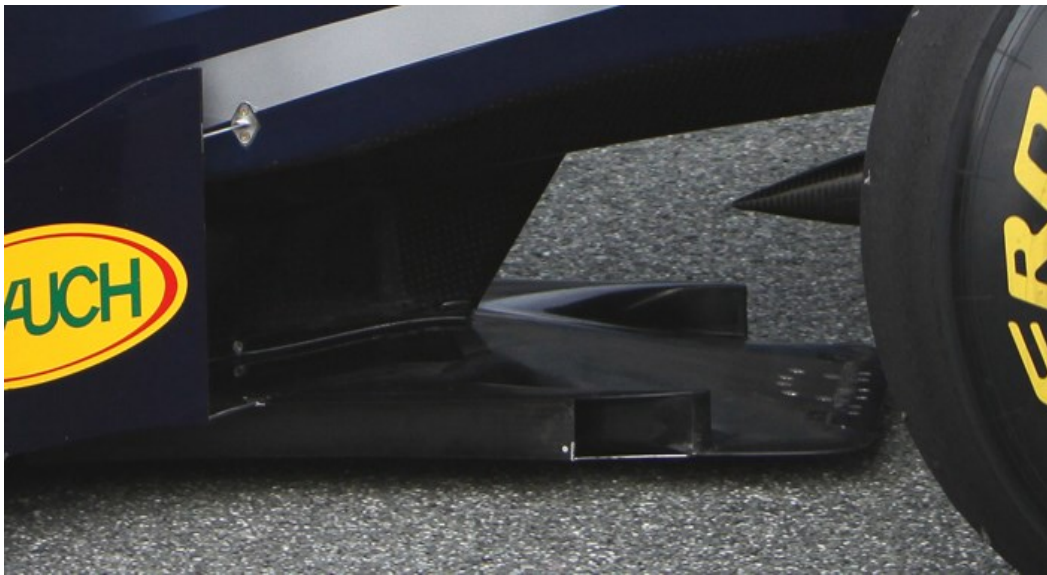


Figura 5.3: T-tray di una vettura di formula uno



Figura 5.4: Il diffusore utilizzato sulla P4EVO

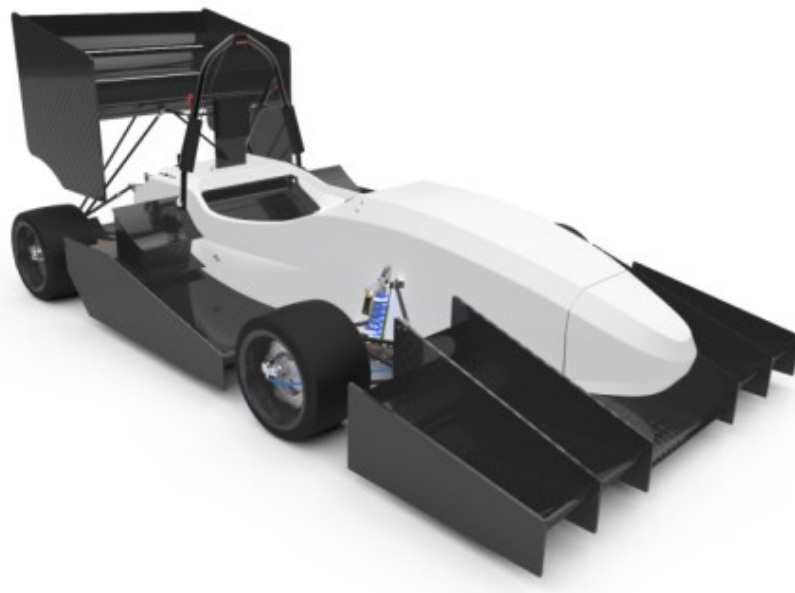


Figura 5.5: Vettura dell'Università di Delft, la DU15, che utilizza una sidewing

5.2.1 Scelta del profilo

Prima di realizzare il modello CAD del sidepod, occorre scegliere il profilo alare. Dato che gli obiettivi principali, oltre a quelli elencati in precedenza, sono la riduzione di drag e un aumento della downforce nella zona di studio, si è preso in considerazione un profilo piano-convesso, denominato CLARK Y, (figura 5.6).

Nello specifico, questa scelta è stata presa per i seguenti motivi:

- scarsa conoscenza dei flussi nella zona di interesse, quindi non si sono considerati profili molto particolari;
- buona flessibilità di utilizzo e adattabilità;
- buoni valori di deportanza e bassa resistenza;
- fenomeno dello stallo graduale e poco violento;
- buoni risultati in studi precedenti.

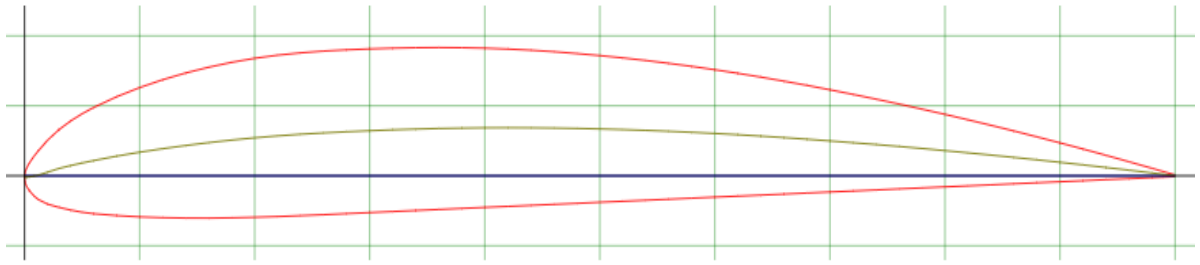


Figura 5.6: Profilo CLARK Y scelto per il progetto

5.2.2 Prove svolte su Xfoil

Per comprendere il comportamento del profilo di partenza, è stata impostata un'analisi numerica preliminare tramite il programma Xfoil.

In particolare, lo studio si è concentrato sul determinare i valori dei coefficienti di C_L e C_D e di efficienza E in flusso libero mediante la variazione dello spessore, partendo dalla configurazione base con spessore dell'11,7% rispetto la lunghezza della corda fino al 28%.

I valori ipotizzati per considerare accettabili le diverse alternative sono:

- Coefficiente C_L maggiore di 1,2;
- Coefficiente C_D molto basso;
- Efficienza E elevata.

Successivamente, per effettuare le simulazioni, sono stati impostati i seguenti parametri:

- coordinate dei profili relative allo spessore preso in considerazione (prese dal sito Airfoil-Tools.com);
- angoli di attacco che vanno da -5 a 25 gradi;
- Numero di Reynold $Re = 750000$;
- Iterazioni massime = 150 (laddove il programma non è riuscito a raggiungere la convergenza, il parametro relativo non è stato inserito nei risultati finali).

I dati ottenuti dalle simulazioni sono riassunti nella tabella seguente (tabella 5.1):

SPESSORE	Max CL		MIN CD		MAX E		alfa to CL=0
	valore	alfa	valore	alfa	valore	alfa	
11,7	1,486	14	0,0058	0,8	108,67	3,2	-3,61
14	1,496	14,1	0,0066	1,4	108,15	3,1	-4,48
16	1,660	16,2	0,0073	1,5	106,05	2,7	-4,478
18	1,749	16,1	0,0081	1,8	101,64	3,1	-5,4636
20	1,798	17,9	0,0091	2,2	93,67	3	-6,1108
22	1,825	19,6	0,0105	0,1	81,60	3,2	-6,6957
24	1,830	21,8	0,0115	-1,6	67,61	3,5	-7,2608
26	1,222	9	0,0124	-3,1	57,89	2,3	-7,583
28	1,166	8,9	0,0135	-3,5	49,63	2	-7,9584

Tabella 5.1: Valori ottenuti dalle simulazioni effettuate in Xfoil

Gli ultimi due dati sono evidenziati, in quanto il programma non è riuscito a raggiungere un risultato per gli angoli superiori a 9 gradi. Il manuale del programma spiega che il motivo dell'errore è da attribuirsi quasi esclusivamente ad una propria limitazione di carattere matematico.

In seguito, sono stati realizzati ulteriori grafici che descrivono più dettagliatamente i valori delle simulazioni effettuate (figure 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13)

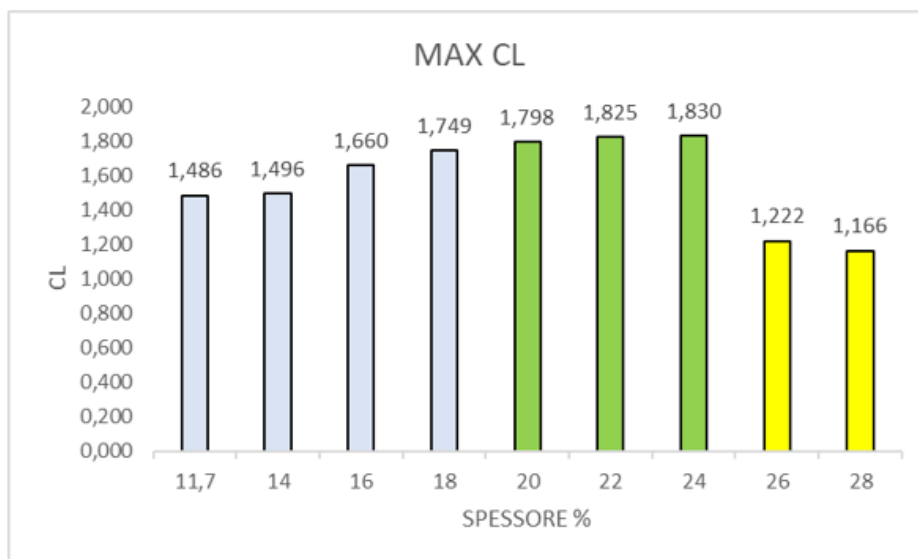


Figura 5.7: Grafico del massimo CL per ogni profilo

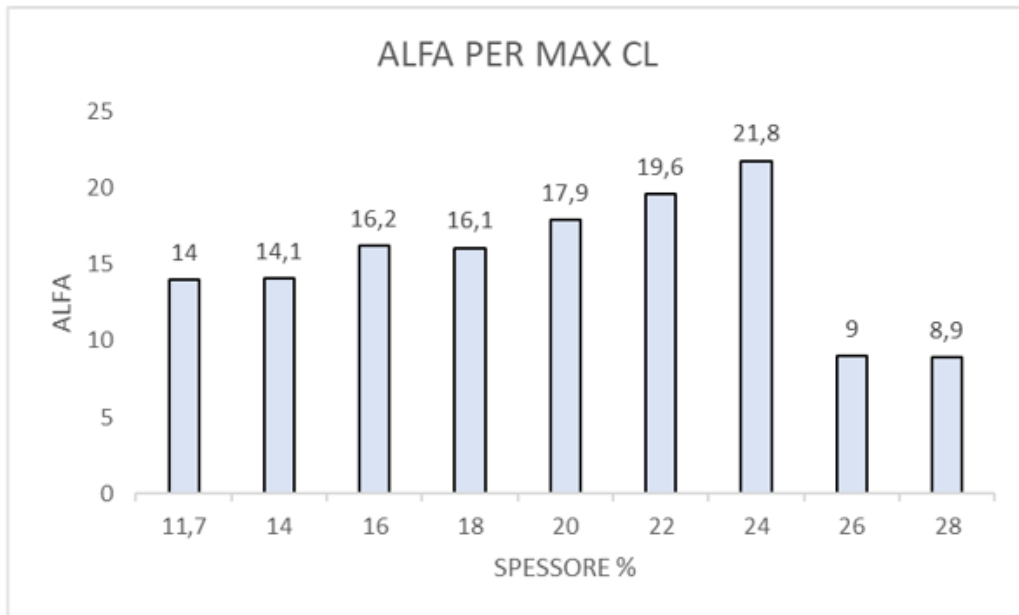


Figura 5.8: Grafico per determinare a quale angolo Alfa si ottiene il massimo CL

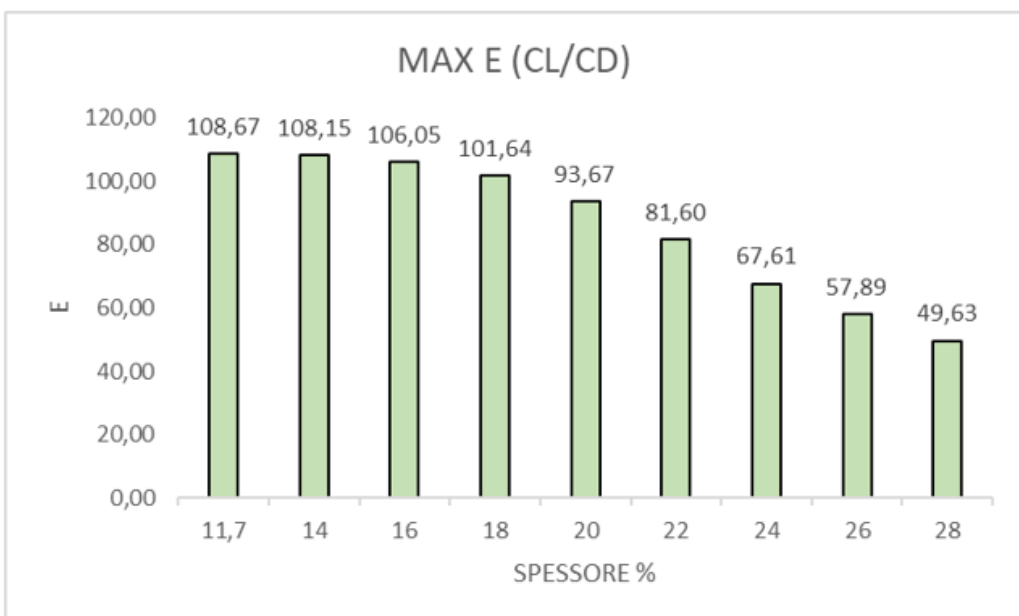


Figura 5.9: Grafico per la massima efficienza ottenuta da ogni profilo

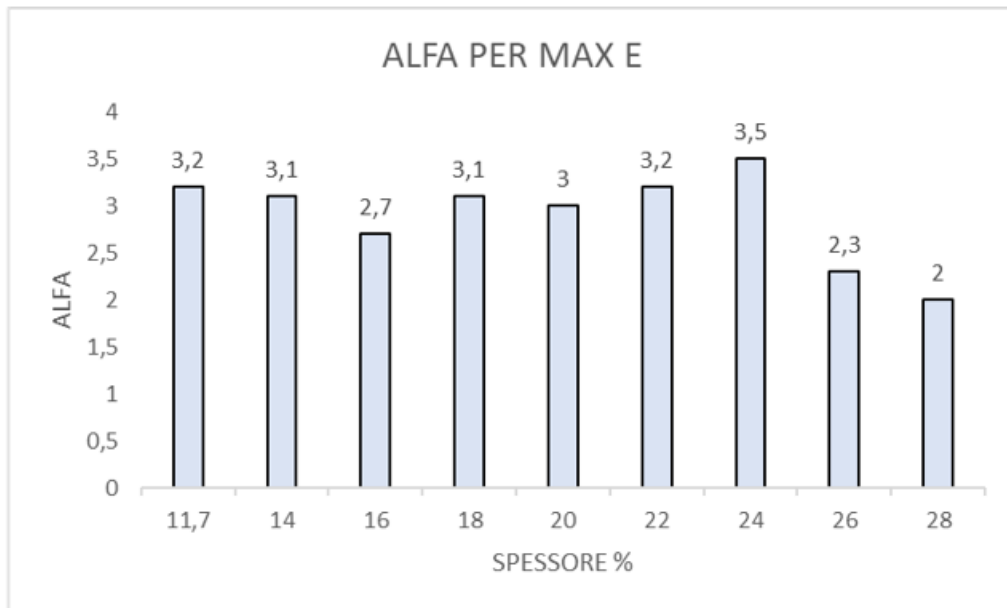


Figura 5.10: Grafico per determinare a quale angolo Alfa si ha massima efficienza

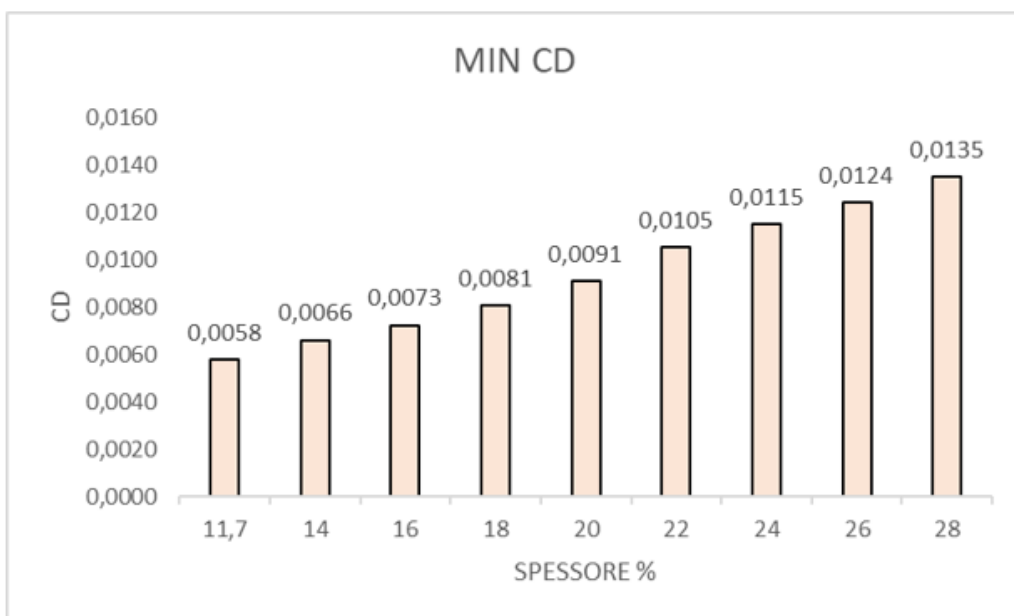


Figura 5.11: Grafico per determinare il minimo valore di CD tra i vari profili



Figura 5.12: Grafico per determinare a quale angolo Alfa si ottiene CD minore

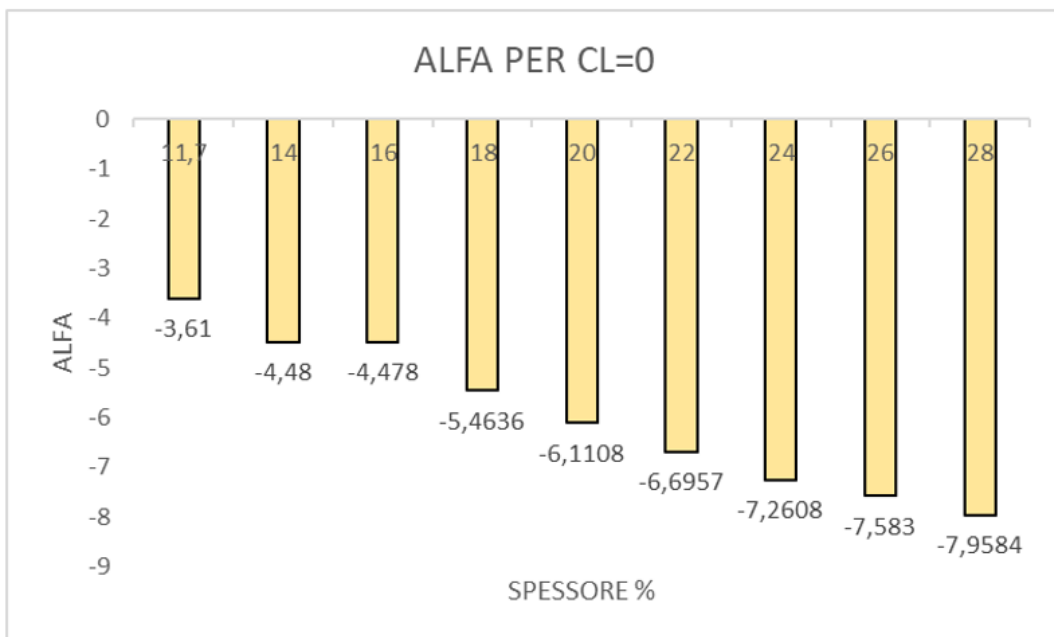


Figura 5.13: Grafico per valutare a quale angolo Alfa si ottiene CL = 0

Osservando i dati ottenuti, si evince come i profili con spessore dell'11,7%, 14% e 16% risultano quelli più equilibrati e con una buona efficienza, nonostante non raggiungano i valori di C_L più elevati.

