

Università Politecnica delle Marche



Facoltà di Ingegneria

Corso Di Laurea in Ingegneria Meccanica

**Ottimizzazione aerodinamica di un'ala
anteriore di una vettura di formula
SAE.**

**Aerodynamic optimization of a Formula
SAE car's front wing.**

Relatore: prof.

Andrea Crivellini

Studente

Elisa Rinaldi

A.A.2025/2026

*“A te che trovi il coraggio
di lottare ogni giorno per
inseguire i tuoi sogni”*

Indice

Indice delle figure.....	iii
Indice delle tabelle.....	v
SOMMARIO	1
CAPITOLO 1: FORMULA SAE	2
1.1 Cos'è la formula SAE.....	2
1.2 eventi e struttura di gara	2
1.3 Eventi statici.....	3
1.3.1 Business Plan Presentation event	3
1.3.2 Cost and Manufacturing Event.....	4
1.3.3 Engineering Design Event.....	4
1.4 Eventi dinamici.....	4
1.4.1 Skidpad Event.....	5
1.4.2 Acceleration Event	5
1.4.3 Autocross Event	5
1.4.4 Endurance and Efficiency Event	6
1.5 Regolamento inerente allo sviluppo	6
1.6 Il Polimarche Racing Team	7
1.7 Metodo di lavoro	12
CAPITOLO 2: ELEMENTI DI AERODINAMICA.....	14
2.1 Storia e cenni di aerodinamica	14
2.2 Aerodinamica delle vetture elettriche.....	14
2.3 Azioni aerodinamiche.....	15
2.4 Coefficienti adimensionali	16
2.5 strato limite.....	17
2.6 Streamline.....	18
2.7 numero di Reynolds.....	19
2.8 Equazione Bernoulli	20
2.9 Equazioni di Navier-Stokes.....	22
2.10 Profili alari.....	23
2.11 elementi di per migliorare le prestazioni dell'ala anteriore	26
CAPITOLO 3: Computational Fluid Dynamics (CFD)	28
3.1 Fondamenti di CFD.....	29
3.1.1 modelli di turbolenza.....	30

3.2 programmi utilizzati	31
3.3 Impostazione simulazione	32
3.3.1 Modello e dominio	32
3.3.2 Surface Wrapper.....	34
3.3.3 Mesh	35
3.3.4 Fisica del problema	37
3.3.5 Condizioni al contorno	37
CAPITOLO 4: Ottimizzazione e analisi.....	39
4.1 Turning Vanes	42
4.1.1 obbiettivo fluidodinamico e selezione della geometria	42
4.1.2 Turning vanes “Turn1”	43
4.1.3 Turning vanes “Turn2”	46
4.1.4 Turning vanes “Turn3”	47
4.1.5 Turning vanes “Turn4”	49
4.1.6 Turning vanes “Turn5”	52
4.1.7 Confronto simulazioni.....	54
4.2 dive plane	56
4.2.1 obbiettivo fluidodinamico e selezione della geometria	56
4.2.2 Dive plane “DP1 no turning vanes”	58
4.2.3 Dive plane “DP1”	60
4.2.4 Dive plane “DP1 y+” e Dive plane “DP1 y-”	61
4.2.5 Dive plane “DP2”	64
4.2.6 Dive plane “DP3”	66
4.2.7 Dive plane “DP4”	69
4.2.8 Dive plane “DP5”	71
4.3 supporti.....	73
4.4 regolazioni flap.....	76
Capitolo 5: conclusioni e futuri aggiornamenti	79
5.1 futuri aggiornamenti	80
Bibliografia.....	82

Indice delle figure

Figura 1 - punteggi Business Plan Presentation event.....	3
Figura 2 - cost and manufacturing event.....	4
Figura 3 - Engineering Design Event.....	4
Figura 4 - Skidpad layout pista.....	5
Figura 5 - limitazioni ingombri regolamento F.SAE.....	7
Figura 6 - vettura Peacock 1.....	8
Figura 7 - scheda tecnica Peacock 1.....	8
Figura 8 - Peacock 2.....	9
Figura 9 - scheda tecnica Peacock 2.....	9
Figura 10 - Peacock 3.....	9
Figura 11- scheda tecnica Peacock 3.....	10
Figura 12 - scheda tecnica Peacock 3 EVO.....	10
Figura 13 - Peacock 4.....	11
Figura 14 - scheda tecnica Peacock 4.....	11
Figura 15 - scheda tecnica Peacock 4 EVO.....	11
Figura 16 - metodo di lavoro.....	12
Figura 17 - gradiente di velocità e strato limite.....	18
Figura 18 - streamline su un profilo.....	19
Figura 19 - streamline su macchina completa.....	19
Figura 20 - Equazioni di Navier-Stokes.....	23
Figura 21 - Profilo NACA 4 cifre.....	23
Figura 22 - Profilo NACA 5 cifre.....	24
Figura 23 - Profilo NACA 6 cifre.....	24
Figura 24 - Parti di un profilo.....	25
Figura 25 - semplificazione CAD per CFD.....	33
Figura 26 - Indicazioni per la creazione del dominio.....	33
Figura 27 - fisiche usate nel CFD.....	37
Figura 28 - profilo GAW 1.....	39
Figura 29 - Profilo Clark Y.....	39
Figura 30 - Configurazione iniziale ala anteriore.....	40
Figura 31 - scena di pressione iniziale e geometria iniziale.....	40
Figura 32 - Grafico Cp configurazione iniziale.....	40
Figura 33 - Turn 1.....	43
Figura 34 - Scena di pressione e Streamline Turn 1.....	45
Figura 35 - Scena di Pressione con Turn 1.....	45
Figura 36 - Scena con Streamline della macchina con Turn 1.....	45
Figura 37 - Vista in dettaglio del Turn 2.....	46
Figura 38 - Confronto Turn 2 e Baseline.....	46
Figura 39 - Turn 3.....	48
Figura 40 - Scena di pressione e streamline Turn 3.....	48
Figura 41 - Scena di pressione e streamline Turn 4.....	50
Figura 42 - streamline Turn 4.....	51
Figura 43 - Turn 5.....	53
Figura 44 - Scena di pressione Turn 5.....	53
Figura 45 -Scena di pressione fondo Turn 5.....	54
Figura 46 - scena di pressione Dp1 no Turn.....	59
Figura 47 - Dp1.....	60

Figura 48 - Scena di pressione Dp1	61
Figura 49 - Scena di pressione DP1 y+	63
Figura 50 - Scena di pressione DP1 y-	63
Figura 51 - Scena di pressione Dp2.....	65
Figura 52 - Dp2	65
Figura 53 - Scene Stream line Dp2	66
Figura 54 - Dp3	67
Figura 55 - Scene di pressione e streamline Dp3	69
Figura 56 - Scena di pressione Dp4.....	71
Figura 57 - Scene di pressione Dp5.....	73
Figura 58 - Supporto P4	73
Figura 59 - Supporto versione lamina piatta	74
Figura 60 - Supporto laminato con profilo	74
Figura 61- Analisi FEM supporto	75
Figura 62 - Regolazione Soluzione 2	77
Figura 63 - Regolazione Soluzione 1	77
Figura 64 - Analisi di pressione Regolazione Soluzione 1	78
Figura 65 - Configurazione Ala anteriore Finale	80

Indice delle tabelle

Tabella 1 - valori numero di Reynolds in una gara di Formula SAE	20
Tabella 2 - Valori di riferimento configurazione iniziale.....	40
Tabella 3 - Iter progettuale dei turning vane	43
Tabella 4 - Confronto Turn 1 e Baseline.....	44
Tabella 5 - Confronto Turn 3 e Baseline.....	48
Tabella 6 -Confronto Turn 4 e Baseline	50
Tabella 7 - Confronto Turn 5 e Baseline.....	52
Tabella 8 - Tabella riassuntiva Turning vanes	56
Tabella 9 - Iter progettuale dei Dive Plane.....	57
Tabella 10 - Confronto Dp 1no Turn e Baseline	58
Tabella 11 - Tabella confronto simulazioni analisi di posizione Dive plane	62
Tabella 12 - Confronto Dp1 e Dp2.....	64
Tabella 13 - Confronto Dp1 e Dp3.....	68
Tabella 14 - Confronto Dp1 e Dp4.....	70
Tabella 15 - Confronto Dp1 e Dp5.....	72
Tabella 16 - valori ala anteriore finale	80
Tabella 17 - Streamline cover braccetti.....	81

SOMMARIO

Questo studio ha l'obiettivo di incrementare le prestazioni del pacchetto aerodinamico di una vettura elettrica di Formula SAE, con particolare attenzione allo sviluppo dell'ala anteriore. Il lavoro parte da una configurazione di base precedentemente studiata dal team e si concentra sull'introduzione di elementi aggiuntivi e sull'ottimizzazione delle soluzioni esistenti.

Nella prima parte vengono introdotti la competizione Formula SAE, i principali vincoli regolamentari e i fondamenti teorici necessari allo studio aerodinamico e fluidodinamico. Successivamente vengono descritte le impostazioni delle simulazioni CFD, l'analisi dei risultati ottenuti e le possibili evoluzioni future del pacchetto aerodinamico.

Gli elementi principali analizzati sono i Turning vanes, i Dive planes, i supporti dell'ala anteriore, le regolazioni dei flap e le cover dei braccetti sospensivi.

- Turning vane, un elemento che posizionato sul main plane si propone di deviare il flusso diretto sulle ruote anteriori così da diminuirne la portanza.
- Dive plane, un generatore di vortice che tramite un vortice controrotante che dovrebbe schermare la parte esterna della ruota diminuendone la portanza.
- Regolazioni e supporti, si cerca di diminuire la resistenza aerodinamica e di trovare le varie configurazioni per cercare di migliorare le performance di gara.
- Cover dei braccetti, vengono presentati come sviluppo futuro.

CAPITOLO 1: FORMULA SAE

1.1 Cos'è la formula SAE

La formula SAE è una competizione universitaria internazionale nata nel 1981 in America come gara di design ingegneristico dalla Society of Automotive Engineers. Nata dall'idea di Ron Matthews, professore presso l'università del Texas, che propose di espandere a un tracciato stradale la gara della Mini Baja (Mini Indy della SAE, competizione per studenti che si teneva su un tracciato sterrato). L'idea nasceva dal bisogno di far approcciare gli studenti universitari a un ambito lavorativo più realistico dove la teoria non coincide perfettamente con la pratica, così da formare nuovi elementi per il mondo dell'automotive. Nel primo anno della competizione parteciparono solo 4 università ma l'evento in America ebbe un impatto nazionale con interesse proveniente da grandi nomi del settore automobilistico come da General Motors, Ford, Southwest Research Institute, e con la presenza come giudice del famoso pilota/ingegnere di auto da corsa Jim Hall, che è arrivato a presenziare appositamente dalla 500 Miglia di Indianapolis. La competizione inizialmente comprendeva solo 4 eventi dinamici ma visto che si andava sacrificando l'efficienza dei veicoli in favore unicamente delle prestazioni negli anni successivi fu introdotta una parte di eventi statici così da dare risalto alla parte progettuale e incentrare la competizione sulla parte ingegneristica e non solo sulle performance del pilota o del veicolo. A partire dal 1998 la competizione inizia a svolgersi in Europa al circuito di MIRA (Motor Industry Research Association) in un evento organizzato dalla IMechE (Institution of Mechanical Engineers) sotto il nome di Formula Student un evento co-patrocinato dalla SAE. Nel 2005 Arriva anche in Italia sotto il nome di formula ATA che si svolge ogni anno ormai dalla quinta edizione a Varano de' Melegari. Da allora si è diffusa in tutta Europa arrivando ad oggi nel 2025 a 10 competizioni ufficiali e altre competizioni minori.

1.2 eventi e struttura di gara

Una competizione di formula SAE si struttura suddividendosi in eventi statici e prove dinamiche, prima di accedere a tali eventi però è necessario passare un'ispezione tecnica che consiste in

- Pre-Inspection: dove bisogna presentare tutti i caschi, i dispositivi di sicurezza insieme all'equipaggiamento pilota, due estintori in corso di validità, un set di quattro pneumatici su cerchi sia per gareggiare sull'asciutto che un set per correre sul bagnato.
- Accumulator inspection: è necessario aver installato un dispositivo per la registrazione della temperatura, il caricatore dell'accumulatore dopo l'ispezione verrà sigillato, verranno ispezionati gli utensili base, tutti gli accumulatori TS, il carrello manuale per gli accumulatori, i caricabatterie, le attrezzature di assemblaggio e disassemblaggio, campioni di PCB auto progettati, le schede tecniche dei componenti dell'accumulatore. Non è necessario in questo passaggio disassemblare i moduli se gli AIR, i fusibili, il circuito precarica e il meccanismo di

bloccaggio dei connettori di manutenzione sono raggiungibili e visibili dai funzionari.

- **Electrical Ispection:** viene misurata la resistenza dell'isolamento e la massa LVS, che deve essere di almeno $500\Omega/V$ per poter superare la prova. Poi viene testato L'IMD e infine il BSPD.
- **Mechanical inspection:** si verifica che ogni parte meccanica ed elettrica rispetti i dati tecnici presentati e che abbiano il corretto funzionamento.
- **Tilt test:** in questo test è previsto che la macchina sia posizionata su una piattaforma basculante e inclinata con un'angolazione di 60° senza che ci sia alcuna fuoriuscita di liquidi
- **Vehicle Weighing:** avviene la misurazione del peso del veicolo
- **Rain test:** la vettura viene posta sotto un'apposita struttura progettata per simulare una situazione di pioggia e che permette di mandare l'acqua in ogni direzione, il test è superato se si prova la perfetta tenuta stagna della vettura
- **Brake test:** è una prova sull'affidabilità dei freni, in cui dopo una breve accelerazione su un tratto rettilineo bisogna bloccare contemporaneamente tutte e 4 le ruote.

Una volta completati tutti gli eventi dell'ispezione tecnica si può partecipare agli eventi principali della competizione.

1.3 Eventi statici

1.3.1 Business Plan Presentation event

Viene valutato durante l'evento la capacità del team di sviluppare un'idea di business che si basa sulle indicazioni date dalle linee guida indicate che possono variare tra i vari anni. Il team si troverà a presentare la propria idea ai giudici che impersoneranno degli investitori interessati. Per poter convincere i potenziali investitori che la presentazione merita attenzione si invia prima un Business Plan Pitch Video (BPPV) dove si espone a grandi linee l'idea che è stata sviluppata. Al termine verranno assegnati i punteggi in ogni aspetto di interesse

Category	Points
Pitch Video	10
Content	20
Finances	10
Deep Dive Topic	10
Demonstration and Structure	15
Delivery	10
Questions	10
General Impression	15
Total	100

Figura 1 - punteggi Business Plan Presentation event

1.3.2 Cost and Manufacturing Event

Il Cost and Manufacturing Event è un evento durante il quale viene valutata la capacità di costificare e comprendere i vari processi produttivi, inoltre si analizza come vengono gestiti i fondi e le risorse includendo ogni informazione sulle risorse e sui componenti sia make che buy. Un particolare sguardo di interesse va alla gestione degli scarti delle produzioni, alle soluzioni eco sostenibili e alle emissioni di CO2. Al termine verranno assegnati i punteggi, distribuiti nel seguente modo

Category	Points
Part 1 “BOM Discussion”	50
Part 2 “Cost Understanding”	25
Part 3 “Real Case”	25
Total	100

Figura 2 - cost and manufacturing event

1.3.3 Engineering Design Event

Il concetto da cui si sviluppa questo evento è quello di valutare il processo ingegneristico e l’impegno che lo studente impiega nella progettazione, nello specifico vengono valutate lo sviluppo delle componenti finite e come queste vengano integrate nella vettura. Al fine di tale valutazione viene redatto un documento chiamato “Engineering Design Report”, che contiene una descrizione complessiva della vettura, e le informazioni necessarie per esprimere gli obiettivi progettuali e esprimere il valore e le prestazioni del veicolo. Al termine verranno assegnati i punteggi in ogni aspetto di interesse seguendo il seguente schema

Category	Points
Overall Vehicle Concept	20
Software	10
Vehicle Performance	30
Mechanical / Structural	15
Tractive System / Powertrain	25
LV-Electrics / Electronics	10
Autonomous Functionality	20
Driver Interface	10
Engineering Design Report (EDR)	10

Figura 3 - Engineering Design Event

1.4 Eventi dinamici

In questa parte della competizione la vettura viene finalmente messa su pista, valutandone le prestazioni in 4 eventi ognuno con un tracciato specifico così da poter esaminare un aspetto in particolare dell’autoveicolo.

1.4.1 Skidpad Event

Si effettua la prova su un tracciato composto da due coppie di cerchi concentrici disposti a forma di otto si effettueranno 2 giri a destra e a seguire 2 giri a sinistra di cui verranno cronometrati solamente i secondi giri in entrambe le direzioni, facendone poi la media. Tale prova si concentra in particolare nella valutazione delle prestazioni in curva ad alta velocità. Come al termine di ogni prova andranno assegnati i punteggi che in questo caso variano e sono proporzionali al miglior tempo registrato.

$$M_SKIDPAD_SCORE = 0.95 P_{max} \left(\frac{\left(\frac{T_{max}}{T_{team}} \right)^2 - 1}{0.5625} \right) + 0.05 P_{max}$$

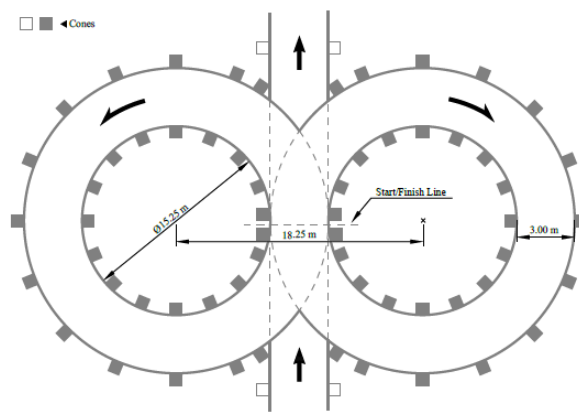


Figura 4 - Skidpad layout pista

1.4.2 Acceleration Event

In tale prova si cerca la massima accelerazione possibile su un tracciato lungo 75 m e larga 3m. Il punteggio assegnato è proporzionale al miglior tempo fatto tra i vari team che partecipano alla competizione, e si calcola seguendo la seguente formula

$$M_ACCELERATION_SCORE = 0.95 P_{max} \left(\frac{\left(\frac{T_{max}}{T_{team}} - 1 \right)}{0.5} \right) + 0.05 P_{max}$$

1.4.3 Autocross Event

Si procede a cercare le massime prestazioni su un tracciato di guida sviluppato secondo le seguenti linee guida:

- Lunghezza: al massimo rettilinei non più lunghi di 80 m e lunghezza totale inferiore ai 1,5 km
- Slalom: i coni distribuiti linearmente con una spaziatura regolare per una lunghezza dai 7,5 m ai 12 m

- Variazioni: sono presenti tornanti, curve multiple, chicane, curve a raggio decrescente, e altre possibili tipologie.
- Larghezza: il minimo consentito è di 3 m
- Diametro: il minimo richiesto è di 9 m

Si valuta la prestazione in base alla formula

$$\text{AUTOCROSS_SCORE} = 0.95 P_{max} \left(\frac{\frac{T_{max}}{T_{team}} - 1}{0.25} \right) + 0.05 P_{max}$$

1.4.4 Endurance and Efficiency Event

L'endurance è l'evento principale e il più completo a livello di performance della competizione. In questo evento che si svolge su un circuito con il tracciato con le stesse caratteristiche dell'autocross, lungo 22 km e con un cambio pilota previsto a metà prova. L'obiettivo è quello di riuscire a completare il percorso nel minor tempo possibile. A prescindere vengono conseguiti 25 punti se si esegue completamente la prova e in seguito un punteggio proporzionale alle tempistiche del miglior team

$$\text{ENDURANCE_SCORE} = 0.9 P_{max} \left(\frac{\frac{T_{max}}{T_{team}} - 1}{0.333} \right) + 0.1 P_{max}$$

Per tutti coloro che terminano L'endurance una parte importante è quella dell'efficienza, dove vengono valutati i consumi della vettura.

$$\text{EFFICIENCY_SCORE} = P_{max} \left(\frac{EF_{max} - EF_{team}}{EF_{max} - EF_{min}} \right)$$

1.5 Regolamento inerente allo sviluppo

Per poter gareggiare con la vettura bisogna rientrare all'interno del regolamento della Formula SAE; quindi, per procedere allo sviluppo è stato analizzato al fine di identificare i limiti progettuali. Le parti che sono state considerate nello specifico in questo sviluppo consiste nel capitolo T8. In questo capitolo viene definito nel primo paragrafo cos'è un dispositivo aerodinamico, che viene descritto come una componente sviluppata per direzionare il flusso d'aria creando una distribuzione di carico aerodinamico o riducendo la resistenza. Nel secondo paragrafo invece vengono definite le limitazioni geometriche definendo:

- In altezza: le limitazioni riguardanti l'altezza variano a seconda della zona del veicolo, davanti al supporto della testa del pilota bisogna rimanere sotto i 500mm da terra, mentre davanti all'asse anteriore e nelle zone più larghe dell'interasse delle

ruote bisogna rimanere sotto i 250 mm, infine dietro al supporto della testa del pilota bisogna sottostare ai 1200mm da terra.

- In larghezza: le limitazioni impongono di rimanere se si è sotto i 500mm di altezza, e dietro l'asse anteriore, non oltre la larghezza massima degli pneumatici. Mentre se si superano i 500 mm non bisogna oltrepassare il bordo interno degli pneumatici posteriori
- In lunghezza: nella parte posteriore della vettura si può al massimo sporgere di 250mm oltre il bordo posteriore delle ruote posteriori. Mentre nella parte anteriore si può sporgere ad un massimo di 700 mm oltre il bordo davanti delle ruote anteriori.

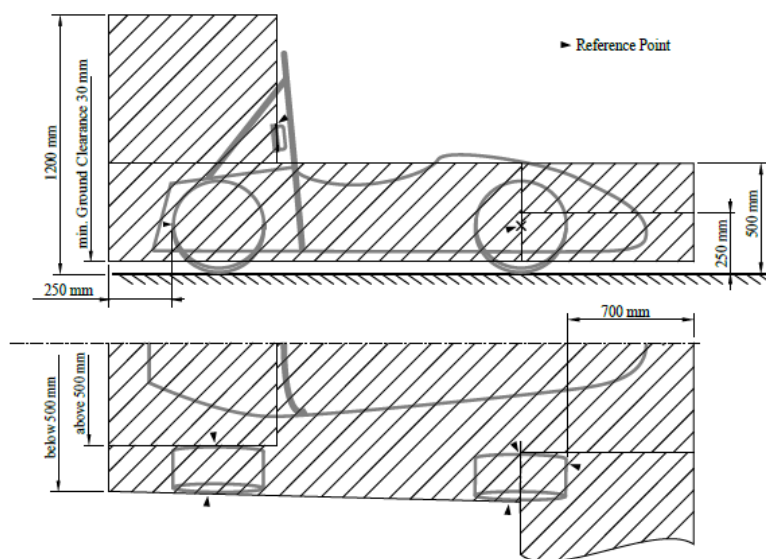


Figura 5 - limitazioni ingombri regolamento F.SAE

Nell'ultima parte del capitolo T8 del regolamento viene trattata la parte di stabilità e resistenza, definendo che le superfici aerodinamiche devono resistere a 200N applicati su 225cm² senza flettersi più di 10mm nella direzione di carico, e resistere a 50 N in qualsiasi direzione e punto senza flettersi più di 25mm.

1.6 Il Polimarche Racing Team

Il Polimarche Racing Team nasce nel 2013 come team di formula SAE all'università Politecnica delle Marche, conta ad oggi all'incirca 80 membri tutti studenti dell'UNIVPM, tra studenti di ingegneria meccanica, elettronica, informatica ed economia. Si struttura come una vera e propria azienda in cui i vari membri si suddividono in 5 cluster: Aerodinamica, Dinamica del veicolo, Strutture e compositi, Elettronica e controlli e Statici. Ogni cluster si occupa di un'area ben definita, nel caso particolare del reparto di aerodinamica è responsabile dello sviluppo del pacchetto aerodinamico e del sistema di raffreddamento, affrontando nello specifico la progettazione CAD e lo studio CFD. Il team sviluppa la sua prima vettura nella competizione a combustione termica e prosegue in questo sviluppo fino

al 2022 dove si decide di passare alla progettazione di un nuovo prototipo passando nella categoria dell'elettrico.

La prima vettura di formula SAE che fu presentata in Italia alla formula ATA a varano De Melegari sempre nel 2013 fu progettata e realizzata nell' arco di soli 6 mesi, il risultato sorprendente fu che portò a termine tutti gli eventi dinamici compreso l'Endurance Event. Questa vettura nota come Peacock 1 nasce con un telaio con una struttura reticolata di tubolari in acciaio 25CrMo4 e una carrozzeria in fibra di carbonio con un motore termico Smart 599cc, 3 cilindri in linea e un'aerodinamica inesistente.



Figura 6 - vettura Peacock 1

SCHEDE TECNICA

Caratteristiche	Descrizione
Nome	Peacock One
Numero di gara	110
Telaio	Struttura reticolata di tubolari in acciaio 25CrMo4
Carrozzeria	Fibra di carbonio
Dimensioni complessive LxWxH	2700 mm x 1365 mm x 1175 mm
Sospensioni	Doppio triangolo e sistema Pull-rod
Interasse	1572 mm
Carreggiata anteriore e posteriore	1165 mm anteriore, 1122 mm posteriore
Pneumatici	20.5 x 7.0-13 Hoosier R258 anteriormente, 20.5 x 7.5-13 Hoosier R258 posteriormente
Cerchi	7x13" OZ in alluminio
Motore	Smart 599cc, 3 cilindri in linea (98-2003), sovralimentato
Trasmissione	A catena, cambio Ducati 1098
Differenziale	Autobloccante a slittamento limitato Bacci
Freni	Brembo p4/30 a 4 pistoni anteriormente, Brembo p2/32 a 2 pistoni posteriormente
ECU	Motec M800
Telemetria	Datalogger sviluppato internamente su base SbrO9636

Figura 7 - scheda tecnica Peacock 1

Poi si passa a un primo sviluppo del pacchetto aerodinamico con la Peacock 2 in cui viene introdotta l'ala posteriore partecipando a 2 competizioni ottenendo un terzo posto al acceleration event nella gara in Formula Czech in repubblica ceca e un quarto posto nell'Engineering Design Event in Italia nella Formula Ata .



Figura 8 - Peacock 2

SCHEDA TECNICA

Caratteristiche	Descrizione
Nome	Peacock Two
Numero di gara	11
Telaio	Struttura reticolata di tubolari in acciaio 25CrMo4
Carrozzeria	Fibra di carbonio
Dimensioni complessive LxWxH	3086 mm x 1400 mm x 1330 mm
Sospensioni	Doppio triangolo e sistema Push-rod, U-lbar al posteriore e T-bar all'anterior
Interasse	1620 mm
Carreggiata anteriore e posteriore	1200 mm anteriore, 1160 mm posteriore
Pneumatici	20.5 x 7.0-13 Hoosier R258 anteriormente, 20.5 x 7.0-13 Hoosier R258 posteriormente
Cerchi	7x13" OZ in magnesio
Motore	Smart 599cc, 3 cilindri in linea (98-2003), sovralimentato
Trasmissione	A catena, cambio Ducati 1098
Differenziale	Autobloccante a slittamento limitato Bacci
Freni	Brembo m4 34 anteriormente, Brembo p32g posteriormente
ECU	Motec M800
Telemetria	Datalogger sviluppato internamente su base SRIOR636

Figura 9 - scheda tecnica Peacock 2

Anche nella Peacock 3 il principale incremento avviene in ambito aerodinamico con l'introduzione dell'ala anteriore. Nel 2016 questa vettura partecipa alla formula ATA e alla Formula Student EAST in Ungheria. Poi Nell'anno successivo si passa alla sua evoluzione sviluppando un pacchetto tecnico più avanzato con una modifica principale che è quella del motore che passa dal 600cc a un 700cc.



Figura 10 - Peacock 3

SCHEDA TECNICA

Caratteristiche	Descrizione
Nome	Peacock Three
Numero di gara	11
Telaio	Struttura reticolata di tubolari in acciaio 25CrMo4
Carrozzeria	Fibra di carbonio
Dimensioni complessive LxWxH	308 mm x 140 mm x 1222 mm
Sospensioni	Doppio triangolo a Pull-rod anteriore con U-bar, Push-rod posteriore con U-bar
Intersasse	1560 mm
Correggiata anteriore e posteriore	1200 mm anteriore, 1160 mm posteriore
Pneumatici	20.5 x 7.0-13 Hoosier R258 anterioremente, 20.5 x 7.0-13 Hoosier R258 posterioremente
Cerchi	7x13" OZ in magnesio
Motore	Smart 199cc, 3 cilindri in linea (18-2003), sovralimentato
Trasmissione	A catena, cambio Ducati 10/98
Differenziale	Autobloccante a slittamento limitato Drexler
Freni	Brembo m4 34 anterioremente, Brembo p32g posterioremente
ECU	Motec M800
Telemetria	Datalogger sviluppato internamente su base S6800C35

Figura 11- scheda tecnica Peacock 3

SCHEDA TECNICA

Caratteristiche	Descrizione
Nome	Peacock Three EVO
Numero di gara	110
Telaio	Struttura reticolata di tubolari in acciaio 25CrMo4
Carrozzeria	Fibra di carbonio
Dimensioni complessive LxWxH	308 mm x 140 mm x 1222 mm
Sospensioni	Doppio triangolo a Pull-rod anteriore con U-bar, Push-rod posteriore con U-bar
Intersasse	1560 mm
Correggiata anteriore e posteriore	1200 mm anteriore, 1160 mm posteriore
Pneumatici	20.5 x 7.0-13 Hoosier R258 anterioremente, 20.5 x 7.0-13 Hoosier R258 posterioremente
Cerchi	7x13" OZ in magnesio
Motore	Smart 700cc, 3 cilindri in linea (2003-06), sovralimentato
Trasmissione	A catena, cambio Ducati 10/98
Differenziale	Autobloccante a slittamento limitato Drexler
Freni	Brembo m4 34 anterioremente, Brembo p32g posterioremente
ECU	Motec M800
Telemetria	Datalogger sviluppato internamente su base RaspberryPi 3 e STM32 nucleo F746G29

Figura 12 - scheda tecnica Peacock 3 EVO

Nel 2018 entriamo nello sviluppo dell'ultimo modello a combustione la Peacock 4 che rivoluziona tutte le scelte tecniche adottate fino a quel momento, si passa da un telaglio a traliccio a un monoscocca in carbonio e Honeycomb, viene utilizzato un motore motociclistico monocilindrico e si introduce un sistema sospensivo misto al posteriore e con una barra di torsione sull'anteriore per migliorare la risposta a rollio e si introduce per la prima volta un sistema elettrico sviluppato. Nella sua evoluzione ,la Peacock 4 EVO, si mantiene gran parte delle scelte tecniche passando ad affinare dettagli importanti su una vettura sportiva e affacciandosi a problematiche sociali di notevole impatto, viene studiata e implementata l'ergonomia del veicolo e vengono introdotti materiali innovativi sostenibili a favore di un minor impatto ambientale. Con queste ultime vetture si mette un importante punto di partenza per il know how che farà da base per la progettazione del primo veicolo elettrico.