Per approfondire lo studio su queste tre proposte, si è svolto un ulteriore confronto, andando ad analizzare le curve risultanti dei valori trovati da Xfoil. Più precisamente, si sono osservati i coefficienti C_L e C_D a diversi angoli di attacco.

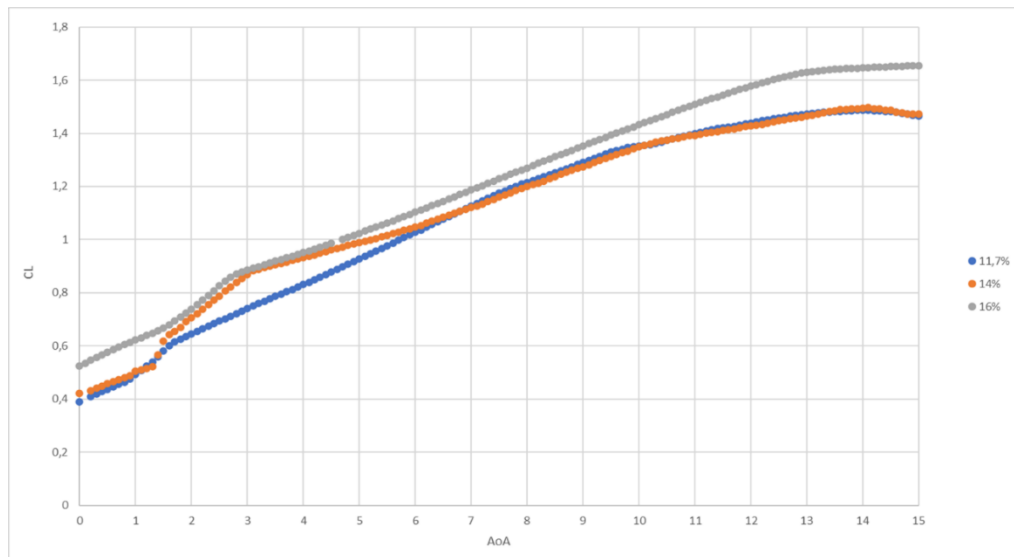


Figura 5.14: Grafico C_L per i profili selezionati

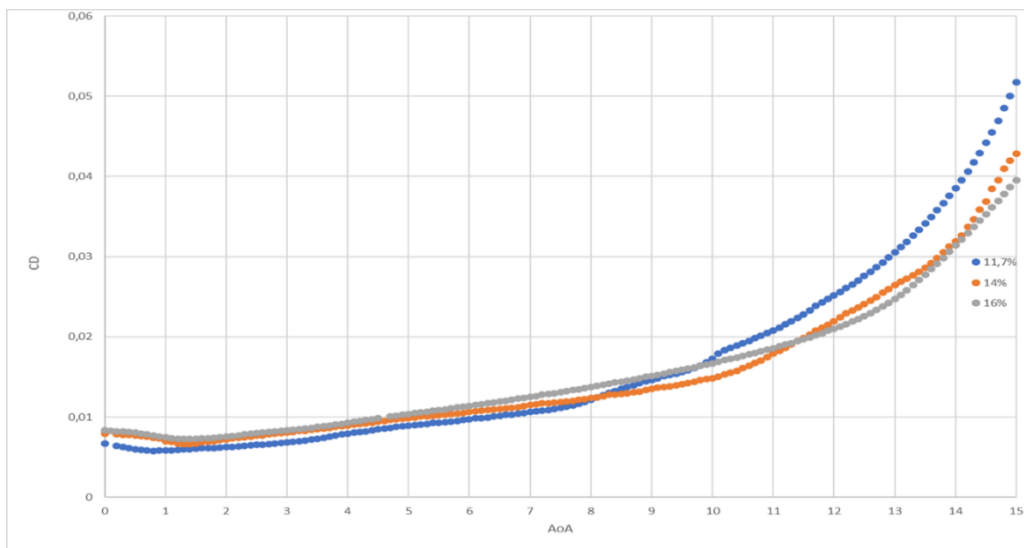


Figura 5.15: Grafico C_D per i profili selezionati

Mediante quest'ultima analisi, si è scelto il profilo per proseguire nello studio, ovvero il Clark Y con spessore del 16%.

Questa scelta è stata determinata da tre aspetti fondamentali:

- Possibilità di massimizzare la downforce, testimoniata dal valore molto elevato del suo coefficiente C_L per tutti gli angoli di attacco simulati rispetto alle altre due alternative (figura 5.14);
- Buoni valori di C_D nonostante uno spessore più elevato in relazione agli altri profili (figura 5.15);
- Semplicità costruttiva, poiché, grazie ad uno spessore maggiore, risulta più facile la realizzazione degli stampi per la sua produzione.

5.2.3 La validazione del modello

Durante lo svolgimento delle analisi preliminari, occorre convalidare il modello numerico. Si tratta di un passaggio fondamentale, dato che un'impostazione imprecisa dei dati, comporta errori a catena durante tutte le simulazioni e vanifica gli studi impostati sul corpo.

Per la convalida, è stato utilizzato il programma Star CCM+, in cui è stata impostata una simulazione 2D del profilo con spessore del 16% con un angolo scelto tra quelli simulati (in questo caso 5 gradi), nelle stesse condizioni di flusso libero scelte per Xfoil (figura 5.16).

L'obiettivo principale è verificare che il valore di C_L che si otterrà in Star risulti uguale o molto simile a quello di Xfoil, in modo tale da approvare il modello e proseguire con lo studio.

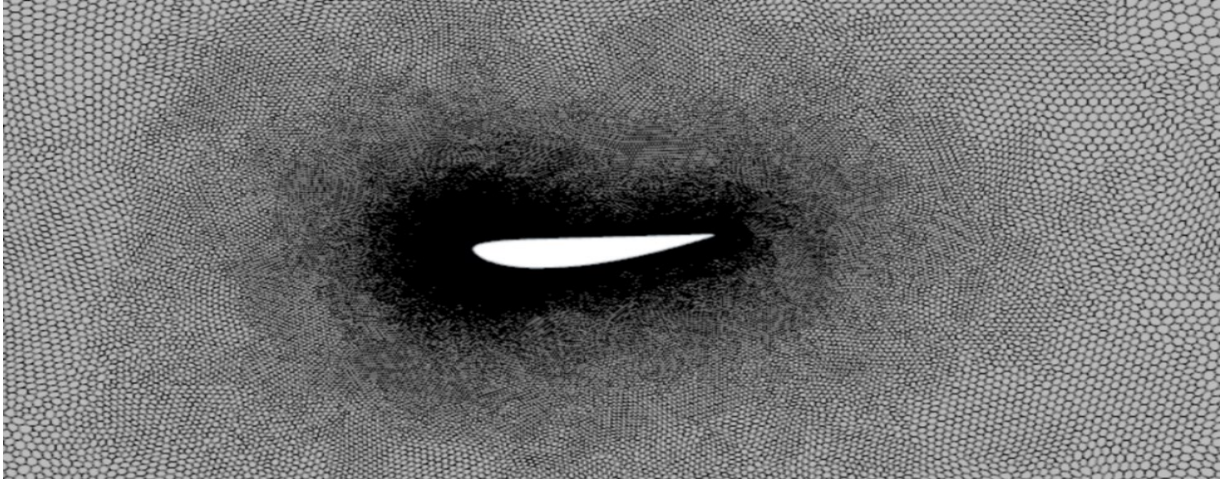


Figura 5.16: Profilo Clark Y in flusso libero in Star CCM+

Osservando il grafico di Xfoil (figura 5.17), e il grafico ottenuto da Star (figura 5.18), è possibile notare che i dati ottenuti sono stati rispettivamente di 1,01 (Xfoil) e 0,96 (Star CCM+).

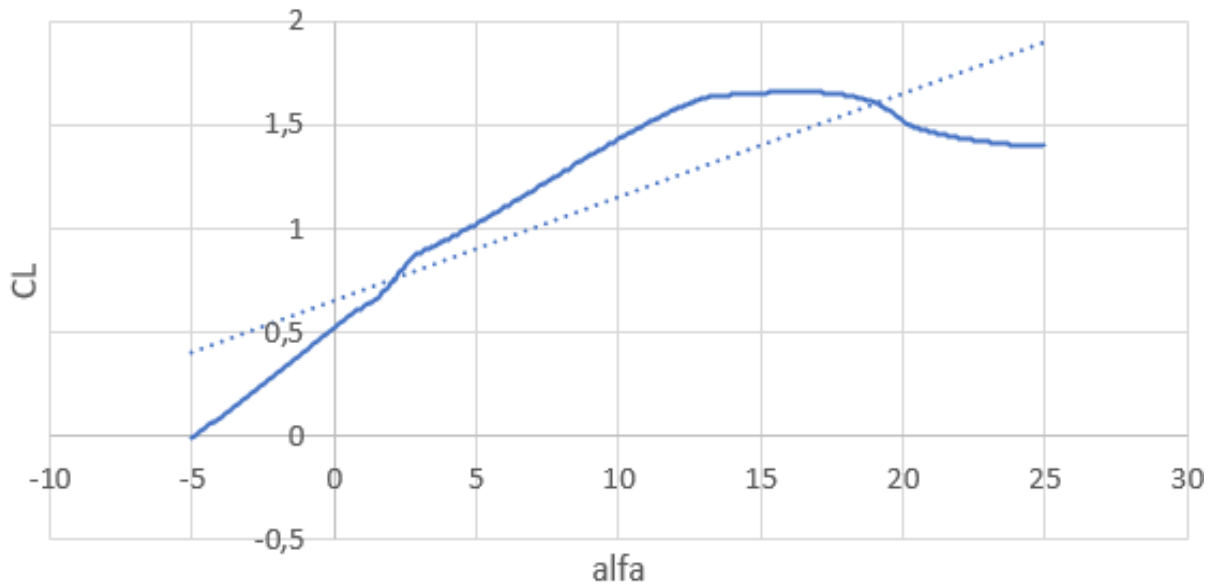


Figura 5.17: Grafico di Xfoil

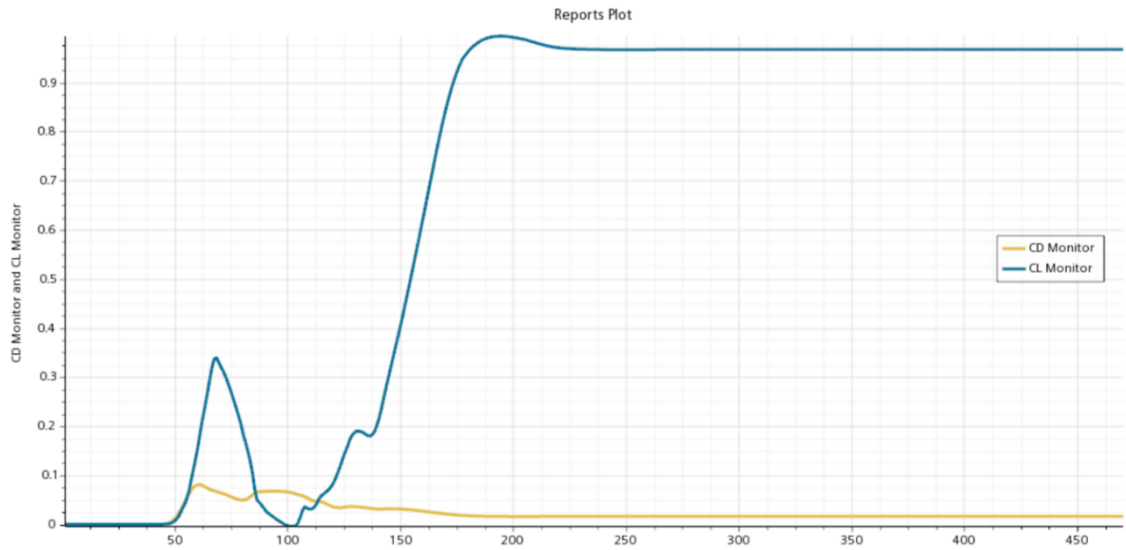


Figura 5.18: Grafico di Star CCM+

Dato che lo scarto tra i valori risulta molto basso, si può affermare che il modello di analisi preliminare impostato può essere dichiarato valido. Pertanto, può essere utilizzato per la fase successiva dello studio, ovvero il passaggio all'analisi 2D del profilo in effetto suolo proprio in Star.

5.3 Simulazioni 2D in Star CCM+

Il passo successivo alla scelta del profilo con più potenzialità tramite Xfoil è l'analisi numerica tramite il programma Star CCM+, fondamentale per trovare la configurazione con un angolo di attacco che risulti adatta agli obiettivi prefissati.

Quindi, si è impostata una simulazione del profilo per gli angoli di attacco che vanno da 0 a 5 gradi, un range ottimale per avere buona deportanza e per evitare un eccessivo drag da parte dell'elemento. Inoltre, il profilo è stato posto nella configurazione finale, ovvero in effetto suolo, con minima distanza dal terreno di 30 mm (figura 5.19).

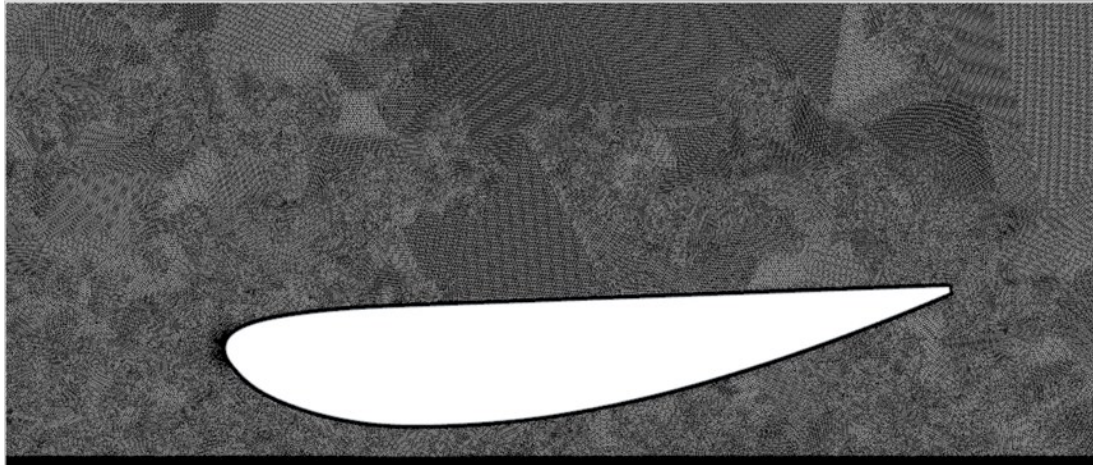


Figura 5.19: Clark Y 16% in effetto suolo

Per definire quale tra le configurazioni sia la migliore, si sono confrontati i risultati ottenuti per i coefficienti C_L , C_D ed efficienza E, racchiusi nella tabella successiva (tabella 5.2):

AoA	CL	CD	E
5	1,712	0,071	24,09
4	1,622	0,064	25,53
3	1,439	0,052	27,67
2	1,457	0,050	29,20
1	1,309	0,044	29,68
0	1,203	0,038	31,66

Tabella 5.2: Valori trovati in STAR CCM+ per il Clark Y 16 con AoA da 0 a 5 gradi

Analizzando i dati raccolti, si è scelto di proseguire lo studio con il profilo Clark Y 16% con angolo di attacco di 5 gradi, scelta motivata dall'elevato valore di C_L ottenuto e quindi dalla possibilità di massimizzare la deportanza rispetto agli altri angoli di attacco simulati.

5.4 Realizzazione del modello iniziale e simulazioni 3D

Una volta scelto il profilo di partenza, si è passati alla realizzazione del modello CAD del sidepod tramite il programma NX di Siemens. Il primo passo è stato definire le misure del modello di partenza, denominato SIDEWING (figura 5.20), in modo tale da rispettare i parametri imposti dal regolamento della Formula SAE.

In questo caso, le misure scelte sono:

- lunghezza di corda di 689,7 [mm];
- larghezza di 440 [mm].

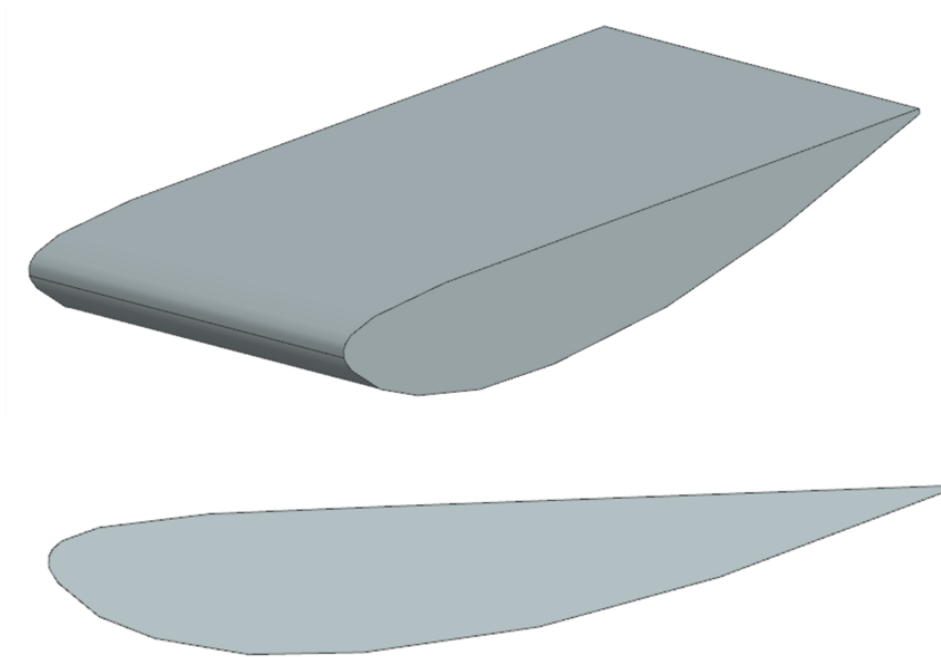


Figura 5.20: modello 3D del SIDEWING

Successivamente, si è passati all'analisi numerica 3D del modello tramite Star CCM+, preparando una simulazione con le medesime impostazioni descritte nel capitolo precedente.

Per tale studio, è stata orientata un'analisi in grado di quantificare le forze aerodinamiche, ovvero deportanza e resistenza, e i coefficienti C_L e C_D , i principali indicatori per definire se la soluzione studiata funziona correttamente.

Inoltre, si sono create delle *scalar scene* per visualizzare i flussi sul modello e i grafici del C_p , in maniera tale da analizzare il comportamento dei vortici nella zona sottostante ed esterna del profilo aerodinamico

I dati ottenuti da questo primo studio sono raccolti nella tabella seguente (tabella 5.3):

SIDEWING			
FORZE		COEFFICIENTI	
DownF	Drag	CL	CD
37,7016 N	4,0612 N	-0,8196	0,0883

Tabella 5.3: Valori delle forze e dei coefficienti del SIDEWING per la simulazione 3D

In seguito, vengono mostrate le streamlines ottenute per il sidewing completo (figura 5.21), e per la zona laterale (figure 5.22, 5.23).

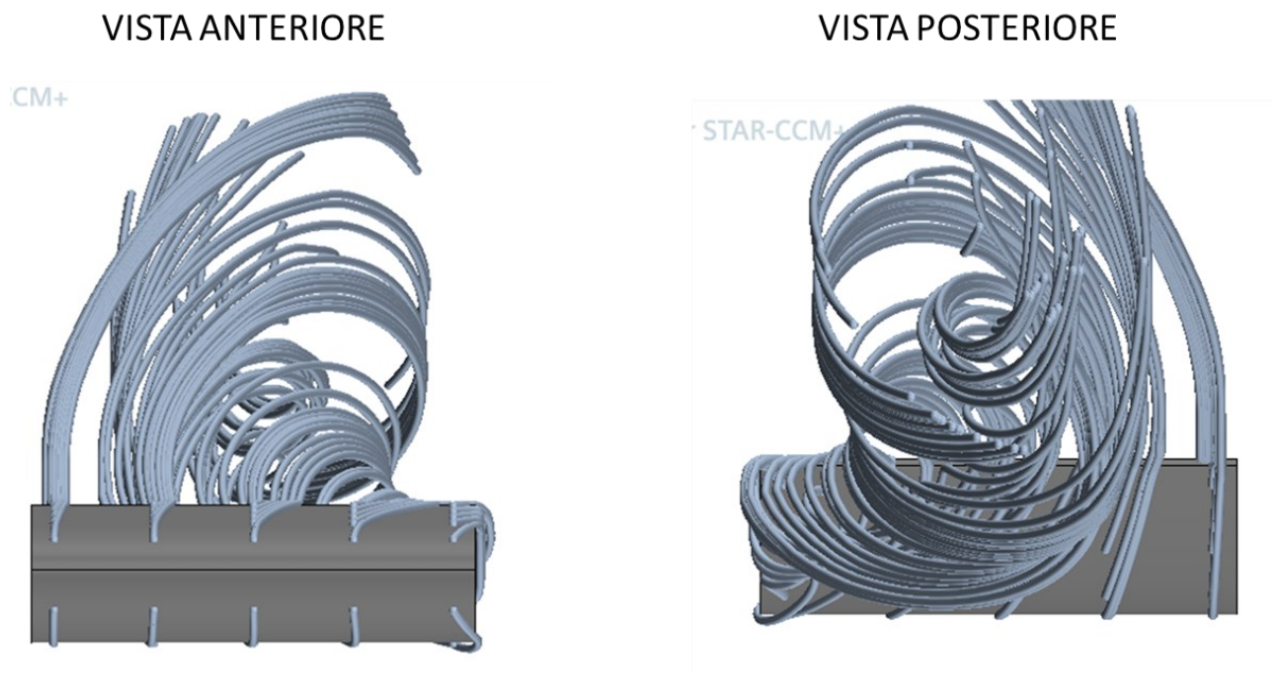


Figura 5.21: Viste anteriori e posteriori delle streamlines sul SIDEWING

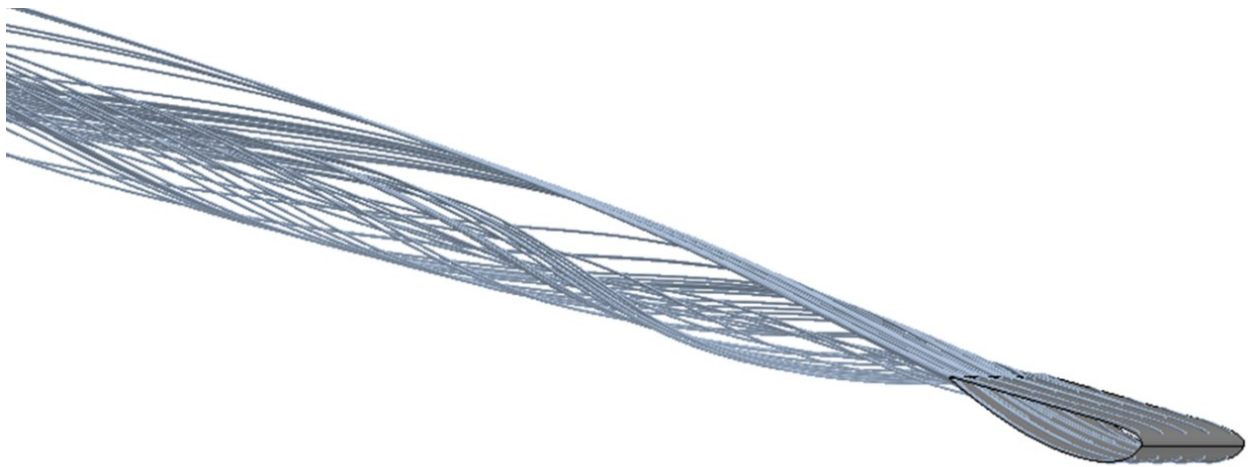


Figura 5.22: Vista prospettica delle streamlines sul SIDEWING

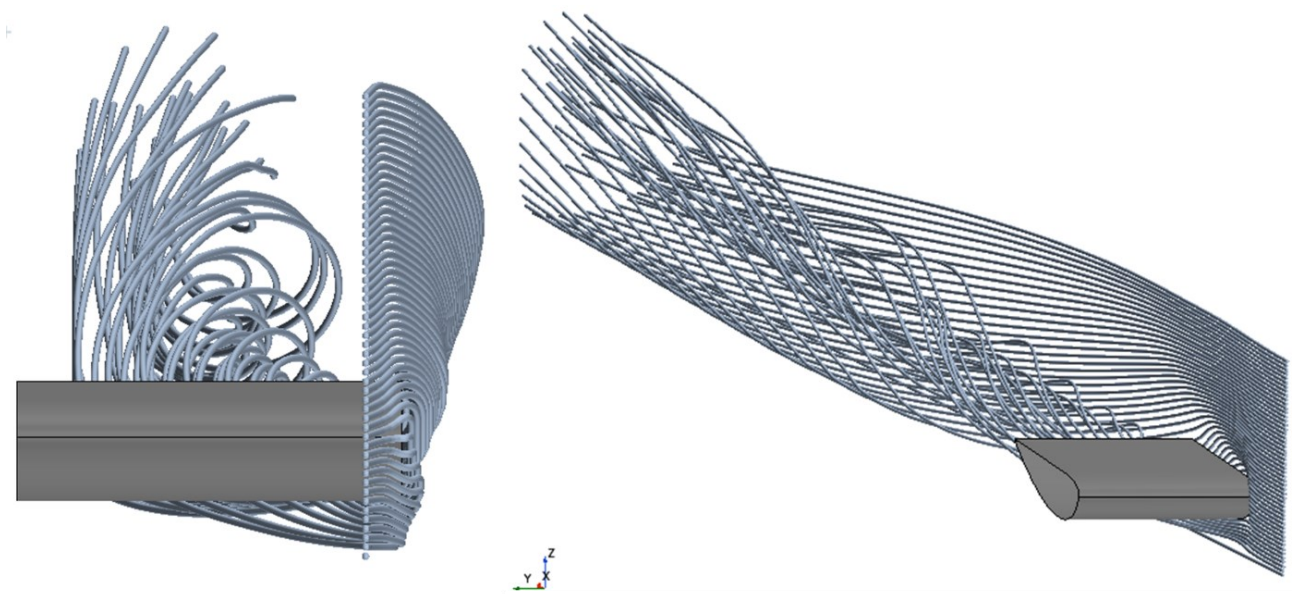


Figura 5.23: Vista frontale e prospettica delle streamlines nella zona esterna del SIDEWING

Confrontando i dati presenti in tabella, si può constatare come il profilo funzioni discretamente, generando una buona deportanza, testimoniata dal valore di 37,7 N, e presenti buoni valori per tutti gli altri elementi presi in esame.

Al contrario, osservando le streamlines, si è scoperto come il profilo tenda a generare dei moti vorticosi di elevata intensità nella zona esterna che potrebbero compromettere le prestazioni aerodinamiche.

Per esaminare più attentamente questo effetto, sono stati visualizzati i grafici del C_p relativi a tre sezioni, poste rispettivamente a 220, 350 e 400 mm dal symmetry plane (che rappresenta il telaio della vettura) (figure 5.24, 5.25 e 5.26).

Le sezioni sono state denominate rispettivamente:

- sezione centrale, creata a 220 [mm] dal symmetry plane;
- sezione intermedia, creata a 350 [mm] dal symmetry plane;
- sezione esterna, creata a 400 [mm] dal symmetry plane.

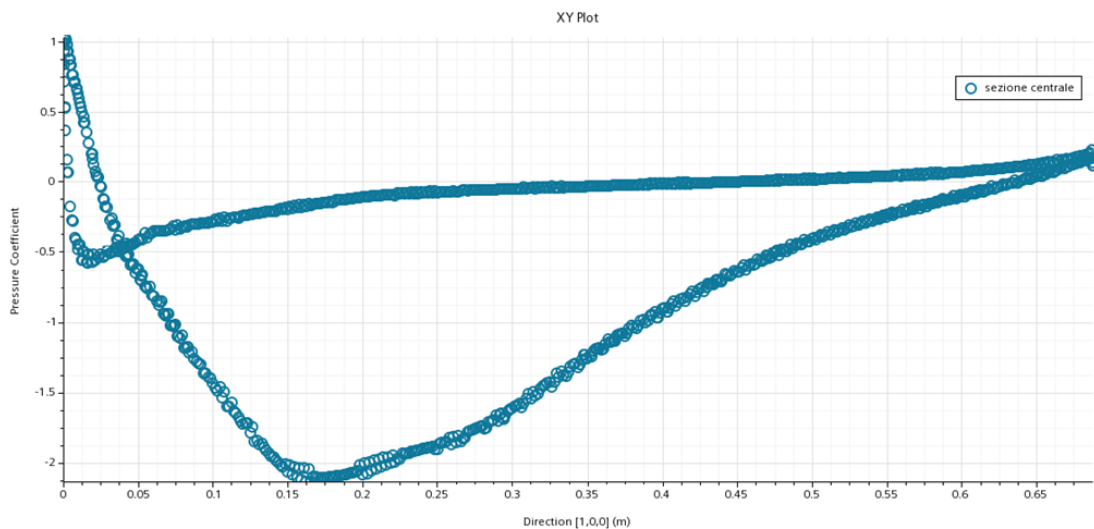


Figura 5.24: Grafico C_p per la sezione centrale del SIDEWING

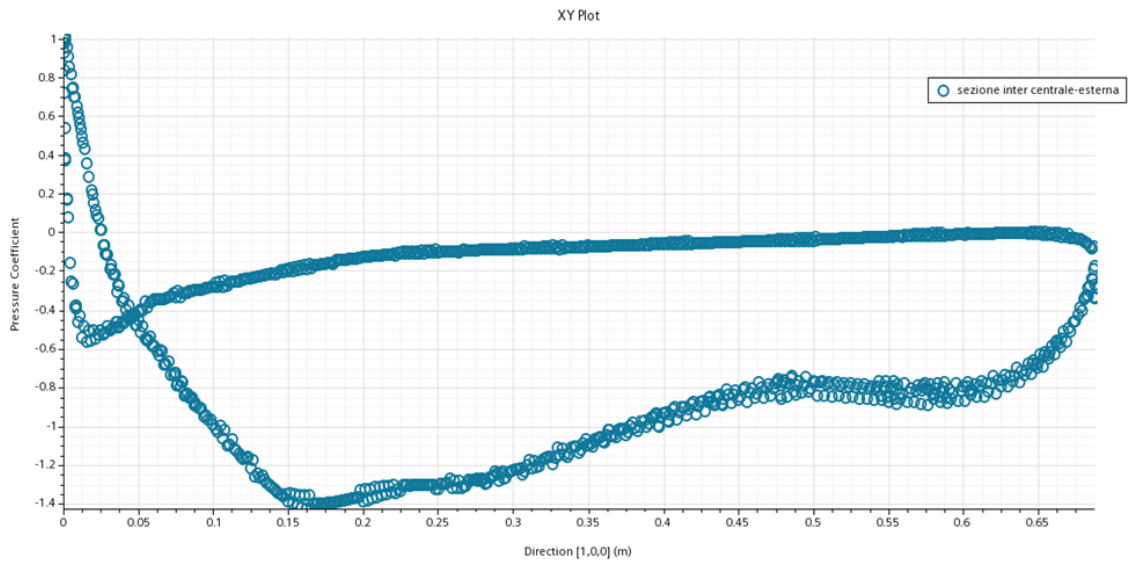


Figura 5.25: Grafico C_p per la sezione intermedia del SIDEWING

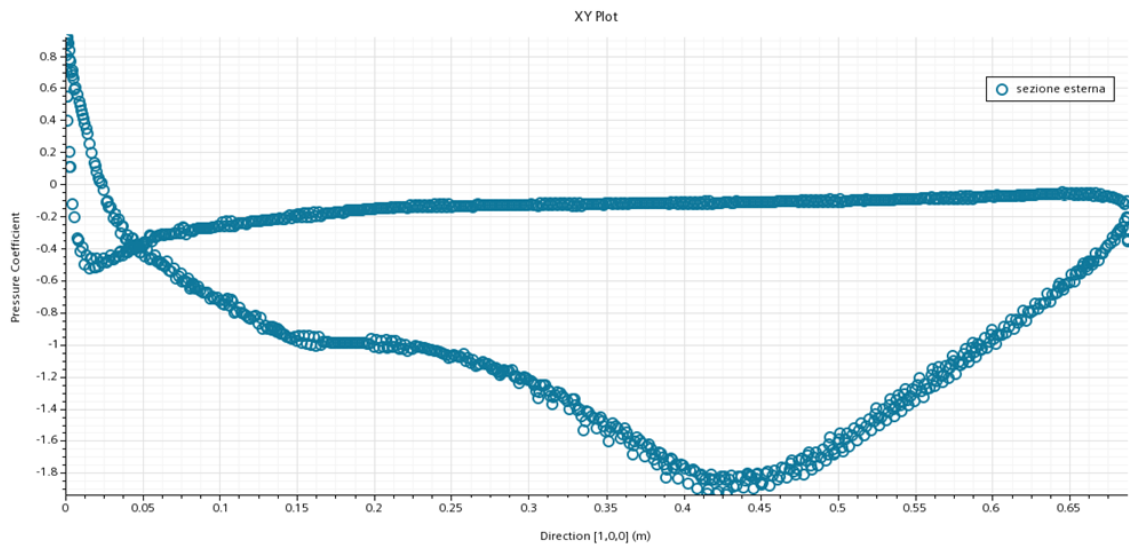


Figura 5.26: Grafico C_p per la sezione esterna del SIDEWING

Analizzando la sequenza dei grafici, si può notare come il flusso che scorre nella parte inferiore del profilo non riesca a mantenere l'andamento che si osserva nella sezione posta a 220 [mm] dal symmetry plane.