Figura 13 - Peacock 4

SCHEDA TECNICA

Caratteristiche	Descrizione
Nome	Peacock Four
Numero di gara	11 (ITA) - 324 (GBR)
Telaio	Monoscocca in fibra di carbonio ed honey-comb di alluminio (struttura sandwich)
Dimensioni complessive LxWxH	3033 mm x 1422 mm x 1100 mm
Sospensioni	Doppio triangolo e sistema Push-rod con U-bar e barre anti-pitch longitudinali anteriori, sistema Push-rod con U-bar posteriore
Interasse	1600 mm
Carreggiata anteriore e posteriore	1200 mm anteriore, 1200 mm posteriore
Pneumatici	18 x 6.0-10 Hoosier R258 anteriormente, 18 x 6.0-10 Hoosier R258 posteriormente
Cerchi	7x10" BRAD Sturace in alluminio
Motore	KTM 690 LC4 2013/14 monocilindrico, sovralimentato
Trasmissione	A catena, cambio KTM
Differenziale	Autobloccante a slittamento limitato Drexler
Freni	Brembo P4 24 a 4 pistoni anteriormente, AP Racing CP4226-250 posteriormente
ECU	Motac MB00
Telemetria	Datalogger sviluppato internamente su base RaspberryPi 3

Figura 14 - scheda tecnica Peacock 4

SCHEDA TECNICA

Caratteristiche	Descrizione
Nome	Peacock Four Evoluzione
Numero di gara	10 (EAST) - 14 (ITA)
Telaio	Monoscocca in fibra di carbonio ed honey-comb di alluminio (struttura sandwich)
Dimensioni complessive LxWxH	3033 mm x 1422 mm x 1100 mm
Sospensioni	Doppio triangolo e sistema Push-rod con U-bar e barre anti-pitch longitudinali anteriori, sistema Push-rod con U-bar posteriore
Interasse	1600 mm
Carreggiata anteriore e posteriore	1200 mm anteriore, 1200 mm posteriore
Pneumatici	18 x 6.0-10 Hoosier R258 anteriormente, 18 x 6.0-10 Hoosier R258 posteriormente
Cerchi	7x10" BRAD Sturace in alluminio
Motore	KTM 690 LC4 2013/14 monocilindrico, sovralimentato
Trasmissione	A catena, cambio KTM
Differenziale	Autobloccante a slittamento limitato Drexler
Freni	Brembo P4 24 a 4 pistoni anteriormente, AP Racing CP4226-250 posteriormente
ECU	Motac MB00
Telemetria	Non presente

Figura 15 - scheda tecnica Peacock 4 EVO

Peacock *Elettrica* è la prima vettura elettrica sviluppata dal team, il suo sviluppo inizia nel 2022 come P-X solo a livello progettuale partendo da 0 fino ad arrivare alla sua versione attuale presentata nel 2025.

1.7 Metodo di lavoro



Figura 16 - metodo di lavoro

Per comprendere più semplicemente il lavoro trattato in questo studio farò una breve parentesi per spiegare come è stato organizzato.

- ☛ **01** In una prima fase è stata svolta una ricerca bibliografica finalizzata all'acquisizione delle nozioni teoriche di aerodinamica e CFD. Successivamente sono stati individuati gli elementi da introdurre nello sviluppo del pacchetto aerodinamico anteriore e sono stati definiti i target minimi di prestazione per i singoli componenti e per l'insieme dell'ala anteriore. A tale scopo sono state redatte specifiche tecniche relative a ingombri, resistenza aerodinamica, deportanza, efficienza minima e vincoli regolamentari.
- ☛ **02** Una volta definite le basi di partenza per la progettazione sono stati sviluppati i layout delle componenti con la scelta delle possibili forme, profili e posizioni che si volevano provare. Così sono stati sviluppati i vari CAD da testare.
- ☛ **03** Una volta pronti i vari CAD si procede allo studio CFD su STAR CCM+ in cui si possono valutare le streamline, i valori di C_d e C_l , le distribuzioni di pressioni e velocità. Lo studio viene fatto simulando l'intera vettura.

☞ Per la parte di validazione è prevista una sessione di studio in galleria del vento, ma essendo questa fase ancora in itinere, non verrà trattata nello specifico in questa tesi.

Prima di partire con lo studio e le varie analisi al centro di questo lavoro di tesi, introduciamo alcuni elementi teorici fondamentali per la comprensione dell'elaborato e alla base delle simulazioni svolte per lo studio. Nei prossimi capitoli verrà trattata la teoria aerodinamica di base con un particolare sguardo rivolto all'aerodinamica nel settore dell'automotive, e i setup utilizzati per le simulazioni CFD.

CAPITOLO 2: ELEMENTI DI AERODINAMICA

2.1 Storia e cenni di aerodinamica

L'aerodinamica è la branca della fluidodinamica che studia l'aria e la sua interazione con un corpo, nasce in ambito aeronautico ma ben presto trova applicazioni anche in ambito terrestre, principalmente per la riduzione della resistenza all'avanzamento e alla deportanza in grado di assicurare una maggior distribuzione di carico. L'applicazione dell'aerodinamica sulle vetture vede le prime applicazioni attorno agli anni '20, molto dopo la creazione delle prime vetture per via del fatto che inizialmente ci si concentrò sull'aspetto motoristico, di affidabilità e di produzione, viste le basse velocità e di conseguenza un basso contributo di un possibile sviluppo aerodinamico. Fin che negli anni '20 vari esperimenti del settore aeronautico come Aurel Persu e Paul Jaray applicarono i primi concetti aerodinamici come il profilo a goccia o le ruote carenate. Poi negli anni '60 le applicazioni aerodinamiche divennero cruciali nel motorsport e così fecero la loro comparsa i primi spoiler e le prime ali posteriori. Poi negli '70 fece la sua comparsa la Chaparral 2J un'auto sperimentale che introduce per la prima volta, anche se in modo ancora acerbo, un rivoluzionario sistema che cambierà gli sviluppi dell'aerodinamica nel motorsport, l'effetto suolo. Introdotto nel campionato di formula 1 prima con la Lotus 78 poi la sua evoluzione la Lotus 79, l'effetto suolo dimostra le sue potenzialità e la crucialità di un'applicazione degli studi aerodinamici nel settore. Ad oggi l'aerodinamica riveste un ruolo fondamentale non solo per il motorsport ma per l'industria automotive in generale, perché diventata fondamentale per l'efficienza energetica, prestazioni e riduzione del rumore.

2.2 Aerodinamica delle vetture elettriche

L'aerodinamica applicata sulle vetture ad alte prestazioni ha come scopo la generazione di forze che tendono ad aumentare la reazione vincolare delle ruote sull'asfalto, aumentando l'attrito e permettendo l'aderenza degli pneumatici anche ad elevate accelerazioni laterali e permette anche di frenare con maggior efficienza. Dopo l'introduzione dell'aerodinamica nel mondo del motorsport, in particolare di quello automobilistico, le performance sono migliorate esponenzialmente ciò è dovuto a migliori prestazioni sotto diversi aspetti come ci si è potuti spingere a velocità maggiori sia sui rettilinei che in curva, grazie all'aumento della tenuta in curva e si è riscontrato un miglioramento dell'efficienza delle frenate, tutto ciò ha permesso di diminuire drasticamente i tempi sul giro. Dopo tale sviluppo molte competizioni implementarono nel regolamento delle limitazioni tecniche così da mantenere dei limiti di sicurezza a causa delle elevate velocità che si raggiungono. Di contro all'incremento della deportanza che ha portato grandi vantaggi, con l'ausilio dell'aerodinamica si viene a generare anche la resistenza aerodinamica, che è di particolare interesse per le vetture elettriche, dato che nelle competizioni che vedono come protagoniste le vetture elettriche l'efficienza diventa un parametro fondamentale durante la valutazione, visto che un'efficienza bassa si tradurrà in un fabbisogno maggiore di potenza erogata per contrastare la resistenza aerodinamica che si traduce in maggior peso o in consumo energetico maggiore per i motori, e il pacco batterie, ciò diviene più una barriera tecnico costruttiva che un vero

sviluppo perciò soprattutto nelle auto elettriche, dobbiamo prestare una particolare attenzione durante lo sviluppo del pacchetto aerodinamico, ricercando un buon compromesso tra implementazione degli elementi e la resistenza che essi generano.

2.3 Azioni aerodinamiche

Al fine di comprendere lo studio bisogna identificare quali sono le forze che si generano dall'interazione dell'aria sul corpo. Le forze che andiamo a valutare nel particolare sono:

- La Portanza (lift), è la componente della forza che agisce su un corpo immerso nel fluido ed è perpendicolare alla direzione del fluido stesso. Di solito viene definita portanza se la spinta generata sul profilo è direzionata verso l'alto invece viene definita deportanza se la spinta sul profilo è verso il basso.

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_l$$

○ Legenda:

- L =Portanza (Lift) [N]
- ρ =densità del fluido [kg/m^3]
- V = velocità [m/s]
- S =superficie alare interessata [m^2]
- C_l = coefficiente di portanza

- La resistenza (Drag), è la forza che si oppone all'avanzamento

$$D = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_d$$

○ Legenda:

- D =Resistenza aerodinamica (Drag) [N]
- ρ =densità del fluido [kg/m^3]
- V = velocità [m/s]
- S =superficie alare interessata [m^2]
- C_d = coefficiente di resistenza

Grazie a queste due forze che si generano possiamo determinare l'efficienza dell'aerodinamica, che sia di un singolo elemento o dell'intero pacchetto identificandola come

$$E = \frac{L}{D} = \frac{lift}{drag}$$

A causa delle basse velocità medie (circa 50-60 km/h) e dei picchi di velocità massima piuttosto limitati (circa 110-120 km/h) dei circuiti di formula SAE, un buon valore di efficienza si aggira solitamente tra 2.0 e 4.0, considerando un valore compreso tra 3.0 e 3.5 valori da Top Team prendendo in considerazione un pacchetto aerodinamico completo (ala anteriore, fondo o pance, ala posteriore e estrattore), mentre si considerano accettabili per un pacchetto completo nei primi stadi dello sviluppo dei valori compresi tra 1,5 e 2,5. Per ciò che concerne i profili alari presi singolarmente possono avere efficienza molto più elevate anche un $E > 10$, ma le interazioni tra le varie componenti riduce drasticamente l'efficienza totale della vettura.

2.4 Coefficienti adimensionali

Ai fini dello studio è necessario introdurre oltre alle forze globali di Lift e Drag sopra trattati alcuni coefficienti adimensionali, tali coefficienti saranno indispensabili per poter confrontare soluzioni provate nei diversi CFD e con le soluzioni che possiamo reperire in letteratura, questo perché usando i coefficienti andiamo a svincolare i risultati dalla velocità e dalla densità dell'aria. Per ricavare i coefficienti delle forze aerodinamiche procediamo adimensionalizzando queste forze rispetto alla pressione dinamica, ottenendo così i coefficienti di prestazione:

- Coefficiente di portanza/deportanza, indicato come C_l indica la capacità del profilo di generare spinta verticale in rapporto alla sua area e alla velocità del flusso

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho v^2 s}$$

Quindi il C_l rappresenta l'integrale netto del differenziale di pressione che si genera tra l'intradosso e l'estradosso del profilo lungo la corda. Il C_l è sensibile alle variazioni dell'angolo d'attacco del profilo α , e come viene influenzato lo si può osservare dal grafico $C_l - \alpha$ dove si possono notare all'interno del grafico due zone distinte

1. Tratto lineare: dove per determinati angoli di attacco, generalmente piccoli, si ha una crescita lineare del C_l all'incrementare dell'angolo d'attacco
2. Tratto curvo: alle estremità del grafico si possono notare delle curvature più o meno brusche e in questi punti avviene il fenomeno dello stallo, un fenomeno piuttosto pericoloso e difficile da controllare perché implica che il profilo smetta completamente di lavorare. Lo stallo può avvenire gradualmente o in maniera istantanea a seconda del profilo scelto.

- Coefficiente di resistenza, indicato come C_d , quantifica l'inefficienza aerodinamica data dalla resistenza generata dall'avanzamento del profilo, vengono considerati nel C_d vari fattori geometrici e dovuti al modo in cui si muove l'aria:
 1. troviamo il contributo della resistenza del profilo stessa data dall'attrito di superficie, che deriva dagli sforzi di taglio tangenziale all'interno dello strato limite, e dalla resistenza di forma, che deriva dalla mancata chiusura delle linee di pressione nel bordo d'uscita a causa dello spessore del profilo
 2. resistenza indotta: che diventa evidente solo nelle simulazioni 3D, perché a causa delle differenze di pressioni tra intradosso ed estradosso del profilo si vengono a generare dei vortici alle estremità che vanno ad influenzare l'aerodinamica.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho v^2 s}$$

- Coefficiente di momento, misura il momento torcente aerodinamico (beccheggio), che agisce sulle componenti aerodinamiche rispetto a un punto specifico come il centro aerodinamico della vettura o $\frac{1}{4}$ della corda nel caso di un singolo profilo. Esprime quindi la tendenza della vettura al beccheggio e si esprime come il rapporto del momento aerodinamico con il prodotto di densità, velocità del flusso, e superficie interessata.

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho v^2 S c}$$

Nei seguenti paragrafi verranno trattati anche i coefficienti di C_f e C_p anche essi molto importanti per la comprensione approfondita del comportamento dei risultati.

2.5 strato limite

L'efficacia aerodinamica di un profilo è limitata dai fenomeni viscosi che si manifestano all'interno dello strato limite. Che è la zona che si identifica, con uno spessore variabile, tra il profilo e la zona in cui non hanno più influenza le azioni viscosi che si generano dallo scorrimento delle particelle le une sulle altre, nelle vicinanze del profilo influenzandosi tramite attrito viscoso in maniera progressiva all'allontanarsi dal profilo fin quando si passa in una zona detta inviscida (dove l'attrito viscoso diventa trascurabile), quindi la viscosità del fluido crea una zona nella quale la velocità passa da zero al valore del flusso indisturbato.

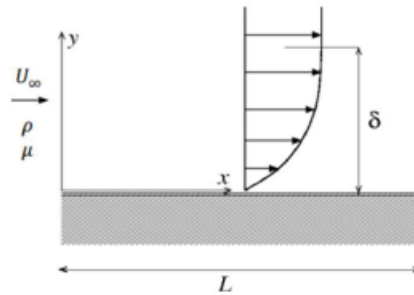


Figura 17 - gradiente di velocità e strato limite

Nella Formula SAE, la gestione dello strato limite è resa critica dai bassi numeri di Reynolds operativi, questo influenza profondamente lo strato limite visto che all'aumentare del valore di Re quest'ultimo diminuisce, ciò impone lo studio di profili capaci di mantenere il flusso attaccato anche in condizioni di elevati angoli d'attacco e alle variazioni date da rollio e beccheggio durante il movimento. Di fatto queste difficoltà infatti si registrano a Bassi Reynolds quindi nei flussi a regime laminare, ciò comporta un flusso "ordinato" e più semplice da prevedere e quindi da utilizzare ma avendo poca energia cinetica sono più inclini al distacco. Per poter comprendere numericamente come questo fenomeno influenza il comportamento del mio profilo introduciamo il coefficiente di Skin-friction C_f , un numero adimensionale che quantifica lo sforzo tangenziale esercitato dal fluido sulla superficie a contatto.

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

Valori positivi indicano generalmente un flusso aderente alla parete, mentre valori prossimi allo zero o un cambio di segno, possono evidenziare l'insorgenza di separazione dello strato limite o eventuali punti di ristagno. Tale coefficiente non consente, da solo, di distinguere in modo univoco un regime laminare da uno turbolento.

2.6 Streamline

Le Streamline (linee di flusso) sono uno degli strumenti che utilizzeremo durante il corso di questo studio per la visualizzazione degli andamenti di determinati parametri, visivamente. Tali curve, in ogni punto e per ogni istante, hanno come tangente il vettore velocità del fluido e forniscono una mappatura istantanea del campo di moto, permettendo di individuare visivamente i punti di ristagno (punto in cui la velocità del flusso è nulla), le regioni di accelerazione del flusso e l'insorgenza di bolle di separazione laminare o distacchi preventivi del flusso o i vortici che si vengono a generare al distacco del flusso d'aria dagli elementi della vettura. Tale strumento resta pur sempre una validazione qualitativa ma ci permette di visualizzare in maniera più rapida e mirata cosa effettivamente comportano le implementazioni apportate tra una simulazione e l'altra e quindi ci permette di dare una ragione pratica alla variazione delle forze e dei vari coefficienti aerodinamici, che in una

situazione come quella in esame di uno studio multi-elemento abbastanza complessa risulta uno strumento fondamentale.