Tale fenomeno è legato alla differenza di pressione che si genera tra il ventre, zona caratterizzata da una pressione minore, e il dorso, caratterizzato da una maggiore pressione.

In generale, quando un profilo alare viene investito da una vena fluida, si vanno a generare due zone a pressione differenti. Nella zona superiore ci sarà una pressione maggiore, mentre nella parte inferiore una minore.

Se il gradiente tra le due zone risulta molto elevato, il flusso nella zona superiore si dirige nella zona a pressione minore per cercare di riequilibrare la pressione, generando però dei vortici di entità molto elevata, denominati *vortici di estremità*.

Questa condizione risulta molto dannosa in quanto il vortice di estremità genera una componente di velocità ortogonale al flusso indisturbato, la cui composizione di forze fa sì che il profilo lavori ad un angolo di attacco effettivo minore rispetto a quello geometrico. Inoltre, si genera una componente della risultante aerodinamica, detta *Resistenza indotta*, diretta nello stesso verso della Resistenza. Tutti questi effetti comportano una diminuzione delle prestazioni, dato che il profilo lavora ad un angolo di attacco minore e perché si aumenta la resistenza all'avanzamento.

Sulla base dei dati ottenuti graficamente e dalle streamlines, si può definire che il modello studiato sia abbastanza valido in termini numerici, ma potrebbe non risultare particolarmente adatto ad una applicazione per via del fenomeno vorticoso elevato che si genera.

Perciò, si è deciso di riprogettare il sidepod, con l'obiettivo di abbassare la vorticosità generata nella zona esterna e garantire una buona costanza della deportanza.

5.5 I nuovi modelli

In seguito al forte fenomeno vorticoso riscontrato sul primo modello simulato, si è scelto ridisegnare il sidepod da studiare in Star CCM+.

Si è sfruttato come modello di partenza lo stesso profilo utilizzato precedentemente, diminuendone la larghezza (che passa da 440 a 370 [mm]), e aggiungendo due elementi:

- *endplate*, con lo scopo di mantenere separate le zone a diversa pressione;

- *generatore di vortici*, il cui scopo è generare un vortice controrotante per abbassare l'entità del vortice di estremità e rimescolare lo strato limite, energizzando il flusso a ridosso del profilo e massimizzando l'effetto suolo.

La larghezza del profilo è stata accorciata per evitare di oltrepassare la linea definita dalla parte esterna delle ruote, vista l'aggiunta dei nuovi componenti. Tale scelta, però, potrebbe determinare alcuni compromessi, ovvero:

- il profilo potrebbe lavorare correttamente, garantendo una deportanza costante;
- al contrario, i valori delle forze e dei coefficienti potrebbero essere più bassi vista la ridotta superficie alare sfruttabile. Quindi, le soluzioni successive potrebbero generare poca deportanza.

Nonostante queste considerazioni, sono stati realizzati tre modelli differenti, in modo da trovare l'alternativa che riuscisse a garantire valori simili o migliori dal punto di numerico rispetto al modello precedente, e un comportamento adeguato dei flussi sul sidepod.

Le configurazioni realizzate sono state denominate:

- Endplate 1;
- Endplate 2;
- Endplate 3.

5.5.1 Endplate 1 ed Endplate 2

La progettazione CAD di queste due configurazioni è stata influenzata dal disegno dell'ala anteriore presente sulla P4 EVO del Polimarche Racing Team, visto che gli studi effettuati in altre tesi hanno dato risultati incoraggianti e hanno riscontrato un buon comportamento dei flussi sul profilo principale dell'ala. L'unica differenza concettuale tra le due soluzioni riguarda la zona in cui è presente il generatore di vortici: nella prima soluzione si è ripreso il medesimo concetto applicato all'ala

anteriore della vettura. Diversamente, nella seconda soluzione, il concetto è stato estremizzato, in modo tale da laminare maggiormente il flusso tra la paratia laterale e il generatore di flusso.

Il CAD dell'Endplate 1 (figure 5.27 e 5.28), è stato realizzato con le medesime misure:

- ALA: 370 [mm] di larghezza e 689,7 [mm] di lunghezza di corda;
- PARATIA LATERALE (figure 5.29 e 5.30), divisa in:
 1. BASE: larghezza di 17,72 [mm], lunghezza di 1000 [mm] e spessore di 3 [mm];
 2. BANDA LATERALE: larghezza di 5 [mm], lunghezza di 1000 [mm] e spessore di 3 [mm];
- GENERATORE DI VORTICI (figura 5.31): caratterizzato, partendo da sinistra, da una sezione con un raggio di 4 [mm], un segmento obliquo di 8,66 [mm], raggio di 5 [mm], segmento orizzontale di 10,4 [mm] e raggio di 13 [mm], una lunghezza di 1000 [mm] e uno spessore di 3 [mm].

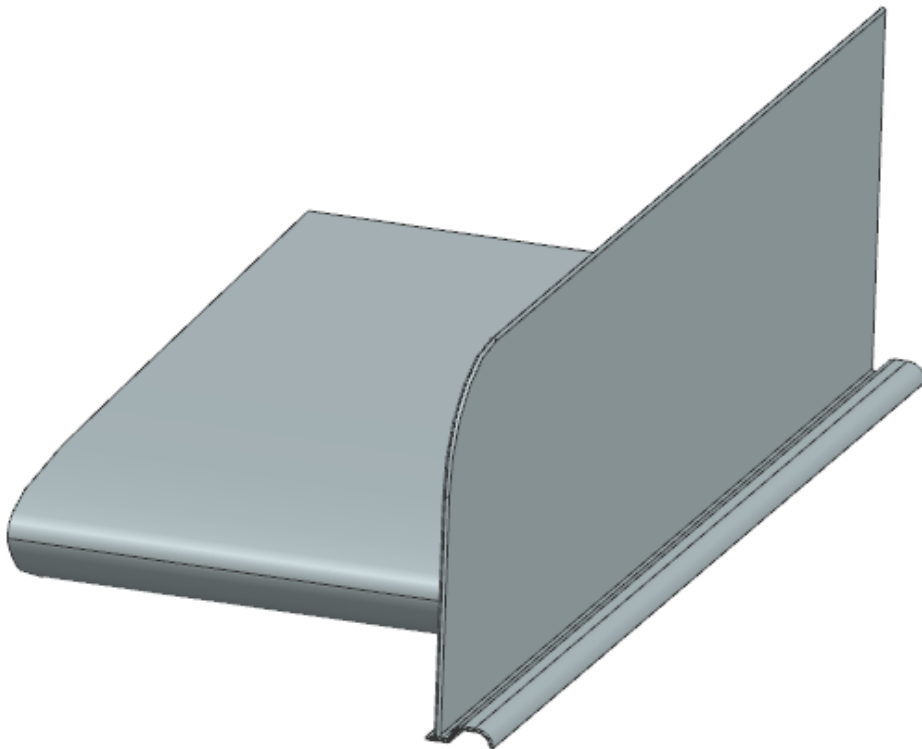


Figura 5.27: Vista prospettica dell'ENDPLATE 1



Figura 5.28: Vista frontale dell'ENDPLATE 1

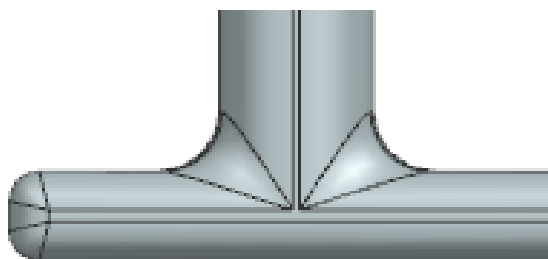


Figura 5.29: Vista frontale della base della paratia laterale

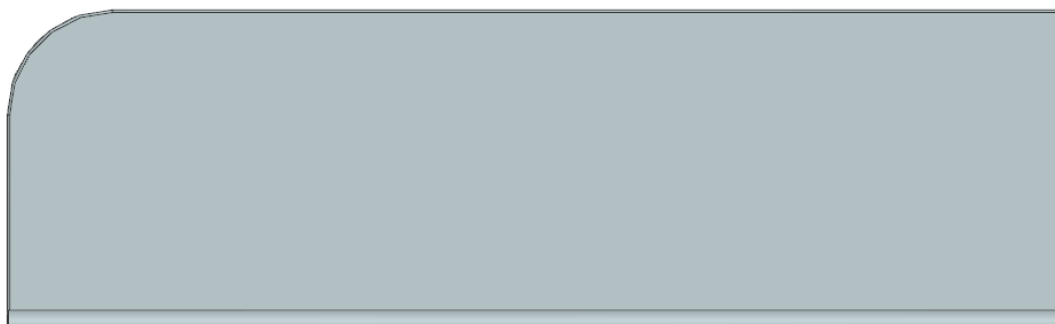


Figura 5.30: Vista laterale della paratia

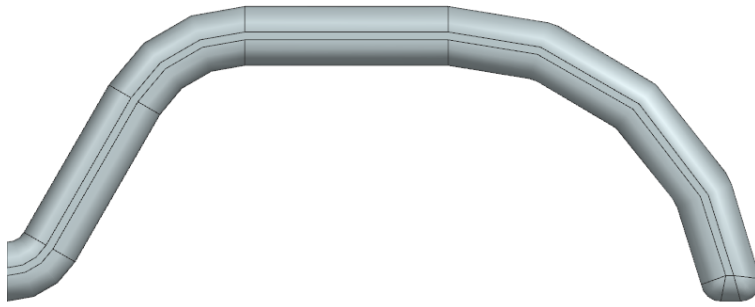


Figura 5.31: Vista frontale del generatore di vortici per l'ENDPLATE 1

Il CAD dell'Endplate 2 (figure 5.32 e 5.33), presenta le stesse misure della prima soluzione per l'ala, la paratia laterale e il generatore. Mentre, differisce per la presenza di un MARCIAPIEDE, che è stato realizzato con le seguenti misure:

- Lunghezza di 1000 [mm];
- Larghezza di 50 [mm];
- Spessore di 3 [mm].

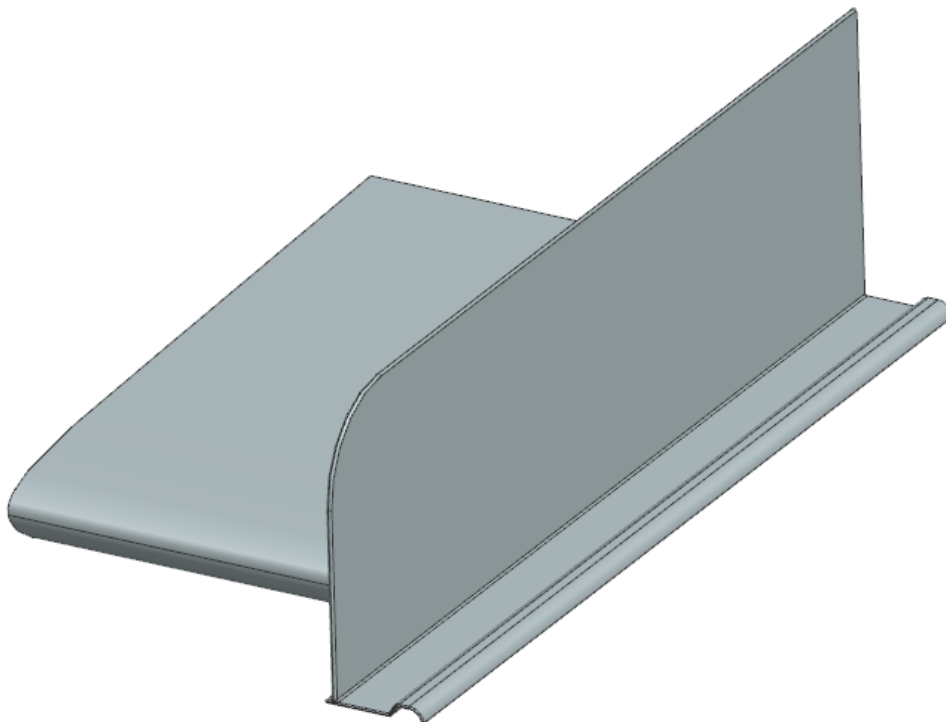


Figura 5.32: Vista prospettica dell'ENDPLATE 2

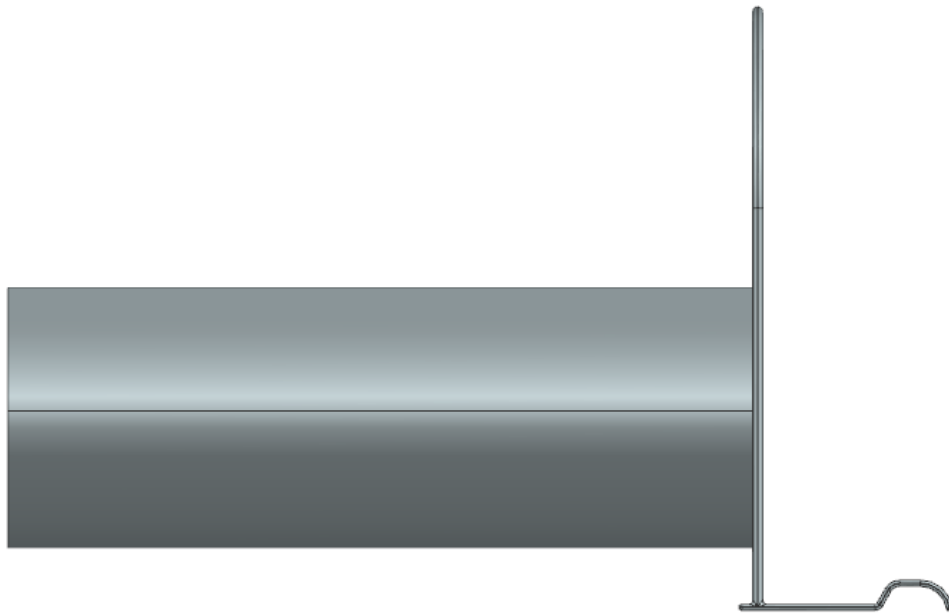


Figura 5.33: Vista frontale dell'ENDPLATE 2

5.5.2 Endplate 3

A seguito dell'esperienza acquisita durante le gare e la necessità di creare un vortice controrotante più accentuato per annullare il fenomeno vorticoso generato dal modello iniziale, è stata modificata la forma del generatore di vortici usato nelle soluzioni precedenti (figure 5.34, 5.35, 5.36, 5.37).

Le dimensioni della paratia laterale rimangono uguali alle altre configurazioni, ma il marciapiede e il generatore sono stati rivisti

- MARCIAPIEDE: lunghezza di 1000 [mm], larghezza di 43,9 [mm] e spessore di 3 [mm];
- GENERATORE DI VORTICE: realizzato con una serie di sezioni decrescenti, che partono da un valore di raggio minimo di 24 [mm] fino ad arrivare a 13 [mm]. Inoltre, la parte finale del generatore termina con un elemento piatto, con un angolo rispetto al piano orizzontale di 154 gradi (osservandolo dalla zona posteriore).

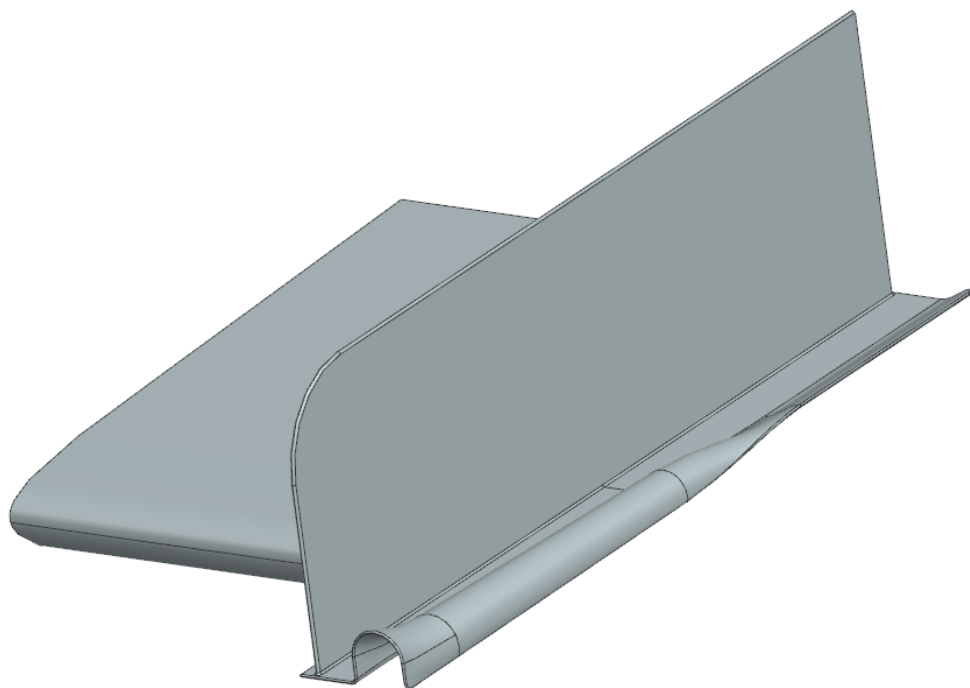


Figura 5.34: Vista prospettica dell'ENDPLATE 3

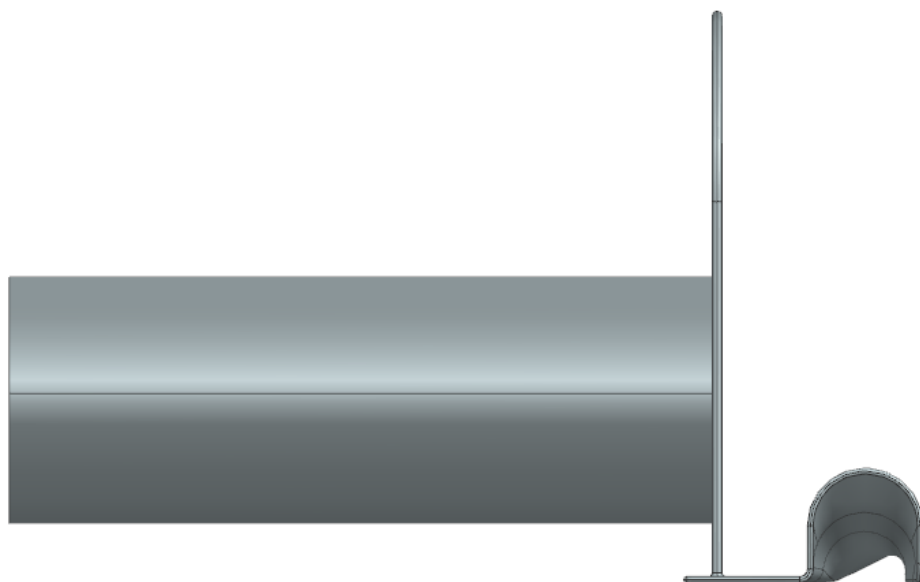


Figura 5.35: Vista frontale dell'ENDPLATE 3

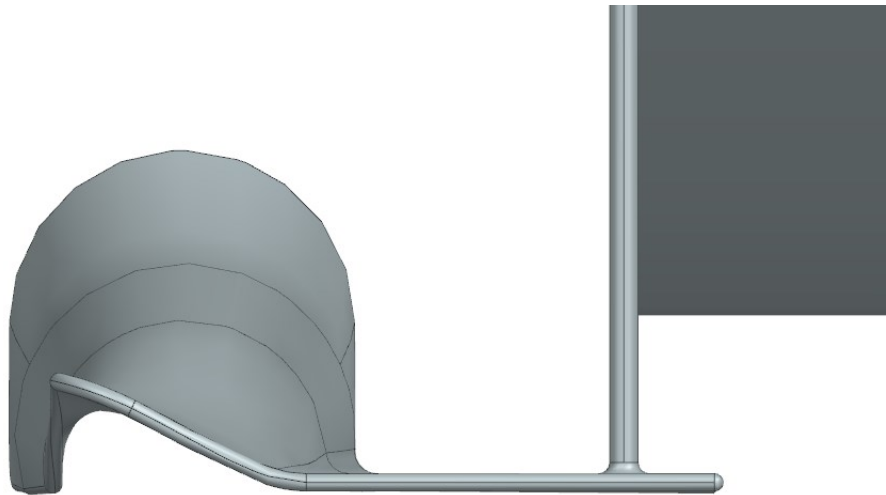


Figura 5.36: Vista posteriore del generatore di vortici sull'ENDPLATE 3



Figura 5.37: Vista laterale dell'ENDPLATE 3

5.6 Confronto tra le simulazioni

In seguito alla realizzazione dei nuovi modelli, sono state impostate le simulazioni 3D su Star CCM+ delle nuove configurazioni.

Data la maggiore complessità di queste nuove soluzioni rispetto alla Sidewing, si è scelto di valutare tutte le opzioni in due modi:

- Tramite una visione dettagliata delle forze e dei coefficienti relativi ai soli profili, in modo tale da avere un confronto diretto con il profilo adottato nel Sidewing;
- Tramite una visione complessiva delle forze e dei coefficienti totali delle nuove soluzioni (Endplate 1, 2 e 3 completi), rispetto al Sidewing.

Inoltre, anche per queste nuove tipologie, sono state realizzate le curve del C_p ottenute tramite le sezioni del profilo e le streamlines, fondamentali per valutare come i vari modelli gestiscono il vortice di estremità.

In merito alle sezioni realizzate per il C_p , essendo l'ala più piccola, le distanze rispetto al symmetry plane (ovvero il telaio), hanno subito delle modifiche, comuni per tutte e tre le simulazioni:

- La sezione centrale è stata posta a 200 [mm] dal symmetry plane;
- La sezione intermedia è stata posta a 280 [mm] dal symmetry plane;
- La sezione esterna è stata posta a 340 [mm] dal symmetry plane.

Per quanto riguarda il modello dell'Endplate 1, i valori relativi alle forze e ai coefficienti aerodinamici (tabella 5.4), i grafici derivanti dalle sezioni (figure 5.38, 5.39, 5.40), e le streamlines (figure 5.41, 5.42, 5.43, 5.44), sono:

ENDPLATE 1			
FORZE ALA		COEFFICIENTI ALA	
DownF	Drag	CL	CD
25,6683 N	3,4840 N	-0,6636	0,0901
FORZE TOTALI		COEFFICIENTI TOTALI	
DownF	Drag	CL	CD
30,4883 N	3,7626 N	-0,6462	0,07974

Tabella 5.4: Valori dei coefficienti e delle forze per l'ala e totali per l'ENDPLATE 1

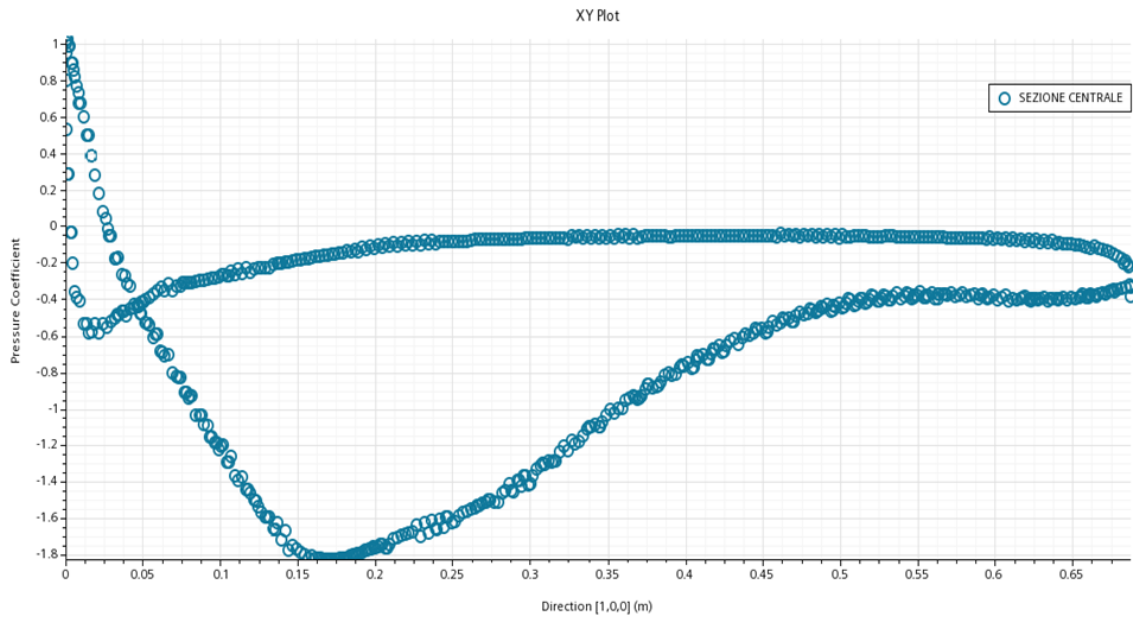


Figura 5.38: Grafico C_p della sezione centrale dell'ENDPLATE 1

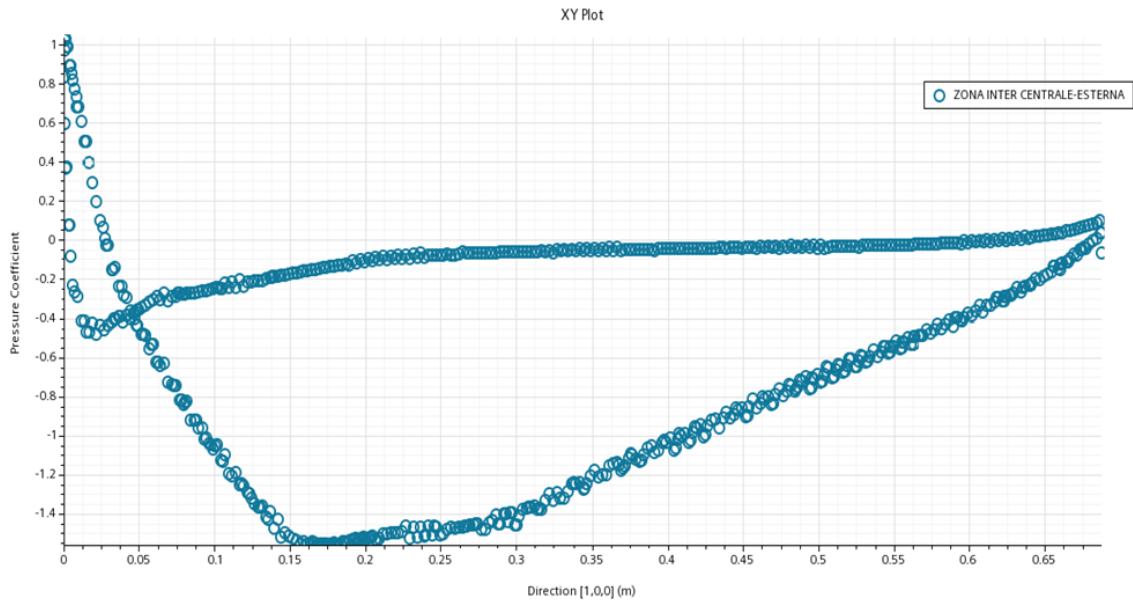


Figura 5.39: Grafico C_p della sezione intermedia dell'ENDPLATE 1

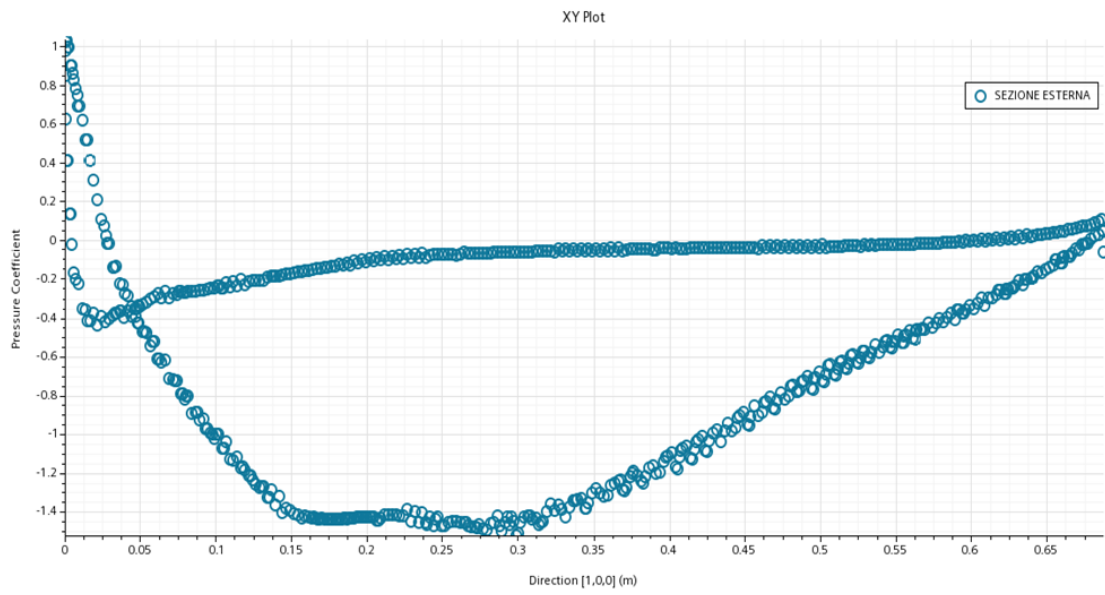


Figura 5.40: Grafico C_p della sezione esterna dell'ENDPLATE 1

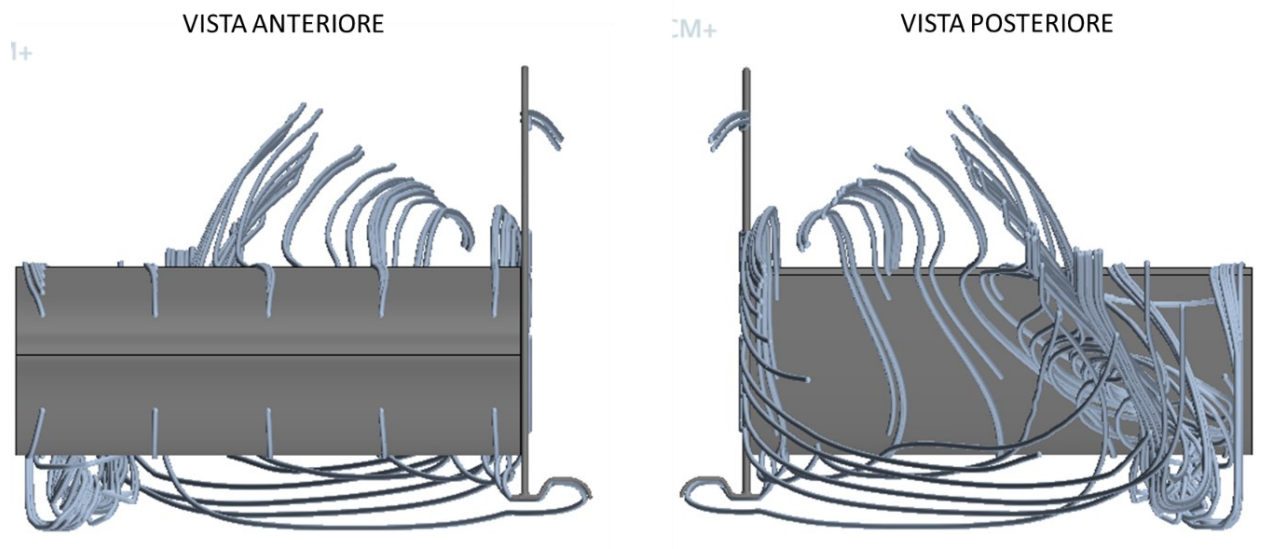


Figura 5.41: Vista anteriore e posteriore delle streamlines sull'ENDPLATE 1

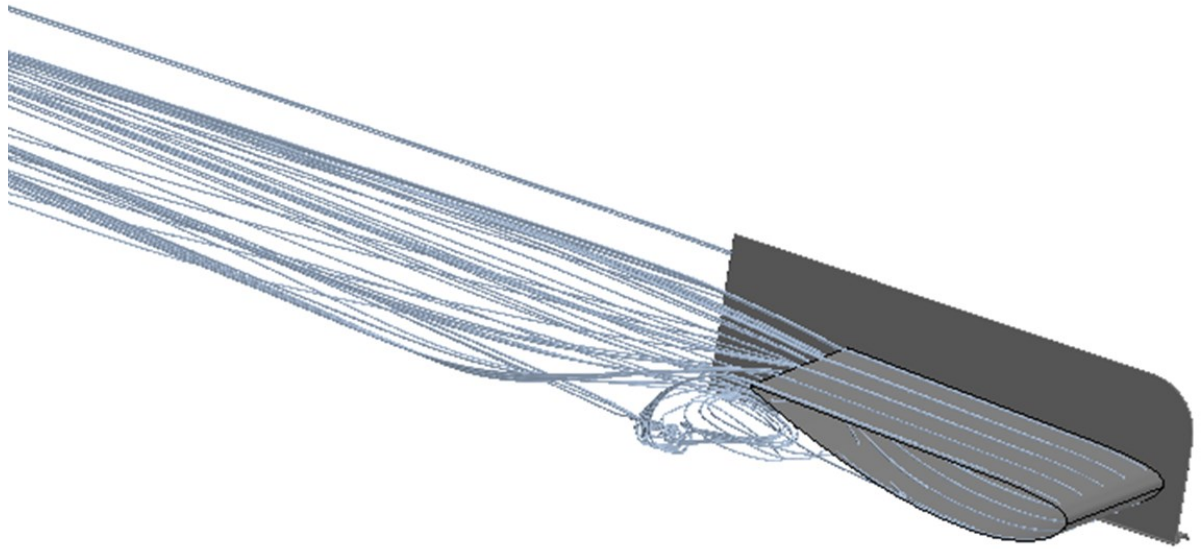


Figura 5.42: Vista prospettica delle streamlines sull'ENDPLATE 1

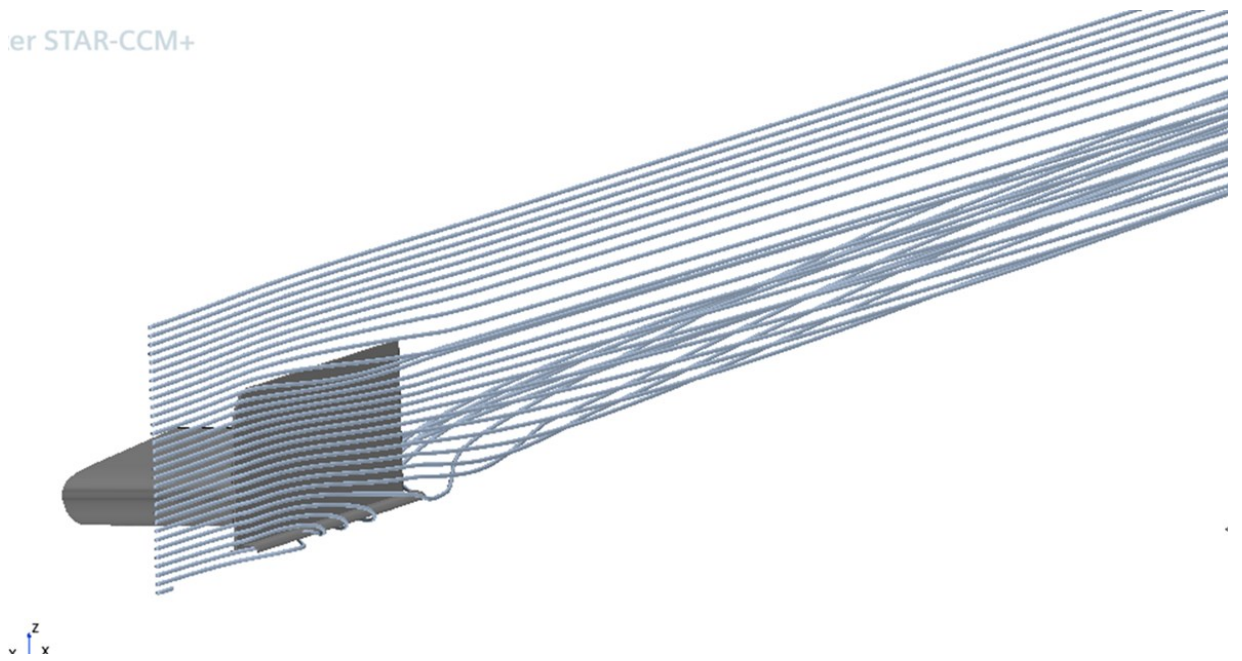


Figura 5.43: Vista prospettica delle streamlines sulla zona esterna dell'ENDPLATE1