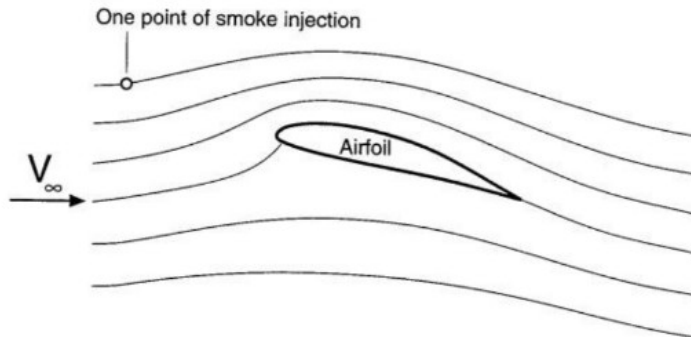


Figura 18 - Streamline su un profilo

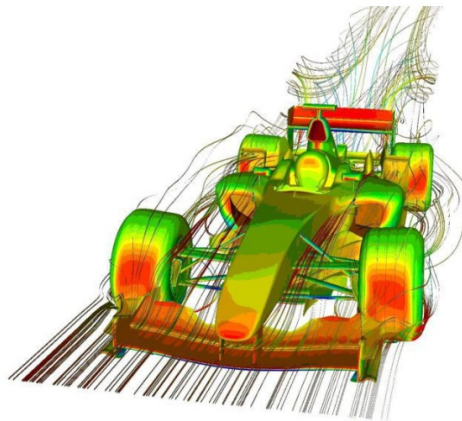


Figura 19 - Streamline su macchina completa

2.7 numero di Reynolds

Il numero di Reynolds è un parametro adimensionale che esprime il rapporto tra le forze d'inerzia e le forze viscosse agente in un fluido in movimento, nella progettazione è un parametro fondamentale perché ci definisce il regime di moto e la struttura dello strato limite. Si possono identificare 3 principali tipologie, in un ambiente aperto e considerando un profilo alare:

- Moto a Regime Laminare ($Re < 300.000$): è il classico caso delle basse velocità e dei profili con le corde piccole, in questo range il flusso tende a rimanere laminare per una buona porzione del profilo, questo permette a gran parte del profilo di funzionare costantemente

- Moto a Regime Transitorio ($300.000 < Re < 700.000$): in queste condizioni è costantemente variabile il flusso passando da un flusso laminare a uno turbolento oscillando costantemente da una condizione all'altra, senza la possibilità di prevedere le transizioni e rendendo la progettazione e la previsione dei componenti particolarmente complessi.
- Moto a Regime Turbolento ($Re > 700.000$): in queste condizioni i profili sono meno inclini allo stallo e il flusso tende a non distaccarsi dal profilo ma la problematica è che aumenta drasticamente l'attrito viscoso a parete richiedendo maggior energia per evincere la resistenza aerodinamica

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu}$$

Condizioni di gara	Velocità (v)	Corda di media (C)	Numero di Reynolds
Curva stretta (situazione simile allo Skid Pad)	≈11 m/s (40km/h)	0.25m	≈ $1,8 \times 10^5$
Rettilineo (come nell'Acceleration)	≈28 m/s (100km/h)	0.25m	≈ $4,8 \times 10^5$

Tabella 1 - valori numero di Reynolds in una gara di Formula SAE

2.8 Equazione Bernoulli

Per comprendere come si genera la distribuzione di pressione e come questa varia lungo il profilo, introduciamo l'equazione di Bernoulli, che stabilisce la conservazione dell'energia per un fluido in specifiche condizioni. La relazione data dalla formula implica che la somma della componente geodetica, quella di pressione e di velocità debbano sempre riportare a un valore costante:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z = \text{costante}$$

Tale equazione, nasce dalla conservazione dell'energia meccanica lungo una linea di corrente per un fluido in determinate condizioni, che poi viene applicata, con le dovute considerazioni, a tutto il campo di moto, assumendo tali ipotesi:

- **Flusso incomprimibile:** è una situazione di moto in cui la densità del fluido viene considerata costante nel tempo e nello spazio, indipendentemente dalle variazioni di pressione. Questa considerazione implica che presa una porzione di fluido, su questa la divergenza del campo di velocità deve essere nulla. Convenzionalmente in aerodinamica viene considerata trascurabile la variazione di densità (minore di un 5%) per numeri di Mach minori di 0.3 e viste le applicazioni di una vettura di Formula SAE stimando che a una temperatura ambiente di 20°C la velocità del suono $\alpha \approx 343$ m/s e che le velocità raggiunte in rettilineo dalla vettura saranno $v \approx 30.5$ m/s

$$M = \frac{v}{\alpha} \approx 0.089$$

Visto che tale valore risulta essere inferiore al valore di riferimento, possiamo affermare che tale ipotesi può essere inclusa nei nostri calcoli.

- **Flusso Stazionario:** è un flusso tale per cui le proprietà locali del fluido e del campo di moto in ogni punto non variano nel tempo, quindi quando le derivate parziali rispetto al tempo delle proprietà cinematiche e termodinamiche come velocità, pressione, densità e temperatura sono nulle in qualsiasi direzione. Sotto tale ipotesi le Streamlines coincidono con le Streakline (o linee di fumo, che sono l'insieme di particelle che nel tempo sono passate nello stesso punto) coincidono consentendo una mappatura completa del profilo. Tale assunzione può considerarsi applicabile su un'ipotesi di rettilineo in cui consideriamo una velocità costante, non rientrano in questa considerazione i fenomeni transitori come le situazioni di frenata o di inserimento in curva. Considerando il flusso incomprimibile permette di abbassare il costo computazionale dei CFD.
- **Flusso inviscido:** è un flusso in cui le forze d'attrito interne dovute alla viscosità del fluido sono considerate nulle o del tutto trascurabili rispetto alle forze d'inerzia. Tale assunzione implica di assumere una condizione di puro scivolamento lungo le superfici del profilo, ciò implica un modello cinematico incompleto rendendo impossibile prevedere la resistenza d'attrito e di forma, ma è di grande utilità per determinare in modo preliminare le distribuzioni di pressioni all'esterno dello strato limite.
- **Campo di moto irrotazionale:** ciò si verifica nel momento in cui nel flusso il vettore vorticità, definito come il rotore del campo di velocità, è nullo in ogni punto del dominio. In termini cinematici ciò si manifesta sulle particelle facendo sì che quest'ultime si muovano lungo delle traiettorie senza mai compiere rotazioni attorno al proprio baricentro. Il flusso irrotazionale si può imporre solamente se si considera l'ipotesi di flusso inviscido all'esterno dello strato limite e inizialmente irrotazionale macroscopicamente, sfruttando il Teorema di Kelvin per cui la derivata rispetto al tempo della circolazione è nulla, è possibile legittimare l'uso del campo di moto irrotazionale.

Tramite tale formula possiamo monitorare e mappare andamenti di pressione e velocità che si influenzano a vicenda per mantenere la costanza. In un contesto come quello dell'automotive spesso viene considerato trascurabile il contributo di variazione geodetica ρgz vista l'irrisoria variazione di altezze tra i vari punti aerodinamici della macchina, e perciò risultano strettamente correlate le componenti di pressione e velocità, conoscendo infatti le velocità possiamo mappare le pressioni e viceversa. Se consideriamo di avere le mappe di velocità, possiamo, sfruttando il C_p , descrivere la distribuzione di pressione, collegabile alla velocità locale nelle ipotesi di Bernoulli. Per passare dall'equazione di Bernoulli al coefficiente di pressione C_p , si considera un punto di riferimento nel flusso indisturbato, caratterizzato da pressione statica P_∞ e velocità V_∞ e un punto locale sul profilo, caratterizzato da pressione statica p e velocità locale V :

$$P_\infty + \frac{1}{2}\rho v_\infty^2 = P + \frac{1}{2}\rho v^2$$

$$P - P_\infty = \frac{1}{2}\rho v_\infty^2 \left[1 - \frac{v^2}{v_\infty^2} \right]$$

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho v_\infty^2}$$

$$C_p = 1 - \left(\frac{v}{v_\infty} \right)^2$$

Nei punti in cui il C_p ha valore 1 saranno i punti in cui si ha il valore massimo di pressione positiva e velocità nulla, detti punti di ristagno come quelli che possiamo trovare sul bordo d'attacco del profilo, poi si avranno zone di accelerazione e depressione in cui si ha un C_p negativo, e zone con $C_p=0$ in cui il flusso non viene più influenzato dal profilo, detto flusso indisturbato.

2.9 Equazioni di Navier-Stokes

Di consueto il principio di Bernoulli non è applicabile ai più complessi calcoli di CFD, ciò è dovuto al limite intrinseco delle equazioni usate che trascurano i termini dissipativi, a seguito di tali osservazioni si preferisce usare le equazioni di Navier-Stokes. Sono un insieme di equazioni che formalizzano matematicamente i tre principi fisici a cui i fluidi ottemperano:

- Principio di conservazione della massa (equazione di continuità)
- Secondo principio della dinamica (bilancio della quantità di moto)
- Primo principio della termodinamica (conservazione dell'energia)

Esse permettono di analizzare e descrivere il flusso, persino in regime turbolento, ma la loro complessità impedisce di risolverle in maniera analitica, infatti è possibile risolverle solo tramite software di calcolo e in maniera approssimata.

Coordinates: (x,y,z) Time: t Pressure: p Heat Flux: q
Density: ρ Stress: τ Reynolds Number: Re
Velocity Components: (u,v,w) Total Energy: Et Prandtl Number: Pr

Continuity: $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$

X – Momentum: $\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right]$

Y – Momentum: $\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right]$

Z – Momentum: $\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right]$

Energy: $\frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} = -\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} - \frac{1}{Re_r Pr_r} \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial}{\partial x} (u \tau_{xx} + v \tau_{xy} + w \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u \tau_{xy} + v \tau_{yy} + w \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u \tau_{xz} + v \tau_{yz} + w \tau_{zz}) \right]$

Figura 20 - Equazioni di Navier-Stokes

2.10 Profili alari

L'aerodinamica in Formula SAE non è finalizzata alla riduzione della resistenza all'avanzamento (drag), bensì alla massimizzazione della deportanza (Downforce) per migliorare le prestazioni dinamiche in curva e in frenata. Il componente fondamentale di tale studio è il profilo alare. Storicamente, lo studio dei profili alari ha trovato una prima standardizzazione attraverso le serie “NACA” sviluppate dal National Advisory Committee for Aeronautics.

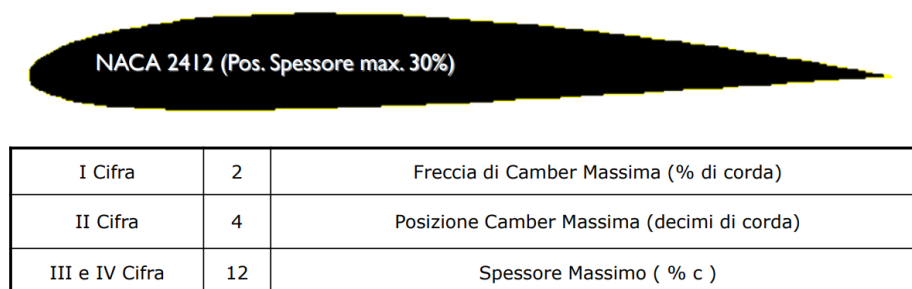


Figura 21 - Profilo NACA 4 cifre



I Cifra	2	moltiplicata x 3/2 indica il C_l teorico(*) in decimi.
II e III Cifra	30	divisa x 2 indica la Posizione di Camber Massima (% c)
IV e V Cifra	12	Spessore Massimo (% c)

Figura 22 - Profilo NACA 5 cifre



I Cifra	6	Identificativo della serie
II Cifra	5	Posizione del punto di minima pressione (decimi di c)
III Cifra	x	Semi-estensione del pozzetto laminare(in decimi del Cl)
IV Cifra	2	Coefficiente di portanza di progetto in decimi
V e VI Cifra	12	Spessore massimo (% c)

Figura 23 - Profilo NACA 6 cifre

Sebbene i profili a quattro cifre (es. NACA 4412) siano nati per scopi aeronautici, essi rappresentano tuttora una solida base per comprendere quale sia l'influenza della curvatura (*camber*) e dello spessore sulla generazione di portanza. In Formula SAE la necessità di operare a regimi di alta portanza e bassi numeri di Reynolds ha portato anche all' utilizzo di profili meno convenzionali, pur mantenendo la nomenclatura e i parametri geometrici derivati dagli studi NACA come base per l'ottimizzazione dei profili multi-elemento. L'obiettivo primario è ritardare il distacco dello strato limite (boundary layer) nonostante gli elevati gradienti di pressione avversi. L'integrazione di flap e l'interazione con il suolo (effetto suolo) rendono la scelta del profilo un compromesso critico tra efficienza aerodinamica e stabilità del flusso. Per poter selezionare il profilo adatto dobbiamo prima definirne i parametri che influenzano il campo di moto attorno al profilo, infatti la geometria di un profilo alare è caratterizzata da una serie di punti e linee caratteristiche che ne determinano un preciso comportamento fluidodinamico:

- **Bordo d'attacco (Leading Edge):** è il primo punto in cui il flusso d'aria incontra la superficie del profilo.

- **Bordo d'uscita (Trailing Edge):** è il punto del profilo in cui i flussi provenienti dall'intradosso e dall'estradosso si ricongiungono.
- **Raggio del bordo d'entrata:** definisce la curvatura della geometria del profilo nella sua parte anteriore. Esso è il raggio della circonferenza osculatrice tangente al profilo nel punto del bordo d'entrata, questo parametro influenza profondamente la risposta del profilo alla variazione dell'angolo d'attacco e la risposta che si genera durante lo stallo. Infatti un basso valore di r rende il profilo molto efficiente ma causerà uno stallo improvviso a seguito di una variazione dell'angolo d'attacco, invece un elevato r permetterà di gestire meglio lo stallo anche a grandi angoli d'attacco riducendone però l'efficienza.
- **Corda:** linea retta che unisce il bordo d'attacco al bordo d'uscita
- **Linea media (linea di Camber):** luogo dei punti medi tra intradosso ed estradosso, se coincide con la corda il profilo sarà simmetrico.
- **Freccia(camber):** rappresenta la distanza massima tra la linea di Camber e la corda. Un profilo con una freccia elevata genera solitamente più portanza a parità dell'angolo d'attacco, ma genera un momento aerodinamico con effetti molto più incisivi. La posizione longitudinale del massimo inarcamento agisce come modulatore del gradiente di pressione. Uno spostamento verso il bordo d'attacco enfatizza il picco di portanza locale ma rende il profilo più sensibile ai fenomeni di separazione anticipata dello strato limite. Al contrario, il posizionamento arretrato della freccia permette una distribuzione del carico più uniforme, favorendo la stabilità del flusso a bassi numeri di Reynolds.
- **Spessore massimo(t) e la sua posizione (pos. t_{max}):** lo spessore influenza la velocità locale del flusso e, conseguentemente il punto di transizione da strato limite laminare a turbolento.