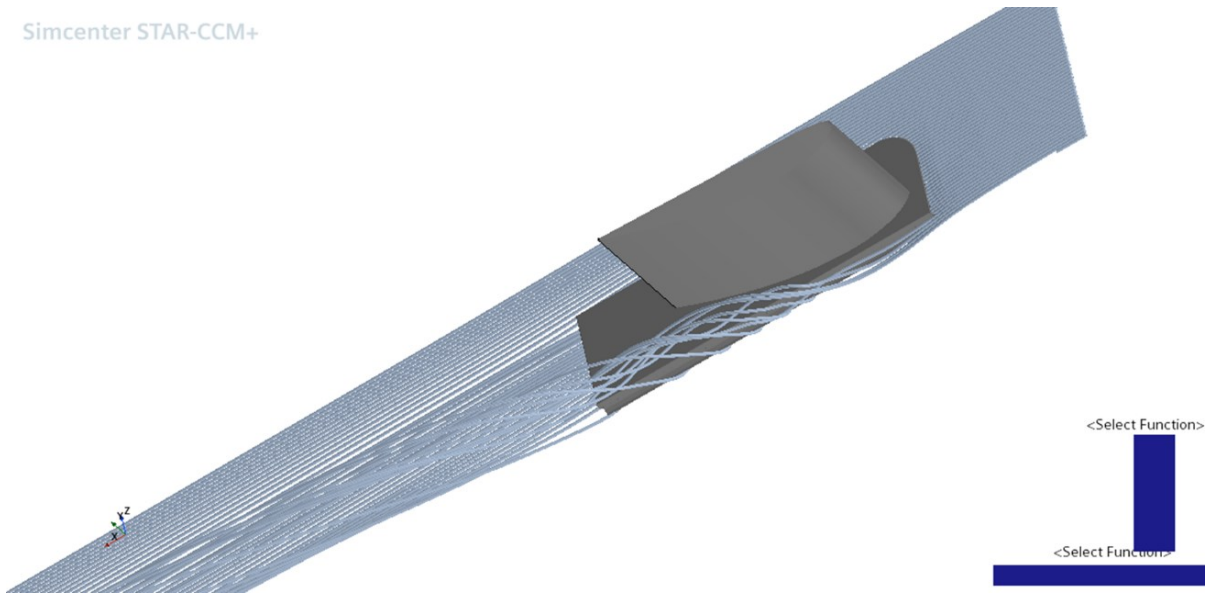


Figura 5.44: Vista inferiore delle streamlines nella zona esterna dell'ENDPLATE 1

Confrontando i risultati visivi della simulazione per l'Endplate 1 rispetto al Sidewing, quindi streamlines e grafici del C_p , si può vedere come questa soluzione porti ad un netto miglioramento rispetto alla soluzione iniziale.

Nello specifico, le sezioni create evidenziano come il comportamento del flusso nella parte sottostante del profilo sia più costante e tenda a migliorare nella sezione più vicina alla paratia laterale. Inoltre, osservando l'andamento dei flussi tramite le streamlines, si può vedere come il vortice di estremità risulti molto più contenuto, determinando una stabilizzazione migliore dei flussi e garantendo una deportanza più costante.

Analizzando i risultati delle forze e dei coefficienti, invece, si può notare come i valori trovati risultano nettamente più bassi, sia considerando il solo profilo alare, sia considerando l'intero elemento.

Tali considerazioni derivano dall'utilizzo di un profilo più piccolo che, nonostante l'utilizzo di un endplate e di un generatore, non riesce a garantire una buona generazione di deportanza e da una soluzione complessiva che non riesce a massimizzare al meglio la downforce.

Successivamente, lo studio è passato sull'analisi della seconda configurazione, ovvero l'Endplate 2, i cui dati raccolti (tabella 5.5), i grafici (figure 5.45, 5.46, 5.47), e le streamlines (figure 5.48, 5.49, 5.50, 5.51, 5.52), sono:

ENDPLATE 2			
FORZE ALA		COEFFICIENTI ALA	
DownF	Drag	CL	CD
32,2274 N	3,4336 N	-0,8332	0,0888
FORZE TOTALI		COEFFICIENTI TOTALI	
DownF	Drag	CL	CD
41,7457 N	3,8072 N	-0,7623	0,0695

Tabella 5.5: Valori dei coefficienti e delle forze dell'ala e totali per l'ENDPLATE 2

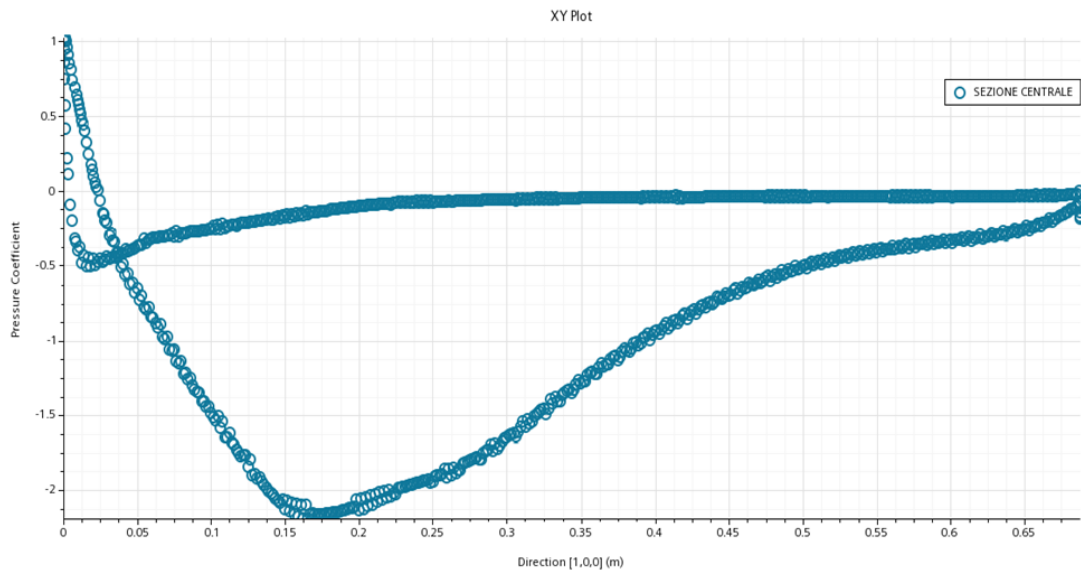


Figura 5.45: Grafico Cp della sezione centrale dell'ENDPLATE 2

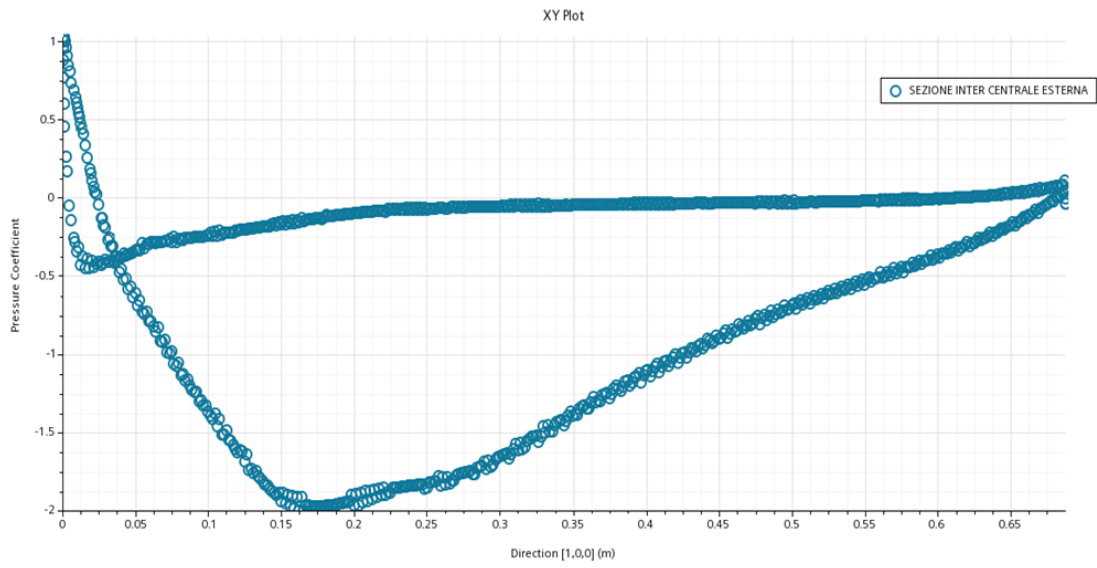


Figura 5.46: Grafico Cp della sezione intermedia dell'ENDPLATE 2

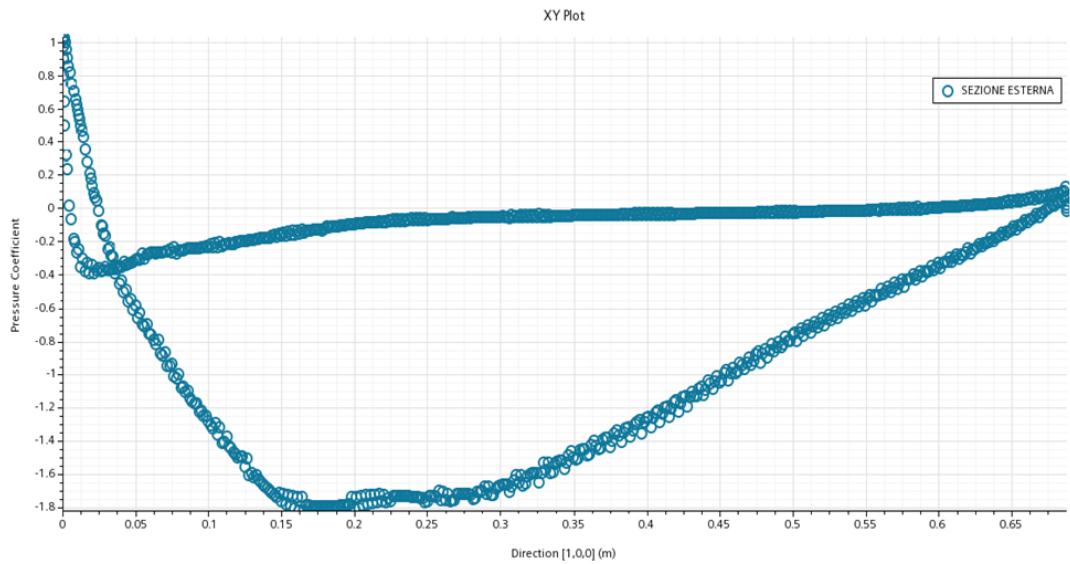
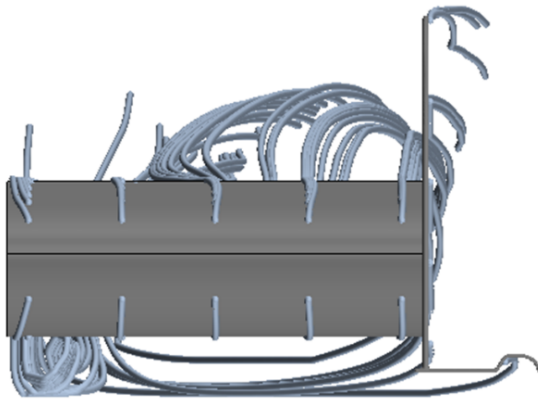


Figura 5.47: Grafico Cp della sezione esterna dell'ENDPLATE 2

A+

VISTA ANTERIORE



-CCM+

VISTA POSTERIORE

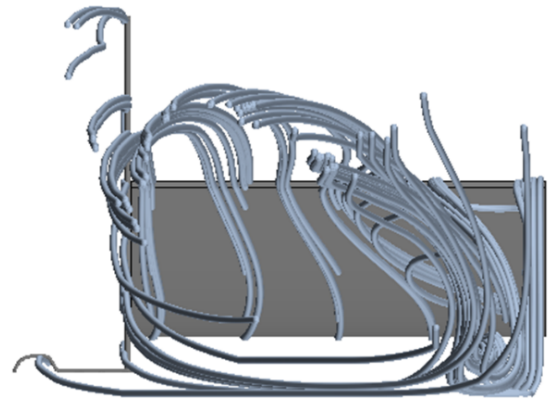


Figura 5.48: Vista frontale e posteriore delle streamlines sull'ENDPLATE 2

Simcenter STAR-CCM+

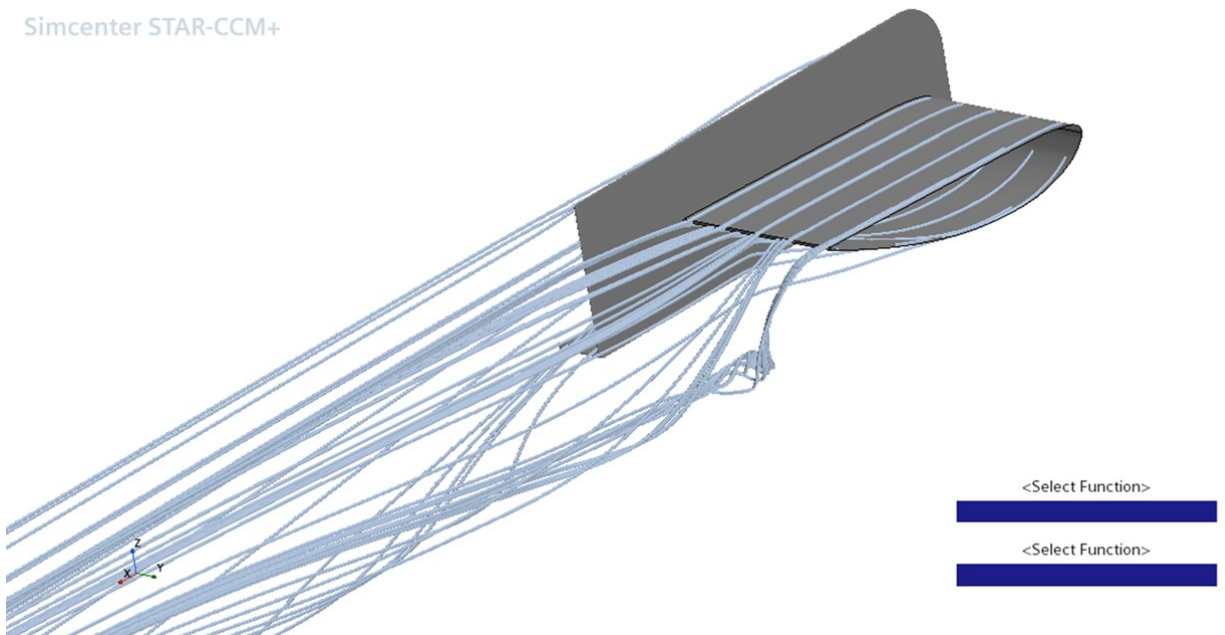


Figura 5.49: Vista prospettica delle streamlines sull'ENDPLATE 2

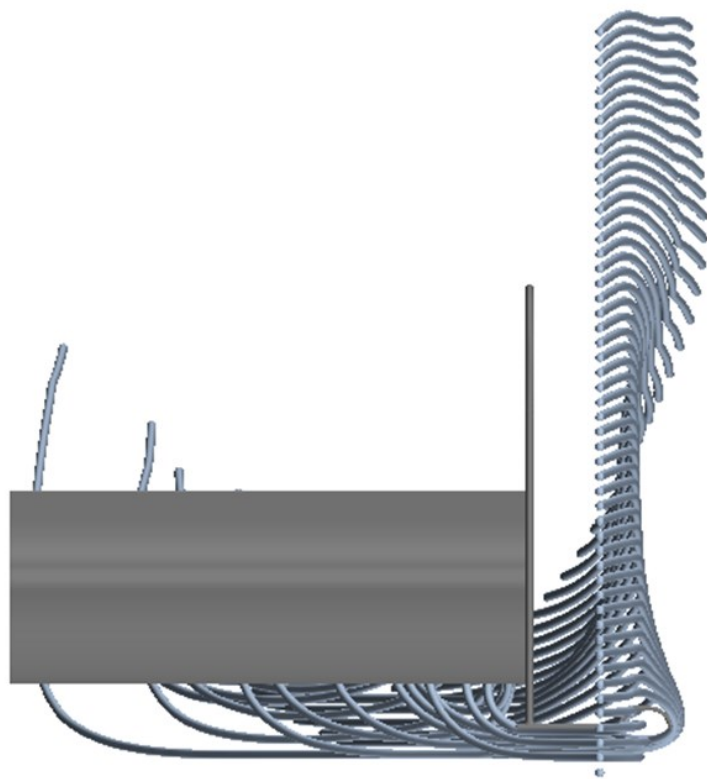


Figura 5.50: Vista frontale delle streamlines nella zona esterna dell'ENDPLATE 2

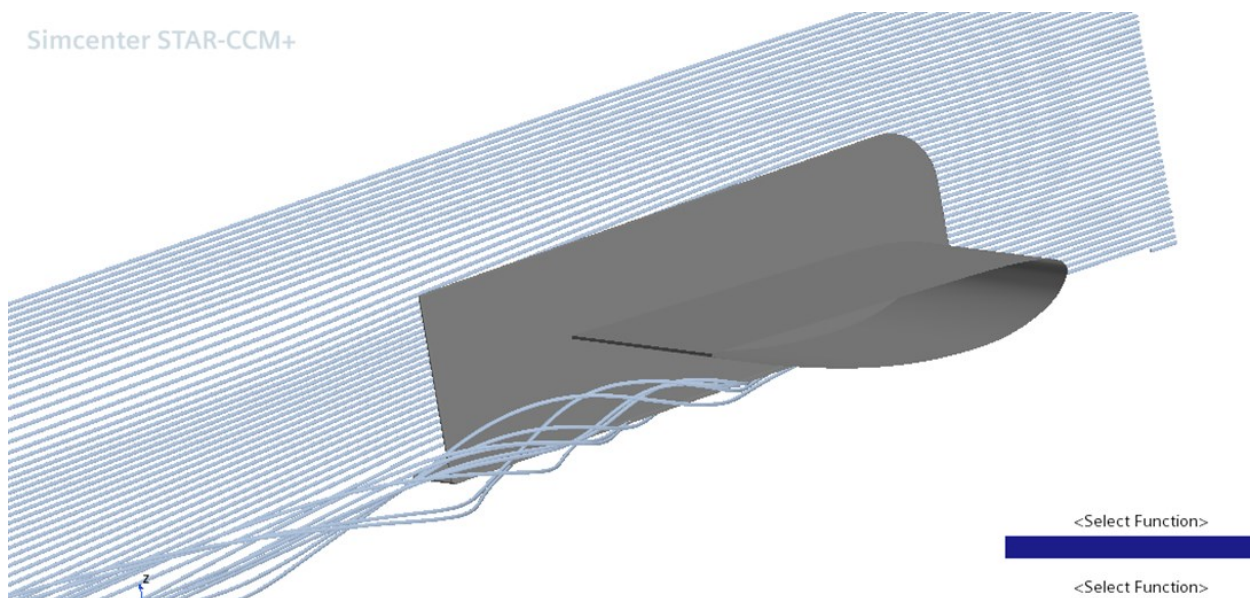


Figura 5.51: Vista prospettica delle streamlines nella zona esterna dell'ENDPLATE 2

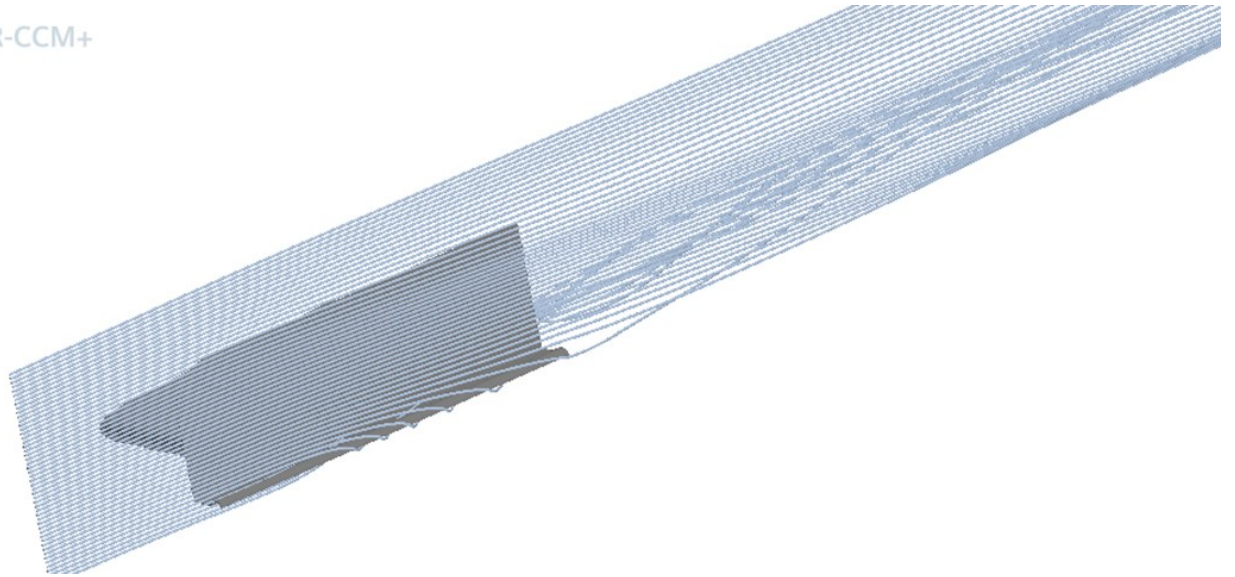


Figura 5.52: Vista prospettica delle streamlines sul generatore di vortici dell'ENDPLATE 2

Un discorso diverso, invece, può essere svolto per l'analisi numerica dell'Endplate 2. Rispetto alle soluzioni confrontate precedentemente, osservando le sezioni del C_p e delle streamlines, si può constatare come tale configurazione risulta più equilibrata nella gestione dei flussi, dimostrata dal buon comportamento registrato nel ventre del profilo, e dall'ottima gestione del vortice di estremità.

In questo caso, quindi, l'estremizzazione del marciapiede ha permesso una buona laminazione della vena fluida lungo l'endplate, e allo stesso tempo, nonostante una geometria del generatore identica all'Endplate 1, una migliore capacità del vortice controrotante di abbassare l'entità del vortice di estremità e una migliore separazione tra la zona a più alta e bassa pressione.

Inoltre, analizzando i numeri derivanti dalle forze e dai coefficienti, si può definire come questa soluzione risulti migliore sotto ogni aspetto analizzato rispetto alle precedenti. Infatti, nonostante la dimensione minore del profilo e una perdita molto bassa di downforce, si può constatare come il valore del C_L risulti migliore rispetto al Sidewing, garantendo così una buona massimizzazione della downforce. Osservando in seguito le forze complessive e i valori dei coefficienti aerodinamici di tutta la configurazione, si può dimostrare ancor di più la bontà aerodinamica del modello.

A questo proposito, si nota una leggera diminuzione del valore del C_L ma, al contrario, un aumento della downforce totale registrata. Quindi, si può affermare che l'Endplate 2, per ora, risulta la soluzione che riesce a garantire il miglior comportamento dei flussi, la migliore gestione del vortice e la deportanza maggiore.

Infine, l'ultima simulazione effettuata riguarda l'Endplate 3, i cui dati raccolti (tabella 5.6), i grafici (figure 5.53, 5.54, 5.55), e le streamlines (figure 5.56, 5.57, 5.58, 5.59, 5.60), sono i seguenti:

ENDPLATE 3			
FORZE ALA		COEFFICIENTI ALA	
DownF	Drag	CL	CD
27,5328 N	2,1223 N	-0,7118	0,0549
FORZE TOTALI		COEFFICIENTI TOTALI	
DownF	Drag	CL	CD
33,7577 N	2,5090 N	-0,5883	0,0437

Tabella 5.6: Valori dei coefficienti e delle forze dell'ala e totali per l'ENDPLATE 3