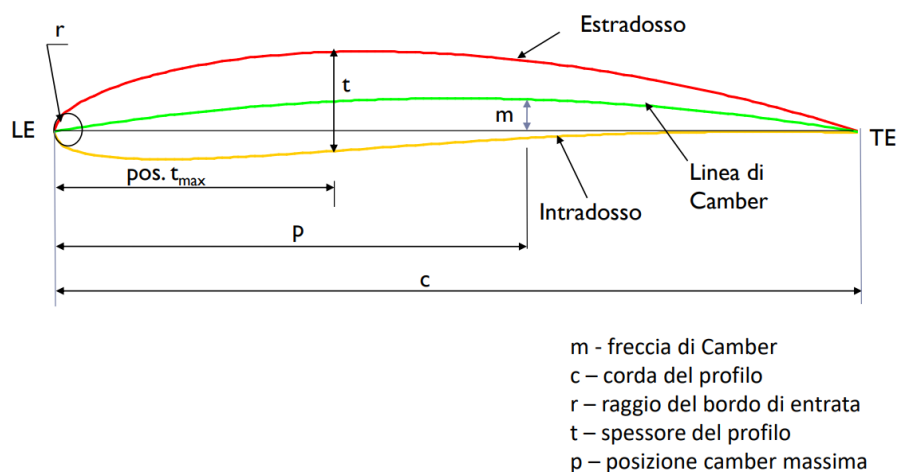


Figura 24 - Parti di un profilo

Tutte le caratteristiche geometriche sopra citate definiscono un profilo la sua efficienza e il suo comportamento, ma un aspetto da considerare oltre ciò fondamentale è l'angolo d'attacco del profilo. Tale angolo è si genera tra la corda del profilo e la direzione del vettore

velocità del flusso indisturbato, in un ambito automobilistico come quello di Formula SAE l'angolo d'attacco α è variabile all'interno di determinati range dovuti al moto della vettura e quindi al conseguente beccheggio, imbardata e rollio. In conseguenza a ciò si studia un setup ben preciso studiato tenendo ben in considerazione come varia la risposta del profilo al variare di α ,

2.11 elementi di per migliorare le prestazioni dell'ala anteriore

Per implementare le prestazioni dell'ala anteriore oltre ai singoli profili si utilizzano altri elementi, che potrebbero produrre non solo deportanza, ma generando anche vortici controllati. Infatti generando dei vortici direzionati e controllati è possibile isolare il fondo ad esempio o schermare la ruota. In una competizione come la Formula SAE che è una gara in cui le vetture sono progettate a ruote scoperte perciò l'impiego dell'ala anteriore è progettato sì per produrre deportanza ma principalmente per schermare le ruote anteriori della vettura e pulire il flusso per gli elementi aerodinamici successivi, ciò è fondamentale per elevate prestazioni visto che la ruota in sé è un elemento portante. Questa sua caratteristica deriva dal fatto che sia un corpo tozzo in rotolamento, è un effetto particolarmente dannoso perché influenza la trasmissione della coppia a terra e in casi estremi potrebbe influenzare negativamente la capacità di sterzata della vettura. Alcuni degli elementi che si possono aggiungere sull'ala anteriore per aumentarne la deportanza o per generare dei vortici attui alla schermatura di altri elementi risultano essere:

1. Endplates: sono delle paratie posizionate alle estremità dei profili, la loro principale funzione è quella di annullare o traslare i vortici di estremità, vortici che si creano dall'interazione tra la zona di sovrappressione e quella di depressione, in cui i flussi in sovrappressione hanno la tendenza di andare nella zona di sottopressione e viceversa, al fine di riportare la pressione in equilibrio su entrambe le zone del profilo. Gli endplates impongono un blocco fisico a questi vortici così da isolare le zone dei profili alari con una differenza di pressione, questo permette al profilo di generare deportanza per tutta la sua lunghezza.
2. Dive Planes: sono piccoli elementi curvilinei posizionati sulla superficie esterna delle paratie laterali. Il loro principale scopo è quello di generare una modesta deportanza diretta, e soprattutto la generazione di vortici controllati ad elevata energia. In Formula SAE viene utilizzato per schermare la ruota generando un vortice in grado di trascinare via e pulire i flussi caotici generati dal rotolamento dello pneumatico anteriore, impedendo a tali flussi di disturbare il flusso diretto al fondo al resto dell'aerodinamica applicata lateralmente al veicolo.
3. Turning vanes: sono dei deflettori verticali posizionati sul profilo principale dell'ala, con l'obiettivo di forzare il flusso a seguire una traiettoria ben precisa, in FSAE vengono utilizzati principalmente con lo scopo di eseguire Outwash, cioè indirizzare il flusso d'aria turbolento verso l'esterno dei pneumatici così da ridurre la resistenza

aerodinamica degli elementi seguenti, oppure vengono usati per generare Inwash, la tendenza ad incanalare i flussi d'aria verso l'interno per sfruttare un flusso d'aria più abbondante per raffreddare i motori rendendo però più difficoltoso lo studio dell'aerodinamica.

CAPITOLO 3: Computational Fluid Dynamics (CFD)

Il CFD è una branca ingegneristica che utilizza metodi numerici computazionale per risolvere e analizzare problemi legati ai liquidi o ai gas. Le simulazioni CFD sono un ottimo strumento per poter valutare una problematica come quella dell'aerodinamica di una vettura, ma la principale problematica è impostare un modello per la simulazione valido, sennò non sono considerabili attendibili i risultati. Esistono molti modelli che sono stati elaborati negli anni visto che i calcoli CFD si basano come logica con si basa sulla risoluzione delle equazioni di Navier-Stokes applicate in un dominio (volume attorno all'oggetto in analisi) su cui viene eseguita la mesh, e su ogni singola cella vengono risolte tali equazioni per calcolarsi grandezze fisiche come velocità, pressione e temperatura.

Dal punto di vista fisico le equazioni saranno usate e riguarderanno principalmente le seguenti leggi, basandosi per l'appunto sulle equazioni di Navier-Stokes:

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

Approfondiremo nei prossimi paragrafi i setup utilizzati per la costruzione del dominio, mesh, le condizioni al contorno e teorie applicate nello sviluppo dei CFD per questo studio.

La principale problematica è che la risoluzione dell'equazione di Navier-Stokes avviene unicamente per problemi semplici quindi per questa motivazione si sono sviluppati molti metodi di calcolo per ridurre i costi computazionali dei problemi più complessi mantenendo la coerenza dei risultati:

- **Simulazione numerica diretta (DNS):** viene discretizzato il dominio sul quale viene direttamente calcolate le equazioni che modellano il problema che si vuole analizzare. Vengono generati risultati precisi ma con un elevato costo di calcolo computazionale dato che non permette nessuna modellazione approssimativa per le turbolenze, perciò viene applicato il DNS a problemi semplici ma rimane fondamentale per ricavare le eventuali correzioni usate in simulazioni che sfruttano altri metodi in cui i modelli di turbolenza sono impostati manualmente.
- **Equazioni di Navier-Stokes mediate (RANS):** al fine di ridurre il costo computazionale si considera una scomposizione delle grandezze fisiche basandosi sulla decomposizione di Reynolds in cui per ogni grandezza “s” considereremo di suddividerla in due componenti, un contributo medio temporale ($\bar{s}$) e uno fluttuante (s')

$$s(\vec{x}, t) = \bar{s}(\vec{x}, t) + s'(\vec{x}, t)$$

Questa scomposizione considera che il valore medio delle fluttuazioni è nullo ma non il valor del prodotto di due fluttuazioni diverse, venendo così considerata

l'energia legata alla turbolenza. Questa suddivisione fa sì che nelle equazioni di Navier-Stokes vengano semplificate le equazioni ma si introduce così il tensore degli sforzi di Reynolds che implica l'introduzione di specifici modelli di turbolenza per poter completare il calcolo

Partendo dall'equazione di continuità $\nabla \cdot \vec{v} = 0$

Le equazioni del moto preso come esempio lungo la sola componente x

$$\frac{\partial(\rho \bar{v}_j)}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{U}_i \bar{U}_j + \rho \bar{U}_i \bar{U}_j) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{jj}}{\partial x_j}$$

In cui il termine $\frac{\partial \bar{\tau}_{jj}}{\partial x_j}$ rappresenta uno degli elementi del tensore degli sforzi di Reynolds.

- **Large Eddy Simulation (LES):** Questo metodo è un compromesso tra le RANS e le DNS, risolve i vortici macroscopici in primo luogo che sono quelli fortemente dipendenti dalla geometria, mentre i vortici di scala minore vengono considerati con un comportamento prevalentemente isotropo.

In questo studio le simulazioni prevedono l'utilizzo delle RANS perciò verranno trattati in seguito i modelli di turbolenza da abbinare indispensabilmente per la corretta esecuzione della simulazione.

3.1 Fondamenti di CFD

L'analisi teorica e computazionale del comportamento dell'aria attorno al veicolo richiede una definizione matematica preliminare rigorosa. In primo luogo è fondamentale adottare l'ipotesi del continuo, si considera così il fluido come una materia continua per tutto lo spazio in cui è distribuito, non considerando la sua natura molecolare. Tale assunzione possiamo considerarla valida poiché il volume di controllo che andremo a considerare è infinitesimale rispetto alle geometrie della vettura, ma molto maggiore rispetto al cammino libero medio e della distanza tra le molecole del flusso. In tal modo possiamo definire le proprietà macroscopiche per ogni punto dello spazio, come la pressione e la velocità. Si viene a definire un campo di moto in cui valgono le leggi di conservazione, come trattato nel capitolo precedente, per ricavare i dati di un sistema così definito ci si può avvalere di uno dei seguenti approcci cinematici:

- **Descrizione Lagrangiana:** viene seguita l'evoluzione nel tempo di una singola particella o di una porzione di fluido lungo la sua traiettoria, in cui vengono valutate

le proprietà fisiche espresse in funzione del tempo e rispetto la posizione iniziale della particella stessa.

- Descrizione Euleriana: prende dei punti fissi nello spazio e analizza il flusso in transito attraverso un volume di controllo fissato, in questo modo le proprietà dei fluidi si esprimono come campi distribuiti nello spazio e nel tempo.

Nell'ambito aerodinamico applicato all'automobilismo in uno spazio esterno o nel CFD, il secondo approccio descrittivo, quello Euleriano, rappresenta la scelta standard e maggiormente diffuso, perché permette la mappatura stazionaria o transitoria attorno ai singoli componenti.

3.1.1 modelli di turbolenza

Tratteremo ora i modelli di turbolenza, introdotta la loro funzione nei paragrafi precedenti, approfondiremo quali sono i modelli utilizzabili. In questo studio ci si focalizzerà unicamente sui modelli della famiglia a due equazioni, sono modelli che risolvono due equazioni, una per l'Energia Cinematica Turbolenta (k) e una per la componente dissipativa che varia a seconda del modello scelto. Le simulazioni di questo studio si basano sull'utilizzo delle RANS e dei modelli di turbolenza:

- Modello k-epsilon: è il modello più comune, composto da due equazioni come accennato la prima è quella dell'energia cinematica turbolenta (k) e la seconda è il tasso di dissipazione turbolenta (ϵ). Il modello in questione ha un ottima risposta per flussi liberi con piccoli gradienti di pressione, utilizza l'ipotesi di Boussinesq per correlare gli sforzi del tensore di Reynolds al gradiente della velocità medi, introducendo la viscosità media espressa:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

Le due principali equazioni del modello verranno invece espresse come di seguito:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(u + \mu \frac{u_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b + \rho \epsilon - YM + S_k \\ \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \epsilon)}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \mu \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + c_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (p_k + c_{3\epsilon} P_b) - c_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \end{aligned}$$

- Modello k-omega: come per il modello precedente la prima equazione che viene definita è l'energia cinetica (k), varia invece la seconda equazione è in funzione della frequenza specifica di dissipazione ($\omega = \frac{\epsilon}{k}$). Tale modello permette il calcolo della turbolenza e della risoluzione dei campi di moto direttamente in prossimità alle superfici o parti solide con grande accuratezza nella predizione dei gradienti di pressione avversi e nella corretta localizzazione dei punti di distacco dello strato limite sulle superfici. L'espressione standard del modello utilizza la viscosità turbolenta dinamica espressa nei seguenti termini:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega}$$

Le equazioni del modello k-omega vengo espresse nella forma standardizzata:

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

- Modello SST k-omega: (modello Shear Stress Transport) tale modello viene sviluppato da Florian Menter nel 1994 dall'esigenza di un connubio dei vantaggi dei due modelli sopra trattati. D'altronde il modello k-omega è estremamente accurato vicino alle superfici ma risulta instabile nel flusso libero, viceversa il modello k-epsilon è notevolmente stabile in flusso libero ma perde di accuratezza in prossimità delle pareti. Il modello SST k-omega genera risultati notevolmente accurati rispetto agli altri due modelli presi singolarmente, ma in particolari zone, come quelle di ristagno ad esempio, genera delle turbolenze notevolmente più elevate. Si utilizza una definizione di viscosità dinamica turbolenta diversa rispetto al k-omega e al k-epsilon, in cui viene introdotta una limitazione basata sulla deformazione del flusso (S, l'invariante del tensore dei tassi di deformazione) e su una seconda funzione di blending (F2)

$$\mu_t = \frac{a_1 \rho k}{\max(a_1 \omega, S F_2)}$$

Di seguito vengono riportate le equazioni utilizzate dal modello:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(Pk)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} &= \rho P - \beta^* P \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \left[\left(\mu + \sigma_k \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} &= \frac{\gamma}{v_t} P - \beta \rho \omega_+^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_\omega \mu_t \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega_2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned}$$

3.2 programmi utilizzati

Lo sviluppo del pacchetto aerodinamico della vettura ha richiesto l'utilizzo di specifici software per lo sviluppo geometrico delle componenti e in seguito per la simulazione CFD. La scelta è stata indetta dai bisogni del team di uniformarsi a un minor numero possibile di applicativi utilizzati per facilitare lo scambio di file, nello specifico sono state selezionati:

- Siemens NX per la modellazione CAD ed alcune validazioni FEM, perciò è stato utilizzato per la definizione delle appendici dell'ala anteriore e anche per tutte le altre componenti della vettura che sono state sviluppate all'interno dell'ambiente di disegno CAD per poi alcuni componenti subire un'analisi strutturale per verificare la fattibilità dello studio non unicamente in ambito aerodinamico ma considerando anche la fattibilità costruttiva. L'utilizzo di Simens NX ci ha permesso la modellazione di solidi e superfici complesse con un elevata precisione.

- Siemens STAR-CCM+ è lo strumento indispensabile per il CFD sul quale sono state svolte le fasi di pre-processing, con la generazione della mesh, il calcolo numerico e tutta la fase di post-processing in cui vengono analizzati e prelevati i dati per la stesura di questo studio.

3.3 Impostazione simulazione

Una simulazione CFD applicata nel caso di una vettura, generalmente, necessita di specifici passaggi per poter essere impostata.

Importazione della geometria: è possibile importare il modello precedentemente creato in ambiente CAD all'interno di Siemens NX, il modello importato comprenderà il modello del veicolo considerato a metà, essendo simmetrico, in modo tale da risparmiare celle per la mesh e tempo per il calcolo, il dominio e i singoli volumi di controllo.

Realizzazione della Mesh: Tale passaggio è fondamentale, il CFD richiede infatti la discretizzazione del volume di controllo in volumi di controllo più piccoli, a tal fine viene eseguita la mesh all'interno del dominio, impostandone grandezza, forma, e parametri delle singole celle. Per facilitare il processo di discretizzazione si procede a una discretizzazione preliminare delle singole geometrie tramite il Surface Wrapper.

Impostazione della fisica e delle condizioni al contorno: Si definiscono ora le condizioni fisiche che agiscono all'interno del nostro dominio che sono fondamentali per attuare il calcolo, si impostano numerose condizioni come quelle riguardanti la fisica del fluido internamente al dominio, o le condizioni di operazione, come temperature ed umidità. In seguito verranno impostate le condizioni al contorno, che sono tutte quelle condizioni di moto o di stazionarietà delle singole componenti.

Post processing: è il passaggio che richiede più consapevolezza e capacità di analisi dei risultati per valutare qualitativamente i risultati della simulazione e se le modifiche apportate o gli elementi introdotti siano così migliorativi o peggiorativi e dedurre la motivazione così da apporre le corrette modifiche.

3.3.1 Modello e dominio

Il modello CAD per la simulazione nasce dalla semplificazione del modello completo della vettura, questa necessità deriva dal limite di calcolo della strumentazione ma anche dalla sola necessità di valutare le sole superfici aerodinamiche nella parte esterna della vettura, e a tal proposito sono state chiuse le cavità trascurabili (come ad esempio i fori della viteria), le componenti della dinamica sono state semplificate mantenendone gli ingombri esterni ma semplificandone le forme. Viene introdotto il pilota, Percy, sottoforma di manichino che ne riproduce gli ingombri a causa del suo contributo aerodinamico non trascurabile.

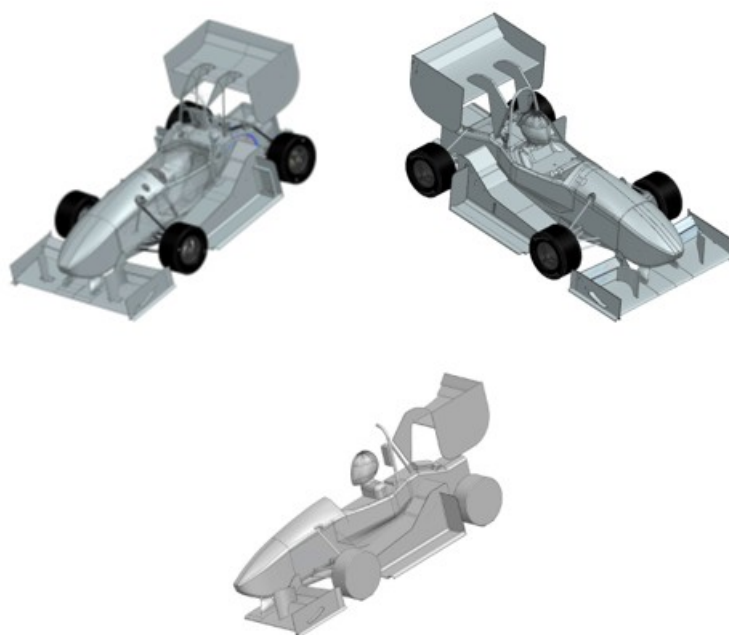


Figura 25 - semplificazione CAD per CFD

Il CAD comprende oltre alla vettura stessa anche il dominio che la contiene costruito con specifiche dimensioni, per impedire le interferenze delle pareti stesse del dominio sulla vettura, al fine di isolare il comportamento aerodinamico del solo elemento di studio. Un errato dimensionamento del dominio genererà delle forze aerodinamiche indesiderate che faranno sì che i risultati generati non siano corretti e quindi renderebbero l'intera simulazione non attendibile. Per evitare questa eventualità, sono state seguite le indicazioni della guida di Siemens, propria di questo programma.

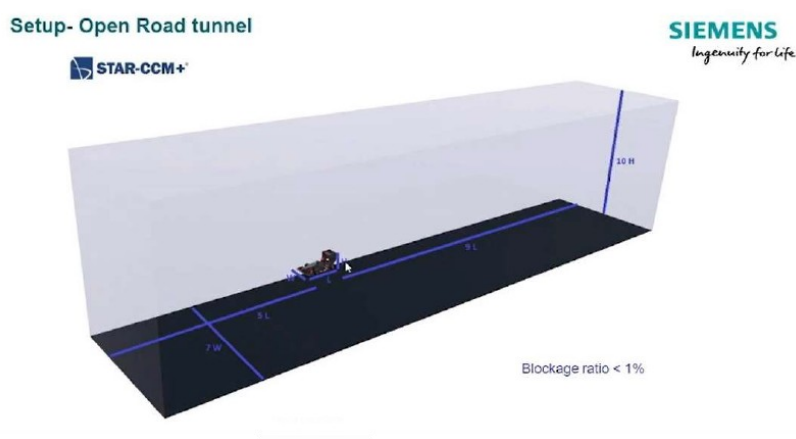


Figura 26 - Indicazioni per la creazione del dominio

Oltre al dominio e al CAD della vettura si aggiungono anche i volumi di controllo uno per la ruota anteriore uno sulla ruota posteriore, l'offset della vettura e un volume di controllo attorno alla vettura di dimensioni minori al dominio stesso.

3.3.2 Surface Wrapper

Dopo aver importato il modello CAD in Star CCM+ ed aver eseguito le operazioni booleane di sottrazione per unificare il dominio con il modello della vettura si esegue l'operazione di Surface Wrapper, al fine di ottenere, come già citato in precedenza, una prima discretizzazione delle sole superfici del dominio. Durante questa operazione vengono definite le grandezze e la densità degli elementi triangolari con cui si approssima ogni superficie. Questa definizione geometrica delle superfici è soggetta a numerose parametrizzazioni che vengono espresse principalmente in due modi

- Relative to base: si introduce un valore percentuale per definire proporzionalmente l'interesse del parametro in relazione a quello che verrà definito come "Base Size"
- Absolute: implica che venga inserito un valore dimensionale direttamente sul parametro stesso, senza che sia correlato ad alcun'altro parametro.

Di seguito vengono riportate le parametrizzazioni applicate durante il Surface Wrapper.

Default Values:

- Base size: 12, 0mm
- Target surface size: 400,0% (relative to base)
- Minimum surface size: 10, 0% (relative to base)
- Surface curvature: 36, 0 Pts/circle

Custom Controls:

- Aero (comprende le varie superfici aerodinamiche)
 - Target surface size: 16,0% (relative to base)
 - Minimum surface size: 8, 0% (relative to base)
 - Surface curvature: 120, 0 Pts/circle
- Ground (che rappresenta la superficie del dominio che simula il comportamento del suolo)
 - Target surface size: 100,0% (relative to base)
 - Minimum surface size: 3, 0% (relative to base)
- Ruote
 - Target surface size: 16,0% (relative to base)
 - Minimum surface size: 8, 0% (relative to base)
 - Surface curvature: 120, 0 Pts/circle
- Scocca (comprendente tutta la monoscocca in carbonio)
 - Target surface size: 6,0% (relative to base)
 - Minimum surface size: 1, 0% (relative to base)
 - Surface curvature: 120, 0 Pts/circle

- Tubes (applicata agli elementi tubolari, quali braccetti delle sospensioni e rool-hoop)
 - Target surface size: 6,0% (relative to base)
 - Minimum surface size: 1, 0% (relative to base)
 - Surface curvature: 60, 0 Pts/circle

Al termine dell'operazione sarà necessario attuare una verifica per assicurarsi che il risultato sia privo di errori o eventualmente correggerli con le apposite funzioni del programma in caso di piccoli errori. Nell' eventualità che non si risolvano gli errori sarà necessaria una verifica e correzione del CAD stesso.

3.3.3 Mesh

La creazione della mesh è un'operazione fondamentale per la simulazione CFD in cui il dominio precedentemente approssimato nel Surface Wrapper, ora viene suddiviso in piccoli elementi unitari chiamate celle, sulle quali vengono calcolate in successione nelle singole celle le equazioni che sono state impostate. Per una corretta costruzione delle celle della mesh vengono applicati al dominio dei valori di default:

- Base size: 0, 6m
- Target surface size: 40,0% (relative to base)
- Minimum surface size: 10, 0% (relative to base)
- Surface curvature: 36, 0 Pts/circle
- Prism layer:
 - Number of Prism Layers: 12
 - Prism Layer Stretching: 1,5
 - Prism Layer Reduction Percentage: 50,0%
 - Prism Layer Total Thickness: 0,8% (relative to base)

Poi per ottimizzare al meglio la mesh nelle varie zone del dominio e su elementi particolarmente ostici da discretizzare, si vanno ad applicare dei controlli supplementari specifici per ogni singola parte su cui si vuole intervenire:

- grande
 - Custom size: 28,0% (relative to base)
 - Number of Prism Layers: 2
 - Prism Layer Total Thickness: 33, 33% (relative to base)
- offset
 - Custom size: 3,0% (relative to base)
 - Prism Layer Total Thickness: 33, 33% (relative to base)
- ruota anteriore
 - Custom size: 1,6% (relative to base)

- ruota posteriore
 - Custom size: 1,6% (relative to base)

Per le parti attorno alla vettura viene richiesta una mesh particolarmente precisa per poter studiare al meglio le distribuzioni delle grandezze attorno e sulle superfici della vettura, e a tal proposito si introducono dei parametri per controllare il numero di celle e le loro dimensioni:

- Aero (in cui si vanno ad inserire tutti i componenti facenti parte dell'aerodinamica)
 - Target surface size: 0,25% (relative to base)
 - Number of Prism Layers: 10
 - Prism Layer Total Thickness: 8, 0mm (absolute)
 - Minimum surface size: 0.048% (relative to base)
 - Surface curvature: 60.0 Pts/circle
- Dominio senza ground (nel quale vengono inserite le pareti del dominio: Wall, symmetry plane, inlet ed outlet)
 - Target surface size: 40,0% (relative to base)
 - Minimum surface size: 40,0% (relative to base)
- Fondo (in cui vengono inseriti undertray e diffusore)
 - Target surface size: 0,14% (relative to base)
 - Number of Prism Layers: 3
 - Prism Layer Total Thickness: 8,0mm (absolute)
 - Minimum surface size: 0,024% (relative to base)
- Ground (in cui viene inserita la superficie del dominio adibita a simulare il suolo)
 - Target surface size: 100% (relative to base)
 - Number of Prism Layers: 3
 - Prism Layer Total Thickness: 18,0mm (absolute)
 - Minimum surface size: 6,0mm (absolute)
- Ruote (in cui vengono inserite le ruote)
 - Target surface size: 0,24% (relative to base)
 - Number of Prism Layers: 3
 - Prism Layer Total Thickness: 8, 0mm (absolute)
 - Minimum surface size: 0, 48 (relative to base)
 - Surface curvature: 36, 0 Pts/circle
- Scocca (in cui viene inserito lo chassis)
 - Target surface size: 0,7% (relative to base)
 - Number of Prism Layers: 3
 - Prism Layer Total Thickness: 1, 0mm (absolute)

- Minimum surface size: 0, 4% (relative to base)
- Surface curvature: 40, 0 Pts/circle
- Tubes (in cui vengono inseriti i braccetti delle sospensioni e il roll-hoop)
 - Target surface size: 0, 25% (relative to base)
 - Number of Prism Layers: 10
 - Prism Layer Total Thickness: 8, 0mm (absolute)
 - Minimum surface size: 0, 048% (relative to base)
 - Surface curvature: 60, 0 Pts/circle

3.3.4 Fisica del problema

Al fine di configurare le fisiche su un modello coerente nelle condizioni di utilizzo, si è mantenuti i valori suggeriti dal programma, che risultavano particolarmente fedeli per il caso in esame, in cui sono state formulate le ipotesi di flusso stazionario e incomprimibile, il cui moto turbolento viene descritto tramite il “Modello k-omega” considerando “All’y+ Wall” e le grandezze fisiche vengono considerate costanti, così da poter applicare le equazioni di Navier-Stokes mediate.

In Star-CCM+ si utilizzano modelli che puntano a definire i metodi di interpolazioni dei risultati, il tipo di fluido o gas utilizzato e modelli per il miglioramento della stabilità e affidabilità della simulazione, seguono in figura quelli usati nelle simulazioni CFD dello studio.

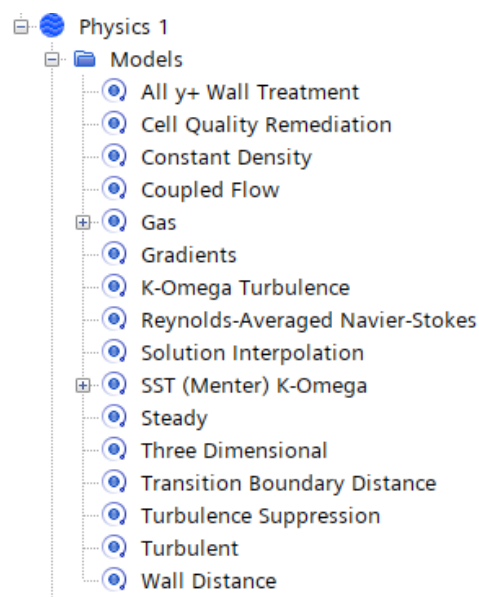


Figura 27 - fisiche usate nel CFD

3.3.5 Condizioni al contorno

Per finire si impongono le cosiddette condizioni al contorno, che servono a definire le forze in gioco e a determinare quali siano gli elementi in moto e quali no:

- INLET: all’ingresso del dominio viene imposta una velocità di ingresso pari a 16 m/s

- GROUND: viene assegnata una velocità tangenziale applicata parallelamente alla direzione del flusso di 16 m/s per poter simulare lo spostamento del suolo.
- OUTLET: viene imposto che la pressione in uscita dal dominio sia pari alla pressione atmosferica

Infine, viene imposta una rotazione agli pneumatici di 670 rpm al fine di considerare il contributo delle ruote, rendendo più coerente il modello della simulazione rispetto alla situazione reale.

CAPITOLO 4: Ottimizzazione e analisi

L'obiettivo centrale dello studio svolto risiede nell'ottimizzazione geometrica dell'insieme degli elementi aerodinamici sulla parte anteriore della vettura, finalizzata a massimizzare il carico aerodinamico deportante, generando il minor quantitativo di resistenza all'avanzamento, per quanto possibile, e ridurre il carattere portante delle ruote anteriori e andando a migliorare i vortici di natura turbolenta da esse generati. Come già precedentemente trattato, si procederà con la preparazione dei modelli CAD sui quali verrà in seguito svolta l'analisi computazionale per valutarne i possibili miglioramenti o peggioramenti. Nel presente lavoro la deportanza viene indicata con valori negativi di Lift, secondo la convenzione adottata dal software CFD.

Come base di partenza per lo sviluppo dell'ala anteriore è stato selezionato il risultato di precedenti studi svolti da altri ragazzi del team, composta da un profilo principale denominato Main composto da un profilo GAW-1 con una corda di 1392mm e angolo d'attacco di $2,6^\circ$, seguito da due profili minori denominati Flap con profilo Clark-y e 95,10 mm di corda, quello che seguita il Main procedendo dal basso verso l'alto, verrà indicato come Primo Flap, che presenta un angolo d'attacco di $17,6^\circ$ a differenza del profilo successivo, denominato Secondo Flap che ha un angolo d'attacco di $32,6^\circ$.

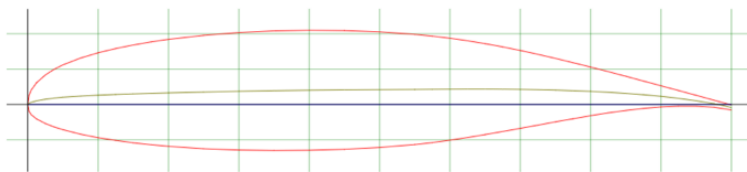


Figura 28 - profilo GAW 1

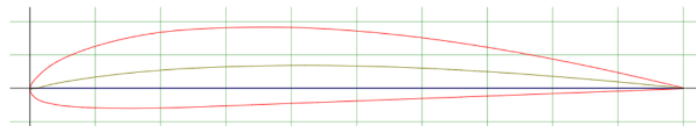


Figura 29 - Profilo Clark Y

Oltre ai singoli profili sull'ala di base sono presenti nella parte interna due elementi che collegano i profili al telaio, cioè i supporti, mentre alle estremità più esterne sono presenti due paratie laterali, gli Endplate con il compito di separare le zone di sovrappressione e sottopressione che si generano tra intradosso ed estradosso dei profili sulle estremità, sulla parte inferiore degli Endplate sono presenti dei turbolatori che hanno lo scopo di migliorare l'isolamento del fondo dell'ala anteriore e dell'intera vettura, da flussi di aria indesiderati, tramite la generazione di vortici.

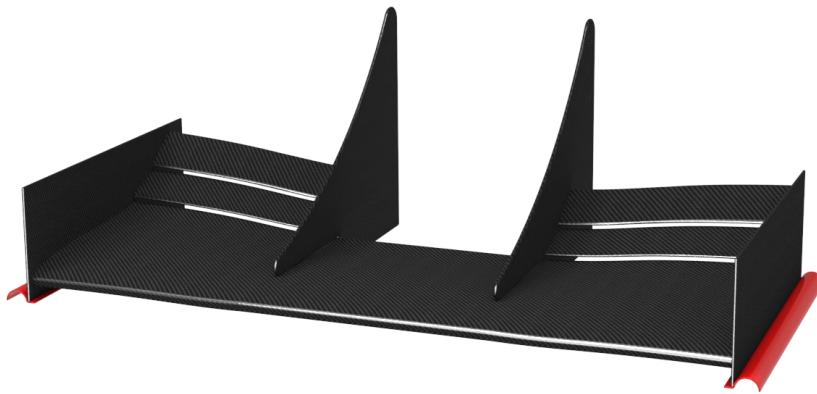


Figura 30 - Configurazione iniziale ala anteriore

Tale configurazione produce dei valori di lift e drag pari a quanto riportato in tabella con un'efficienza pari a $E=8.4$.