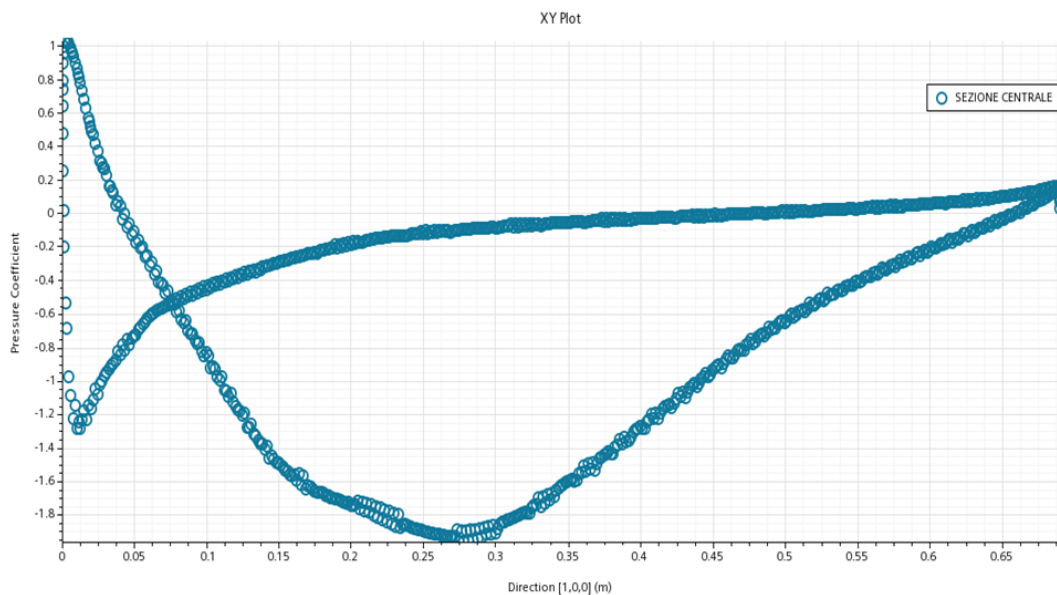


Figura 5.53: Grafico C_p della sezione centrale dell'ENDPLATE 3

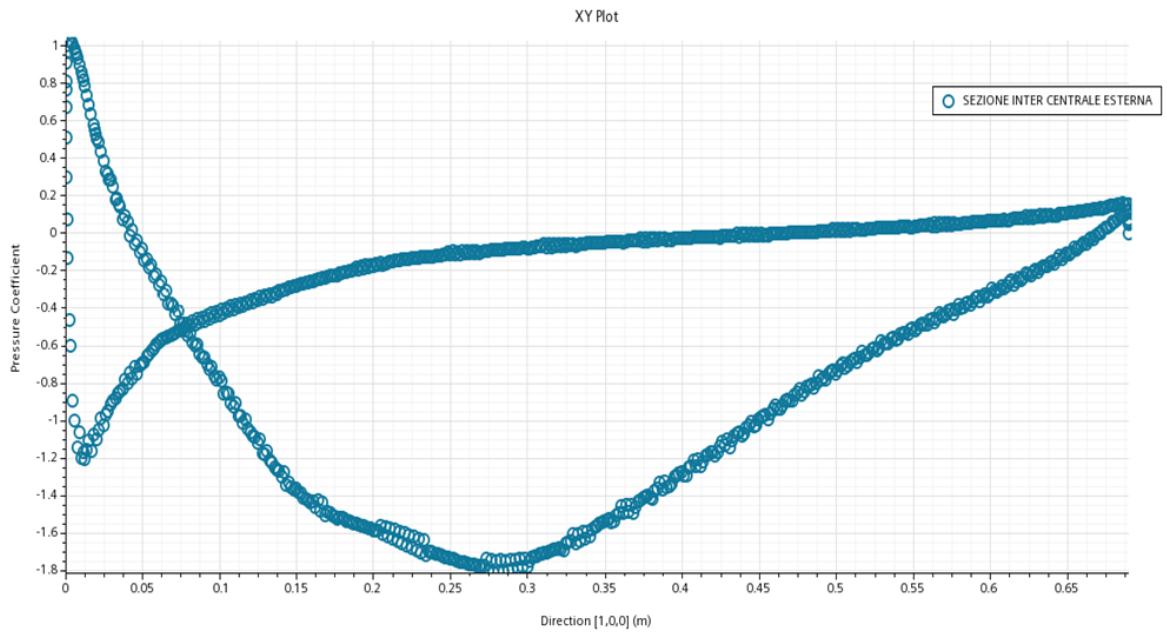


Figura 5.54: Grafico Cp della sezione intermedia dell'ENDPLATE 3

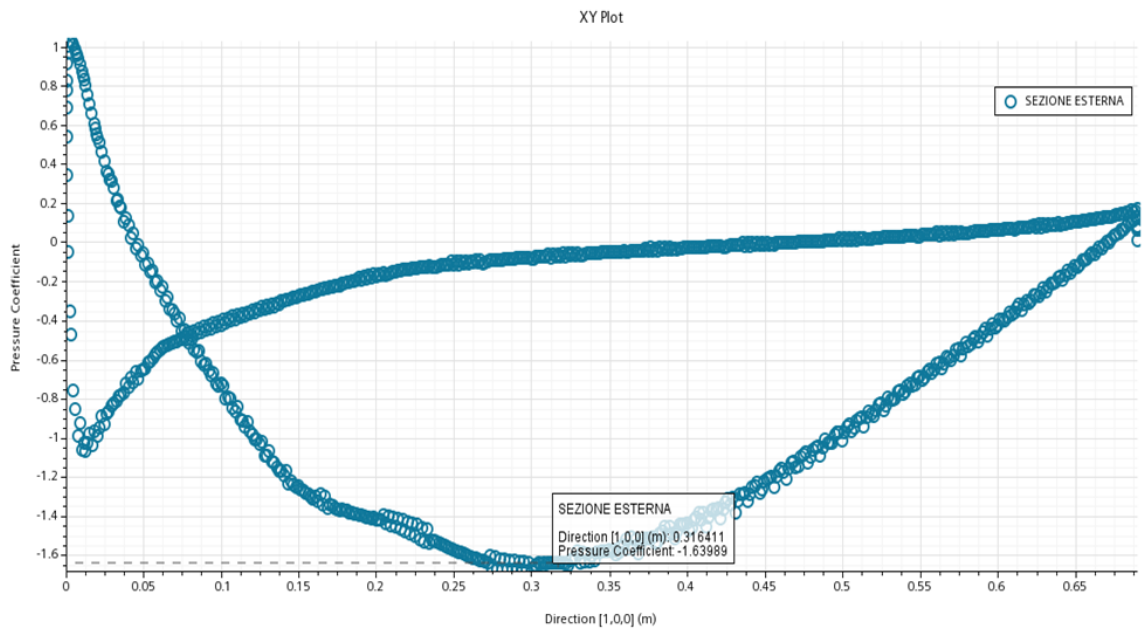


Figura 5.55: Grafico Cp della sezione esterna dell'ENDPLATE 3

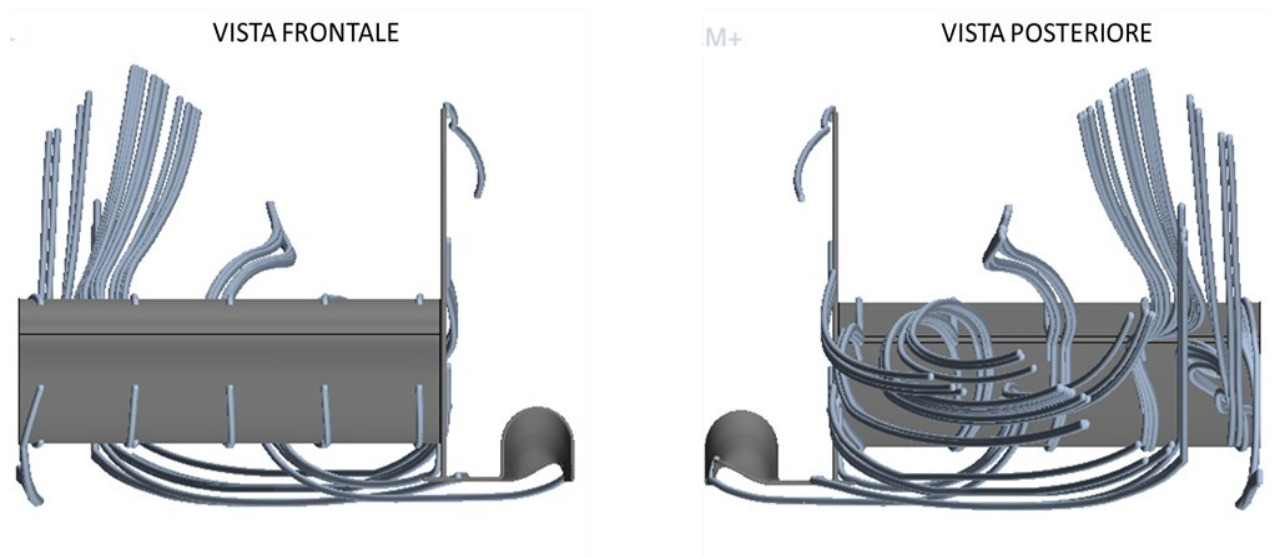


Figura 5.56: Vista frontale e posteriore delle streamlines sull'ENDPLATE 3

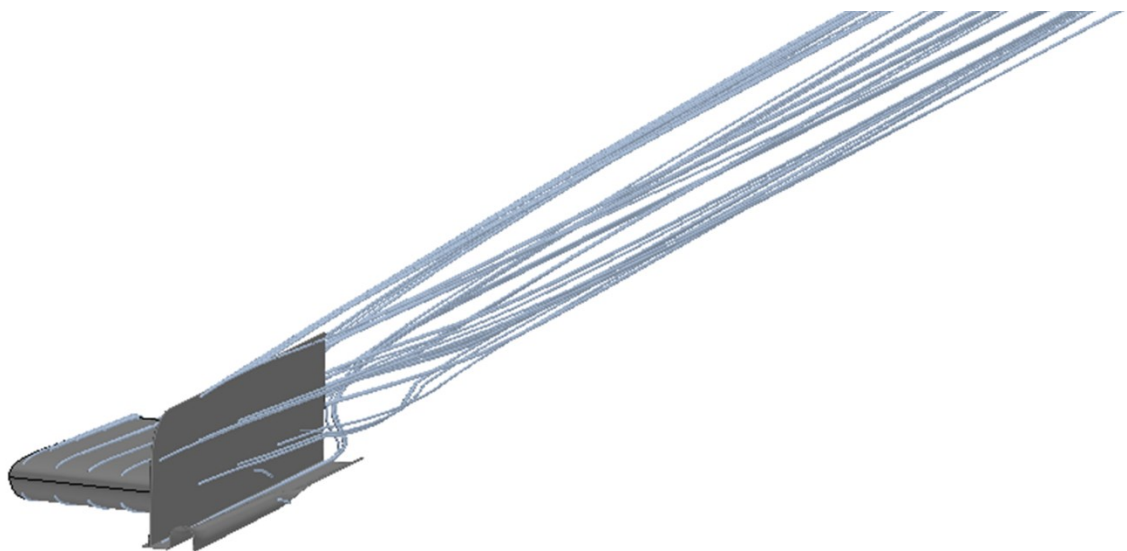


Figura 5.57: Vista prospettica delle streamlines sull'ENDPLATE 3

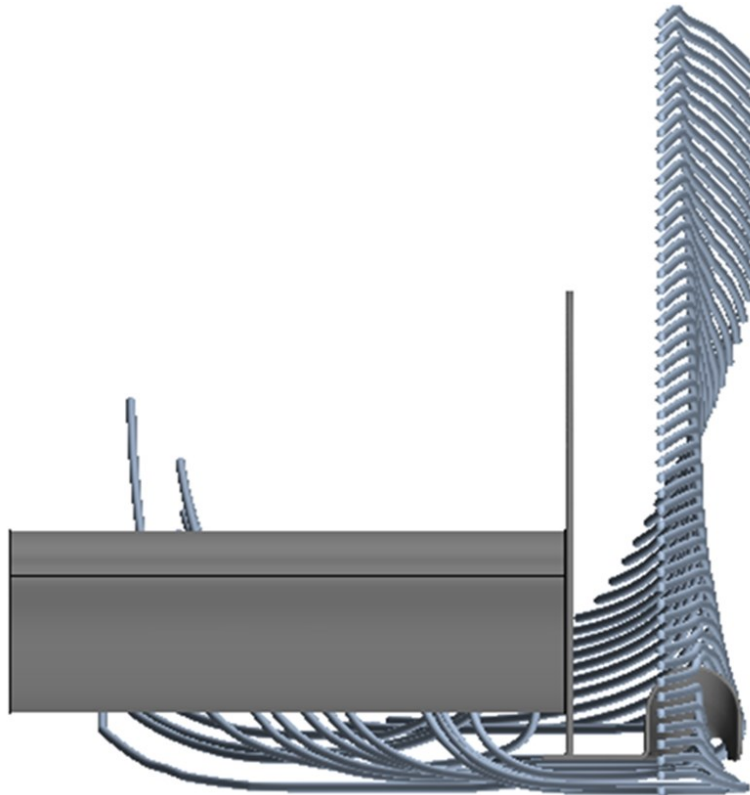


Figura 5.58: Vista frontale delle streamlines sulla zona laterale dell'ENDPLATE 3

inter STAR-CCM+

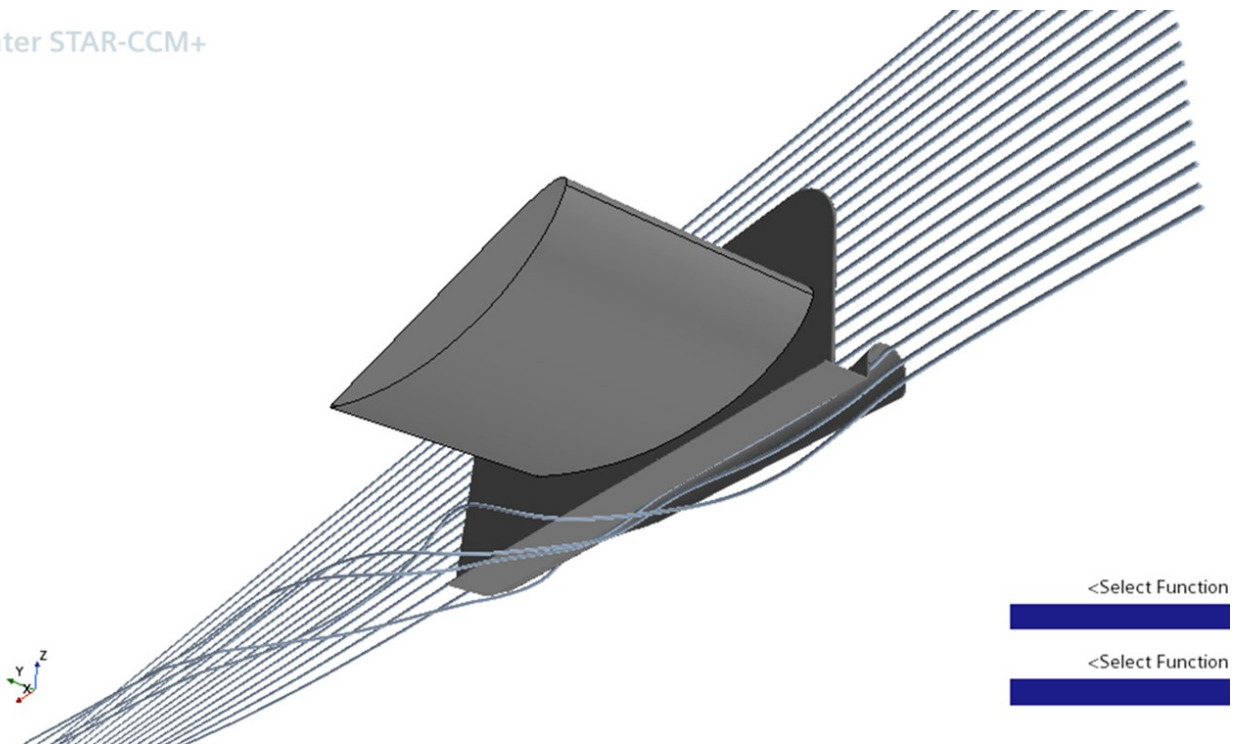


Figura 5.59: Vista inferiore delle streamlines sul generatore dell'ENDPLATE 3

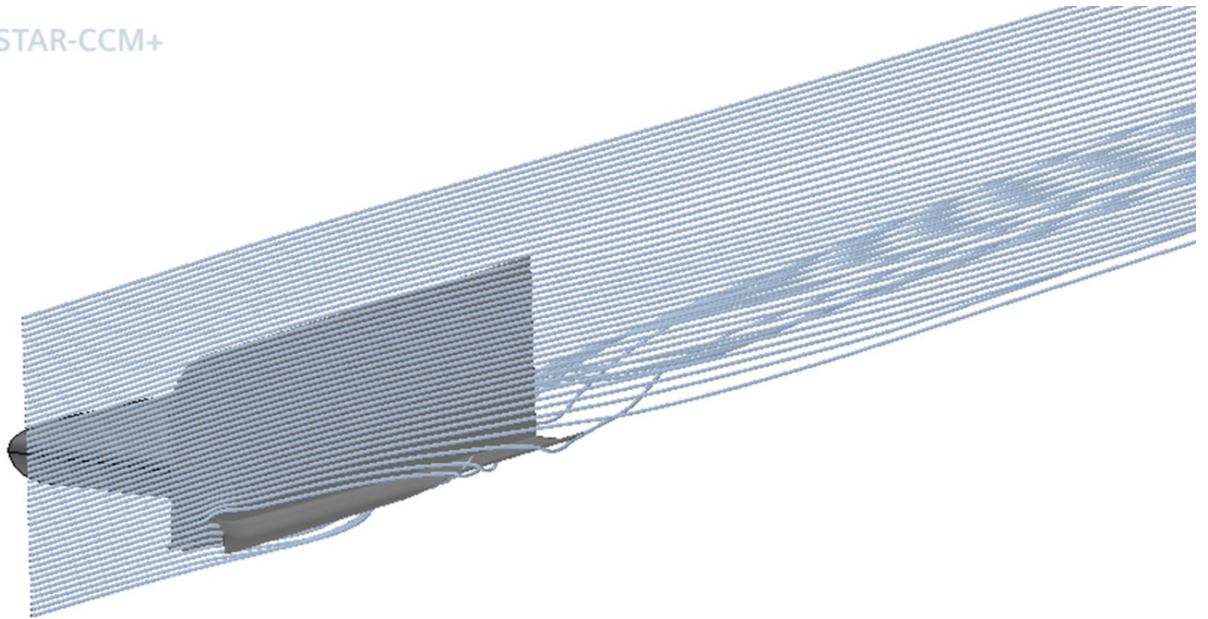


Figura 5.60: Vista prospettica delle streamlines sul generatore dell'ENDPLATE 3

Infine, si è proseguito lo studio comparando l'ultima soluzione studiata, ovvero l'Endplate 3, con le analisi precedenti.

Osservando i risultati ricavati dalle streamlines, si nota come il vortice controrotante creato dal generatore abbassi notevolmente l'intensità del vortice esterno, portando ad una buona laminazione del flusso nella parte terminale del sidepod. Quindi, un risultato migliore rispetto all'Endplate 2.

Analizzando i grafici del C_p di questa configurazione, però, si nota come il comportamento dei flussi sia migliore rispetto al Sidewing, ma risulti leggermente peggiore nella fase di aspirazione e nella zona superiore del profilo rispetto agli Endplate 1 e 2.

Prendendo in analisi i dati numerici delle forze e dei coefficienti, si può definire che, per il solo profilo, si verifica un peggioramento delle prestazioni aerodinamiche sia per la generazione di deportanza, sia per la buona funzionalità del profilo, manifestata dal valore di C_L più basso rispetto al Sidewing e all'Endplate 2. Questa tendenza

negativa, inoltre, risulta addirittura peggiore se si prende in esame la geometria complessiva.

Infatti, osservando le sole forze, tale modello presenta una deportanza generabile minore rispetto alla Sidewing e all'Endplate 2 ma comunque leggermente maggiore rispetto l'Endplate 1. Il dato determinante, però, lo fornisce il valore del C_L , in quanto il più basso registrato tra tutte le simulazioni effettuate. Tale dato, insieme al valore di forza deportante generabile basso, determina come questa configurazione non sia la più adatta agli obiettivi prestazionali stabiliti.

In conclusione, in seguito all'attenta valutazione di tutte le opzioni, si può definire che il concetto aerodinamico che garantisce le migliori prestazioni è l'Endplate 2, dati i valori più elevati di deportanza e C_L ottenuti tramite l'analisi numerica, il buon comportamento dei flussi attorno al modello e la buona attenuazione del vortice di estremità fornita dal generatore di vortici.

CAPITOLO 6: CONCLUSIONI E SPUNTI FUTURI

Giunti alla fine di questo elaborato, si può affermare come gli obiettivi prefissati nei capitoli precedenti siano stati raggiunti, in quanto si è riusciti a trovare un modello tra le varie geometrie realizzate e studiate che:

- Riuscisse a massimizzare la deportanza;
- Garantisse una deportanza costante;
- Avesse una gestione ottimale dei flussi sottostanti al profilo aerodinamico;
- Riducesse il fenomeno del vortice di estremità.

La scelta, infatti, è ricaduta sull'Endplate 2, in quanto, rispetto alle altre alternative, presenta un buon comportamento dei flussi attorno al profilo aerodinamico, una buona gestione del vortice di estremità e i massimi valori di deportanza.

Ovviamente, lo studio presente in questo elaborato non può essere definito come un punto di arrivo, piuttosto come una base di partenza per completare gli studi aerodinamici intrapresi per la nuova vettura elettrica del Polimarche Racing Team.

Per migliorare tale soluzione, infatti, sarà necessario un completamento della geometria tramite l'utilizzo di appendici aerodinamiche supplementari, in modo tale da poter studiare configurazioni aerodinamiche più complesse, come ad esempio un *multi-element*, in grado di generare maggiore deportanza e migliorare ancor di più il comportamento dei flussi nella zona laterale della vettura.

RINGRAZIAMENTI

Finalmente, dopo tanto sudore e notti insonni, si conclude questa prima parte del mio percorso di studi, e non posso che ringraziare tutte le persone che mi hanno accompagnato nel raggiungimento di questo traguardo.

Innanzitutto, vorrei ringraziare il Prof. Ricci e il Dott. Falone per avermi guidato durante l'ultima fase del mio percorso e la stesura di questo elaborato.

In seguito, non posso che ringraziare i miei genitori, Saverio e Rosa, le mie colonne portanti. Coloro che mi hanno insegnato da sempre che con sacrificio e dedizione si possono raggiungere grandi traguardi. Sapete che sono un ragazzo abbastanza timido, ma colgo l'occasione per dirvi che vi voglio tanto bene e che vi devo tutto, anche qualche ora di sonno sprecata per colpa mia durante questi anni. Inoltre, non posso non ringraziare le mie sorelline, nonostante i guai che mi fanno passare. Sono felice di avervi accanto ogni giorno, e sono molto fiero di voi.

Ringrazio i miei nonni, Vincenzo, Isabella, Maria e Pasquale, che fin da piccolo mi guidano affinché possa raggiungere tutti i miei sogni con la loro saggezza e a suon di pranzi esagerati.

Ringrazio tutti i miei parenti e i miei cugini, che nonostante la lontananza mi hanno sempre supportato e fatto sorridere ogni volta che mi hanno ricordato tutti i guai che gli facevo passare quando ero bambino.

Ringrazio Cate, la mia splendida ragazza, che mi supporta e mi sopporta senza sosta da anni ormai. Ti ringrazio per tutti i bellissimoi momenti passati insieme e soprattutto per essermi stata vicino nei momenti più difficili, per avermi incoraggiato a non mollare mai e a credere sempre in me stesso. Sono davvero felice di averti accanto.

Ringrazio tutti i coinquilini avuti durante questo periodo, ovvero Simone, Pasquale, Giuseppe e Riccardo, per tutte le risate, gli scherzi e per non avermi cacciato di casa durante i periodi di studio più intensi.

Ringrazio gli amici di sempre, Leo, Simone Silvestri, Mattia, Federica Ruggiero, Chiara, Alessandro, Felicia, Federica Travaglini e Simone Stante, con cui ho passato tanti momenti felici che non scorderò mai. Purtroppo, si sa, gli obiettivi che tutti noi inseguiamo ci portano ad allontanarci ad un certo punto, ma spero che il nostro legame non si sciolga mai.

Ringrazio Pietro, per la bell'amicizia che si è creata nel tempo e per le risate che ci facciamo ricordando le superiori e ogni volta che ci rivediamo.

Ringrazio tutti i nuovi amici conosciuti durante questo percorso, Marco, Matteo, Miriana, Carlo, Siria, Emanuele, Beatrice, Edoardo, Maria Giulia, Martina e Filippo, con cui ho passato giornate di studio, serate e momenti rilassanti insieme.

Ringrazio i ragazzi del Polimarche Racing Team, in particolare il gruppo di Aerodinamica, per avermi aiutato e per aver accresciuto ancor di più la mia passione verso le auto e tutto ciò che lo circonda.

Infine, voglio congratularmi con me stesso, per non aver mollato e per aver affrontato con determinazione questo primo percorso di studi. Inoltre, mando un grande “in bocca al lupo” al Vincenzo del futuro, per incoraggiarlo ad impegnarsi sempre di più nell'affrontare tutte le sue paure, le difficoltà del percorso che intraprenderà e per raggiungere tutti i suoi obiettivi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Gaggiotti Marco, Progettazione ala posteriore vettura Formula Sae (2022).
Tesi di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica, Università Politecnica delle Marche.
- [2] Trisciani Alessio, Studio sulla funzione aerodinamica delle sospensioni di una vettura Formula Sae (2021).
Tesi di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica, Università Politecnica delle Marche.
- [3] Cicchini Alessandro, L'aerodinamica di una vettura Formula Sae a trazione elettrica (2021).
Tesi di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica, Università Politecnica delle Marche.
- [4] Rocchetti Lorenzo, Autovettura Formula SAE a trazione elettrica: Analisi dinamica dei carichi su un circuito di riferimento (2022).
Tesi di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica, Università Politecnica delle Marche
- [5] Ricci Renato, Appunti del corso di Aerodinamica applicata (2022).
Docente Prof. Renato Ricci, Università Politecnica delle Marche.
- [6] J. Katz, Race Car Aerodynamics designed for speed (1995). Bentley Publisher.
- [7] https://it.wikipedia.org/wiki/Vettura_di_Formula_1
- [8] https://it.wikipedia.org/wiki/Profilo_alare
- [9] Aerodinamica dei veicoli terrestri- Seconda Parte, di Covini Gianluca. 10 gennaio 2017
<https://www.autotecnica.org/aerodinamica-dei-veicoli-terrestri-seconda-parte/>
- [10] Potino Savino, Analisi RANS bidimensionale e tridimensionale per la palettatura di una turbina aeronautica.

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale, Politecnico di Torino

[11] D'Alessandro Valerio, Modellazione della turbolenza: Introduzione alle tecniche numeriche "RANS" e "LES".

Dottorato di ricerca in "Energetica": Gruppo di Termofluidodinamica, Università Politecnica delle Marche.

[12] Capozzi Marco, Modellazione della turbolenza: Approccio "Rans"

Master in "Science in Aerospace Engineering", Mississippi State University (USA).

[13] https://en.wikipedia.org/wiki/Gamma-Re_Transition_Model

[14] https://it.wikipedia.org/wiki/Modello_k-epsilon

[15] https://en.wikipedia.org/wiki/K%E2%80%93omega_turbulence_model

[16] https://en.wikipedia.org/wiki/Menter%27s_Shear_Stress_Transport