Lift	Drag	Efficiency
-117N	14N	8.4

Tabella 2 - Valori di riferimento configurazione iniziale

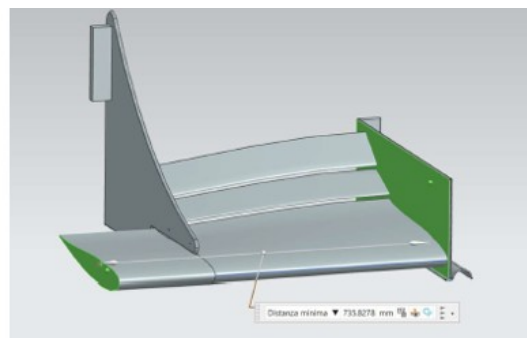
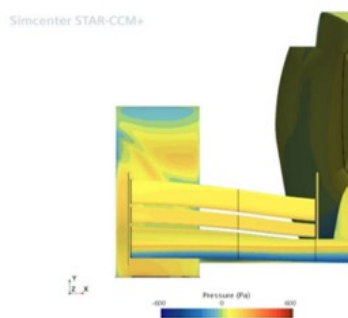


Figura 31 - scena di pressione iniziale e geometria iniziale

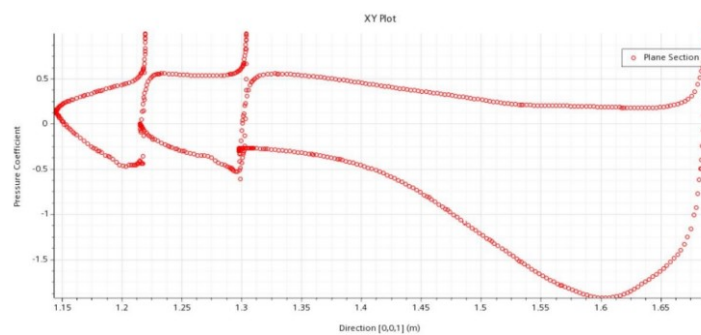


Figura 32 - Grafico Cp configurazione iniziale

Per trovare nuovi elementi da aggiungere o per valutare se fosse possibile modificare le geometrie o posizioni degli elementi già presenti, al fine di implementare le prestazioni aerodinamica è stata svolta una ricerca bibliografica, considerando gli studi svolti da altri Team , dalla quale è emerso che per una tipologia di vettura a ruote scoperte, come nel caso della Formula SAE, la principale problematica è quella per l'appunto delle tendenze portanti di un corpo tozzo come lo sono i pneumatici , che oltre a non favorire la corretta sterzata e trasferimento di carico, generano un flusso in scia molto turbolento (Tire Wake) che se non viene opportunamente gestito influenza l'aerodinamica dell'intera vettura , questo fenomeno si viene a verificare in special modo nel caso dei pneumatici anteriori. Al fine di minimizzare tale fenomeno e massimizzare l'efficienza globale del pacchetto aerodinamico, la ricerca bibliografica ha suggerito l'implementazione di dispositivi, che permettono di controllare il flusso d'aria tramite la generazione di vortici controllati, direttamente integrati sull'ala anteriore:

- DIVE PLANES: che sono delle appendici a sbalzo sul lato esterno degli Endplates laterali, con il compito di generare forti vortici longitudinalmente al veicolo. Negli studi aerodinamici si dimostra ampiamente che l'uso di questi dispositivi generi un piccolo carico aerodinamico sulla superficie stessa del Dive Planes i vortici prodotti contribuiscono al deviare la scia turbolenta degli pneumatici verso l'esterno generando il così detto effetto "outwash".
- TURNING VANES: è un elemento laminare con una determinata curvatura, che permette di deviare l'aria in una zona ben precisa, può essere nella parte interna e generare "inwash" o esternamente come nel caso dei Dive Planes e generare "outwash". La loro applicazione può avvenire sia sulla parte superiore che nella parte inferiore dei profili, nel caso specifico di questo studio è stato posizionato nella parte superiore del main con il fine di generare un effetto di outwash così da schermare ulteriormente gli pneumatici anteriori.

La scelta è ricaduta su tali elementi a seguito di alcune considerazioni sugli ingombri, che rendevano difficoltosa l'implementazione di ulteriori profili alari; perciò, sono stati selezionati degli elementi con ingombri contenuti che si concentrano sul massimizzare le prestazioni dell'ala anteriore e gestire i vortici degli pneumatici anteriori, invece di implementare solamente la deportanza.

Un altro punto che è insorto durante l'analisi è il peso dei supporti di fissaggio dell'ala al telaio che così studiati fino a questo momento è di 1,5 kg, ciò ha portato alla necessità di uno studio per cercare di ridurre il peso del sistema di fissaggio senza introdurre tiranti o altri elementi che disturbino il flusso e il rendimento del pacchetto aerodinamico.

4.1 Turning Vanes

4.1.1 obiettivo fluidodinamico e selezione della geometria

Il posizionamento dei turning vanes sul dorso del main dell'ala anteriore è stato concepito con l'obiettivo mirato di indurre una forte deviazione locale del flusso e di innescare strutture vorticosi coerenti ad alta energia. Questa specifica scelta geometrica mira a realizzare una vera e propria schermatura aerodinamica dello pneumatico anteriore. Nelle vetture a ruote scoperte, l'impatto del flusso indisturbato contro la superficie frontale della gomma in rotazione genera un massiccio distacco della vena fluida e un forte aumento della resistenza. Introducendo i turning vanes sul main plane, il flusso viene forzatamente deviato prima di investire lo pneumatico; i vortici longitudinali generati dal bordo d'uscita dei deviatori investono lateralmente la zona di ristagno della ruota, agendo come una barriera fluido dinamica che riduce l'impatto diretto dell'aria sul battistrada. Questo effetto combinato di deviazione e schermatura riduce l'interazione distruttiva della scia dello pneumatico (tire wake) con il resto della vettura, incrementando non solo la deportanza locale dell'ala, che lavora in un campo di moto più pulito, ma migliorando l'efficienza aerodinamica globale dell'intera vettura.

Sono stati svolti studi variando, tra le differenti prove, esclusivamente le feature geometriche, con piccole variazioni e mantenendo rigorosamente invariato il setup numerico, il dominio e le condizioni al contorno descritti nel capitolo precedente. Questo approccio incrementale e differenziale ha permesso di isolare l'effetto fluidodinamico di ogni singola modifica.

La Tabella 3 illustra la matrice complessiva delle simulazioni eseguite, definendo la progressione logica dei casi studio, a partire dalla configurazione priva di appendici (*Baseline*) fino all'assemblaggio finale ottimizzato.

simulazione	Denominazione configurazione	Focus geometrico	Obiettivo della prova
0	Baseline	Vettura standard senza appendici aggiuntive	Estrazione dei dati di riferimento globale
1	Turn 1	Applicazione dell'appendice aerodinamica	Generazione dei vortici e schermatura ruota anteriore
2	Turn 2	Aggiunta di un Gurney flap sulla parte superiore	Generazioni di vortici con maggior energia
3	Turn 3	Aggiunta di un profilo E423	Upwash del flusso davanti alla ruota

		congiungente il turn all'endplate	
4	Turn 4	Aggiunta di un profilo CH10 congiungente il turn all'endplate	Upwash del flusso davanti alla ruota
5	Turn 5	Introduzione di un altro turn più piccolo	Generare più vortici

Tabella 3 - Iter progettuale dei turning vane

Nelle sezioni che seguono, i risultati di questa sessione di studio vengono scorporati e analizzati nel dettaglio, con un occhio alle scene di pressione dei valori di c_l e c_d e delle strutture vorticosi che hanno condotto alla scelta finale.

4.1.2 Turning vanes “Turn1”

La configurazione denominata Turn 1 prevede l'introduzione di un deviatore di flusso posizionato direttamente sul dorso (zona di alta pressione) del main dell'ala anteriore, in una posizione strategica antecedente lo pneumatico della ruota anteriore (Figura 33).



Figura 33 - Turn 1

L'obiettivo di questa appendice verticale è quello di intercettare lo strato limite superiore dell'ala per generare una deviazione controllata della vena fluida e un contestuale sistema di vortici longitudinali. Tale struttura è geometricamente ottimizzata per investire la porzione interna dello pneumatico anteriore, agendo come uno scudo fluidodinamico volto a mitigare il violento impatto dell'aria contro la ruota in rotazione e a ridurre la scia turbolenta.

I dati numerici estratti dal solutore per la condizione di ala intera (vettura completa) evidenziano l'eccellente bontà della soluzione, confermando sperimentalmente l'ipotesi di schermatura. Nella Tabella 4 vengono messi a confronto i valori di portanza e resistenza della configurazione Turn 1 rispetto alla simulazione di riferimento Baseline.

Configurazione	Lift Ala Intera [N]	Drag Ala Intera [N]	Drag Zona Schermata (Ruote Ant.) [N]
Baseline	-219.10	26.72	2.74
Turn 1	-224.86	30.24	1.86
Variazione Assoluta	+5.76	+3.52	-0.88
Variazione Percentuale (%)	+2.63%	+13.17%	-32.12%

Tabella 4 - Confronto Turn 1 e Baseline

L'esame dei dati complessivi dell'ala intera mostra un incremento della deportanza totale, che passa da -219.10 a -224.86 (+2.63%), accompagnato da un aumento della resistenza locale dell'ala, che sale da 26.72 a 30.24 (+13.17%). Questo incremento di drag sull'ala è un fenomeno fisico ampiamente previsto, causato dall'aumento di superficie bagnata del deviatore e dalla resistenza indotta necessaria a innescare il vortice longitudinale.

Tuttavia, l'efficacia reale del Turn 1 emerge chiaramente quando si analizza l'impatto sulla resistenza complessiva della zona ruote anteriori: grazie all'effetto deviatore del componente, il drag complessivo localizzato sugli pneumatici crolla drasticamente, passando da 2.74 nella configurazione Baseline a soli 1.86 nella configurazione ottimizzata. Si registra quindi un abbattimento della resistenza sulle ruote pari al -32.12% (pari a un guadagno netto di 0.88 N), il quale compensa ampiamente l'onere energetico e geometrico applicato sul main plane.

I riscontri quantitativi trovano una perfetta corrispondenza nell'analisi visiva delle linee di flusso (streamlines) generate in ambiente STAR-CCM+.

Come evidenziato nel dettaglio della porzione anteriore (Figura 34), il profilo curvo del Turn 1 accoglie il flusso ad alta pressione sul dorso del main plane e lo costringe a una repentina deviazione d'angolo. Questo raddrizzamento impedisce che l'aria si espanda in modo caotico verso l'interno del musetto, mantenendo la vena fluida pulita ed energetica mentre scavalca gli elementi della sospensione.

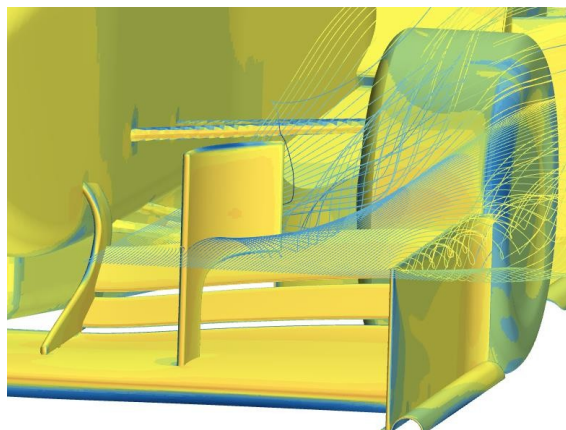


Figura 34 - Scena di pressione e Streamline Turn 1

Allargando lo sguardo sul comportamento globale del veicolo (Figura 36), si osserva chiaramente come il flusso energetico opportunamente deviato dal Turn 1 vada a lambire il fianco della scocca senza impattare direttamente sul battistrada dello pneumatico. Il vortice generato funge da barriera pneumatica stazionaria: la macro-zona di ricircolo turbolento a bassa pressione che nella Baseline soffocava l'ingresso delle side wing risulta qui nettamente ridotta. Le linee di flusso scorrono tese e parallele lungo il corpo vettura, ottimizzando l'alimentazione fluida dei radiatori laterali e riducendo le perdite di pressione totale a valle.

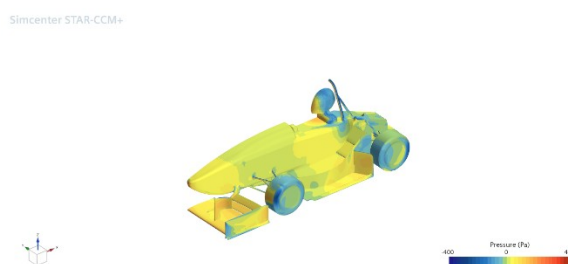


Figura 35 - Scena di Pressione con Turn 1

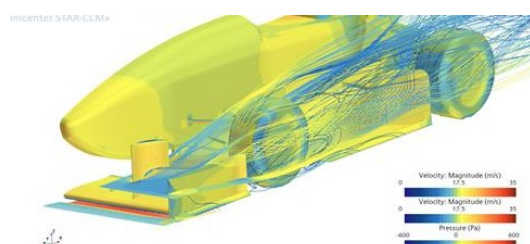


Figura 36 - Scena con Streamline della macchina con Turn 1

I risultati della simulazione confermano la configurazione Turn 1 come un'ottima soluzione ingegneristica. Nonostante il penalizzante incremento di drag locale sul pacchetto alare (+1.76), la capacità del componente di riorganizzare il campo di moto globale e di abbattere di quasi un terzo la resistenza di forma dello pneumatico (da 1.37 a 0.93) si traduce in un netto guadagno di efficienza per l'intera monoposto.

4.1.3 Turning vanes “Turn2”

La configurazione denominata Turn 2 rappresenta un'evoluzione diretta del primo deviatore. Sulla base dei risultati incoraggianti del Turn 1 in termini di riduzione del drag dello pneumatico, si è scelto di incrementare ulteriormente l'energia sussidiaria del vortice di schermatura. A tal fine, è stata introdotta una piccola paratia ortogonale sul bordo superiore del deviatore, geometricamente assimilabile a un Gurney flap. L'obiettivo ingegneristico di questa micro-appendice è generare un forte accumulo di pressione statica sul lato interno del turning vane e un repentino distacco sul bordo d'uscita. Questo gradiente punta a incrementare la circolazione locale e a "donare più energia" al vortice longitudinale, stringendone il nucleo coeso per contrastare in modo ancora più aggressivo l'espansione trasversale della scia dello pneumatico

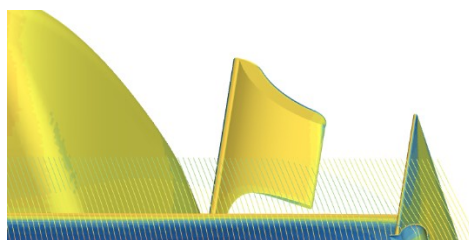


Figura 37 - Vista in dettaglio del Turn 2

Configurazione	Lift Ala Intera [N]	Drag Ala Intera [N]	Drag Zona Schermata (Ruote Ant.) [N]
Baseline	-219.10	26.72	2.74
Turn 2	-181.40	28.40	1.58
Variazione Assoluta	37.7	1.68	1.16
Variazione Percentuale (%)	-17.21%	+6.29%	-42.34%

Figura 38 - Confronto Turn 2 e Baseline

L'analisi differenziale dei dati rivela un comportamento fluido-dinamico di estremo interesse. L'obiettivo primario della modifica geometrica è stato ampiamente raggiunto: il

drag complessivo gravante sugli pneumatici anteriori crolla da 2.74 N a soli 1.58 N, facendo registrare un imponente abbattimento locale della resistenza pari al -42.34% (un risultato nettamente superiore al -32.12% ottenuto nel Turn 1). Ciò dimostra inequivocabilmente che l'aggiunta della paratia superiore ha energizzato il vortice di outwash, blindando la ruota dall'impatto fluidodinamico diretto. Il solutore quantifica inoltre una portanza positiva parassita sulla ruota pari a 4.50 N, legata alla forte deviazione ascensionale del flusso attorno al comparto ruota. Tuttavia, il bilancio globale evidenzia un severo limite di questa configurazione: la deportanza dell'ala anteriore subisce un drastico crollo, scendendo da -219.10 N a -181.40 N (-17.21%), accompagnata da un aumento del drag dell'ala stessa pari a 28.40 N (+6.29%).

La spiegazione fisica di questo decremento di performance sull'ala, nonostante l'ottima schermatura della ruota, è legata all'interazione d'induzione vorticosa. L'introduzione del Gurney sul turning vane aumenta drasticamente il bloccaggio aerodinamico locale sul dorso del main plane. Come si evince parzialmente dalla mappatura delle pressioni e delle velocità nel solutore, l'appendice genera un vortice talmente intenso da indurre un forte campo di velocità discendenti (down wash) sulle porzioni di ala immediatamente adiacenti. Questo effetto altera l'angolo d'attacco effettivo del flusso che investe i flap successivi, causandone lo stallo locale o riducendo drasticamente la capacità di generazione di carico dell'ala anteriore. In parole povere, l'energia sottratta al flusso per rinviare il vortice di schermatura della ruota viene pagata a caro prezzo con la svalutazione della mappa di pressione sul ventre dell'ala anteriore. La configurazione Turn 2 rappresenta un'ottimizzazione mirata che ha però sbilanciato l'efficienza globale del veicolo. Sebbene l'abbattimento del drag sulle ruote anteriori (-42.34%) sia il più alto registrato nell'intera campagna di simulazione, la perdita di oltre 37 N di carico verticale all'anteriore comprometterebbe gravemente il bilanciamento.

4.1.4 Turning vanes “Turn3”

La configurazione Turn 3 rappresenta l'evoluzione più spinta e complessa del sistema di deviazione del flusso anteriore. Al fine di massimizzare l'effetto di outwash ed eliminare alla radice l'impatto del fluido contro la sezione frontale dello pneumatico, è stata introdotta un'unione strutturale e fluidodinamica tra il turning vane sul main plane e la paratia laterale (endplate). Tale collegamento è stato realizzato integrando un profilo aerodinamico ad alta curvatura E423 (Figura 39). L'adozione del profilo E423 — un profilo noto in ambito aerodinamico per l'elevatissima capacità di deflessione e generazione di carico anche a bassi numeri di Reynolds — risponde a una precisa logica: fungere da vera e propria "deviatore fluidodinamica" trasversale. L'obiettivo è raccogliere l'aria accelerata dal corpo ala e convogliarla forzatamente verso l'esterno della vettura, bypassando completamente la regione di ristagno dello pneumatico e scongiurando l'espansione incontrollata della sua scia turbolenta verso il fondo piatto.

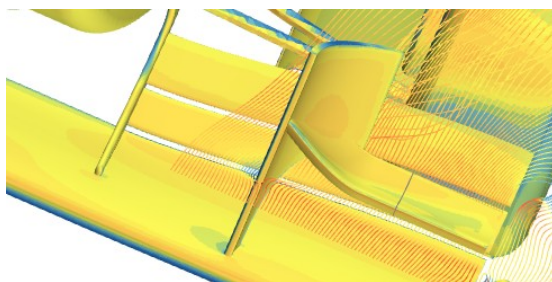


Figura 39 – Turn 3

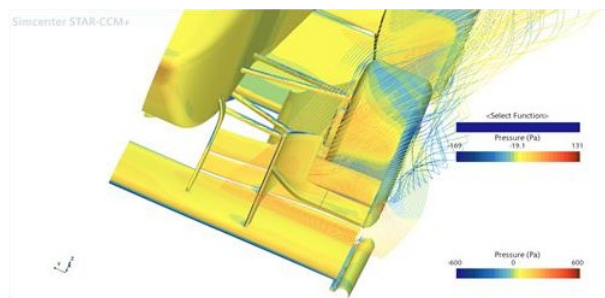


Figura 40 - Scena di pressione e streamline Turn 3

Configurazione	Lift Ala Intera [N]	Drag Ala Intera [N]	Drag Zona Schermata (Ruote Ant.) [N]
Baseline	-219.10	26.72	2.74
Turn 3	-186.40	29.88	0.38
Variazione Assoluta	32.7	3.16	2.36
Variazione Percentuale (%)	-14.92%	+11.83%	-86.13%

Tabella 5 - Confronto Turn 3 e Baseline

I riscontri quantitativi della simulazione Turn 3 evidenziano un comportamento straordinario sulla zona dello pneumatico. Il drag complessivo gravante sulle ruote anteriori subisce un vero e proprio crollo verticale, passando dai 2.74 N della Baseline a ben 0.38 N, che si traduce in un abbattimento locale della resistenza pari al -86.13%. Questo dato numerico certifica che il profilo E423 è riuscito a deviare la quasi totalità della portata d'aria lontano dalla gomma, superando l'efficacia di tutte le configurazioni precedenti. Si rileva, inoltre, una portanza positiva parassita sullo pneumatico di 4.50 N, causata dalla forte componente ascensionale del flusso che aggira la ruota. Di contro, l'introduzione di questo profilo ad alta

curvatura comporta un delle conseguenze negative sul pacchetto dell'ala anteriore: la deportanza dell'ala anteriore subisce una perdita, attestandosi a -186.40 N (-14.92%), accompagnata da un aumento del drag locale pari a 29.88 N ($+11.83\%$). L'interpretazione fisica di questo notevole abbattimento di resistenza trova riscontro visivo diretto nell'analisi delle linee di flusso e dei vettori di velocità ricavati in ambiente STAR-CCM, il profilo E423 agisce come un canale convogliatore sigillato tra il turning vane e l'endplate. Il flusso non ha più la possibilità di espandersi o di infiltrarsi nell'intercapedine tra l'ala e lo pneumatico. Le linee di corrente vengono intercettate prima di raggiungere la ruota e, seguendo la corda e l'elevato camber del profilo E423, subiscono una sterzata macroscopica verso l'esterno (outwash puro). La zona immediatamente davanti al battistrada risulta quasi completamente isolata cinematicamente, riducendo la pressione totale di ristagno sulla gomma e, di conseguenza, annullandone quasi la resistenza di forma. Tuttavia, l'efficacia del profilo nel generare questa imponente forza trasversale si ripercuote negativamente sulla scia a valle del profilo alare. Il bloccaggio aerodinamico e il massiccio gradiente di pressione introdotto dall'E423 causano un'alterazione dei flussi diretti ai flap superiori dell'ala. Quest'ultimi perdono la corretta alimentazione e lavorano in regime di parziale stallo indotto, spiegando così la perdita di carico verticale complessivo dell'ala (32.70 N), che pur rimanendo significativa, risulta meno severa rispetto a quanto preventivato nelle primissime iterazioni geometriche. La configurazione Turn 3 rappresenta il punto di massima efficacia per quanto concerne il tire wake management puro, stabilendo il record di abbattimento del drag della ruota (-86.13%). Ciononostante, dal punto di vista dell'ottimizzazione globale del veicolo, il trade-off energetico si conferma penalizzante per il bilanciamento complessivo: il calo del 14.92% di deportanza sull'asse anteriore ridurrebbe sensibilmente il grip pneumatico della vettura nelle curve a medio-alta velocità, vanificando i benefici introdotti dal Turn 3.

4.1.5 Turning vanes “Turn4”

I risultati emersi dalla configurazione Turn 3 hanno evidenziato come un profilo ad altissima curvatura (E423) sia in grado di abbattere drasticamente il drag della ruota, al prezzo però di un bloccaggio aerodinamico intollerabile per i flap dell'ala anteriore. Per ovviare a questo limite e ricercare un compromesso ottimale, la configurazione Turn 4 sostituisce il profilo E423 con un profilo CH10 come elemento di giunzione transizionale tra il turning vane e l'endplate. Il profilo CH10 è caratterizzato da una distribuzione del camber e dello spessore geometricamente più progressiva rispetto all'E423. L'obiettivo ingegneristico di questa sostituzione è duplice: mantenere un canale fluido guidato che generi un effetto outwash sufficiente a proteggere lo pneumatico, ma riducendo sensibilmente la severità del gradiente di pressione avverso. In questo modo si punta a eliminare il fenomeno di stallo indotto sui flap superiori dell'ala anteriore, ripristinando la corretta generazione di deportanza del corpo principale del pacchetto alare.

Configurazione	Lift Ala Intera [N]	Drag Ala Intera [N]	Drag Zona Schermata (Ruote Ant.) [N]
Baseline	-219.10	26.72	2.74
Turn 4	-224.3	25.80	2.60
Variazione Assoluta	5.20	0.92	0.14
Variazione Percentuale (%)	2.37%	-3.44%	-5.11%

Tabella 6 - Confronto Turn 4 e Baseline

L'analisi quantitativa della simulazione Turn 4 mostra un'inversione di tendenza straordinaria rispetto alle configurazioni Turn 2 e Turn 3. Il deficit di carico verticale sull'ala anteriore è stato completamente azzerato: la deportanza complessiva dell'ala non solo non cala, ma sale a -224.30 N, registrando un incremento del +2.37% rispetto alla Baseline. Inoltre, si osserva una concomitante riduzione del drag locale dell'ala stessa, che scende a 25.80 N (-3.44%). Sullo pneumatico anteriore, l'effetto schermante si attesta su livelli più contenuti rispetto al crollo verticale del Turn 3, ma rimane comunque positivo: il drag delle ruote scende da 2.74 N a 2.60 N (-5.11%). Il solutore evidenzia anche in questo caso una quota di portanza positiva parassita sullo pneumatico pari a 3.86 N, legata alla deviazione tridimensionale delle linee di flusso in prossimità del gruppo ruota. Come si osserva nel dettaglio ravvicinato del gruppo ala-ruota (Figura 41), l'introduzione del profilo CH10 permette di gestire il flusso in arrivo sul main plane senza generare occlusioni o distacchi macroscopici. Le linee di corrente intercettate dalla paratia verticale scorrono tese e pulite all'interno del canale geometrico, subendo una deflessione verso l'esterno (outwash) progressiva ed efficiente. Questa deviazione geometrica sposta la vena fluida energetica oltre il fianco esterno dello pneumatico, isolando parzialmente il battistrada frontale e garantendo la riduzione del drag della ruota del 5.11%.

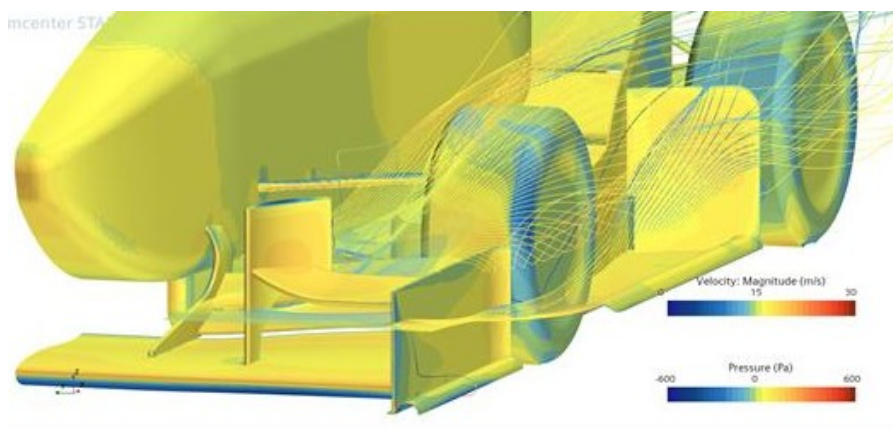


Figura 41 - Scena di pressione e streamline Turn 4

Il vantaggio cruciale e risolutivo di questa configurazione emerge tuttavia allargando lo sguardo sull'andamento globale dei flussi lungo l'intero corpo vettura (Figura 42). L'adozione della curvatura più dolce del profilo CH10 ha completamente sanato il fenomeno di stallo indotto che penalizzava i flap superiori nel Turn 3. Le linee di corrente che scavalcano l'ala anteriore e lambiscono il musetto rimangono perfettamente attaccate alle superfici aerodinamiche e mantengono una traiettoria parallela e lineare. Questo flusso, non essendo disturbato da macro-separazioni turbolente, riesce ad alimentare in modo ottimale sia il ventre della vettura verso il fondo piatto, sia l'ingresso delle pance radianti laterali (sidepods). L'eliminazione dei ricircoli d'aria nocivi sul dorso dell'ala spiega fisicamente sia l'incremento di deportanza ottenuto (+5.20 N) sia il guadagno in termini di penetrazione aerodinamica complessiva dell'ala stessa (-0.92 N).



Figura 42 - streamline Turn 4

Sebbene l'analisi isolata del pacchetto alare anteriore indichi la configurazione Turn 4 come la più efficiente e promettente, l'estensione del bilancio aerodinamico a una visione d'insieme dell'intero veicolo evidenzia un fenomeno di interazione mutua distruttiva a valle. Il flusso d'aria, pur scorrendo teso, pulito e privo di stalli sui flap superiori dell'ala grazie al profilo CH10, subisce una deviazione geometrica che altera radicalmente la traiettoria dei flussi diretti verso il fondo della monoposto. Questo nuovo assetto fluidodinamico investe in modo fortemente sfavorevole le groundwing (le ali inferiori deputate a sigillare e alimentare il diffusore), causandone una severa perdita di efficacia. I dati numerici estratti dal solutore evidenziano che il carico verticale generato dalle groundwing subisce un vero e proprio crollo prestazionale, passando da un valore di riferimento di -130 N nella configurazione Baseline a soli -86 N nel Turn 4. Questo deficit localizzato sul fondo, pari a ben -44 N, cannibalizza e annulla ampiamente il modesto incremento di deportanza registrato sull'ala anteriore (+5.20 N). Di conseguenza, l'introduzione del profilo CH10 si traduce in un sensibile decremento della lift totale (deportanza complessiva) del veicolo, sbilanciando

l'aerodinamica generale della vettura. Questo paradosso fluido-dinamico giustifica formalmente la scelta finale di scartare il Turn 4 in favore del Turn 1. Il Turn 1, pur non incrementando il carico dell'ala anteriore e offrendo una schermatura locale dello pneumatico meno estrema rispetto ai profili alari di giunzione, garantisce un solido abbattimento del drag della ruota (-32.12%) senza alterare l'alimentazione delle macrostrutture posizionate a valle (downstream). Il Turn 1 viene quindi eletto come l'ottimo globale di compromesso, dimostrando come in ambito Automotive l'efficienza complessiva del veicolo debba sempre prevalere sull'ottimizzazione esasperata di un singolo componente isolato.

4.1.6 Turning vanes “Turn5”

La configurazione Turn 5 fonde le filosofie costruttive del Turn 1 e del Turn 3, introducendo un sistema a doppio deviatore.

L'elemento innovativo risiede nel deviatore più esterno, il quale non è libero ma è ancorato all'endplate tramite un piccolo profilo alare trasversale. L'obiettivo ingegneristico è ricreare l'effetto di deviazione aggressiva (outwash forzato) tipico dei canali chiusi visti nel Turn 3, ma riducendone drasticamente la scala e l'ingombro trasversale. In questo modo si cerca di schermare efficacemente lo pneumatico anteriore senza generare quel massiccio bloccaggio aerodinamico che andrebbe a innescare stalli sui flap superiori o a depotenziare il fondo piatto.

Configurazione	Lift Ala Intera [N]	Drag Ala Intera [N]	Drag Zona Schermata (Ruote Ant.) [N]
Baseline	-219.10	26.72	2.74
Turn 4	-224.64	30.92	1.56
Variazione Assoluta	5.54	4.20	1.18
Variazione Percentuale (%)	2.53%	15.72%	-43.07%

Tabella 7 - Confronto Turn 5 e Baseline

Il responso quantitativo della configurazione Turn 5 certifica la bontà dell'approccio ibrido, configurandosi come una delle iterazioni più performanti dell'intera campagna. L'efficacia nel tire wake management è eccellente: il drag complessivo delle ruote anteriori viene

abbattuto a 1.56 N, registrando una riduzione del -43.07%. Questo dimostra che il piccolo profilo trasversale è sufficiente a deviare la vena fluida lontano dal battistrada, pur generando una portanza parassita sulle ruote pari a 5.26 N. Il vero trionfo di questa geometria si osserva sull'ala anteriore. A differenza del Turn 3, il corpo alare non subisce perdite di carico, ma fa segnare un incremento di deportanza che porta il totale a -224.64 N (+2.53%). Il compromesso da accettare è un aumento della resistenza locale dell'ala, che sale a 30.92 N (+15.72%), un costo energetico ampiamente giustificato dalla combinazione di schermatura della ruota e aumento della down force frontale. La convalida fluidodinamica del Turn 5 si avvale dello studio diretto del campo di pressione statico radente alle superfici della vettura (rappresentato in scala cromatica, dove i toni caldi indicano sovrappressione e quelli freddi indicano depressione/suzione). Nel dettaglio ravvicinato (Figura 43), è perfettamente visibile il comportamento della struttura ibrida. L'alta pressione si accumula sulla faccia anteriore dei due deviatori e, in particolare, sul piccolo profilo trasversale che unisce l'elemento esterno all'endplate. Questo mini-canale genera un intenso gradiente di pressione locale che innesca un forte vortice longitudinale (outwash), sufficiente a deviare il flusso radente senza però occludere l'intera sezione di passaggio come avveniva nel Turn 3. Il dorso del main si mantiene in zona di alta pressione, garantendo la generazione di spinta verso il basso.

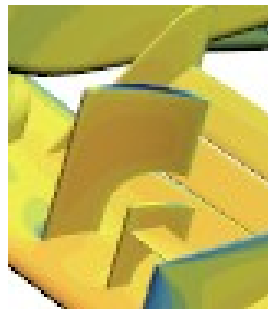


Figura 43 - Turn 5

L'efficacia globale di questo scudo fluidodinamico emerge dalla vista superiore dell'intera vettura (Figura 44). La scia turbolenta dello pneumatico risulta ben allontanata dai lati del telaio; la distribuzione omogenea delle pressioni sulle fiancate conferma che il flusso diretto verso il retrotreno scorre pulito e indisturbato.

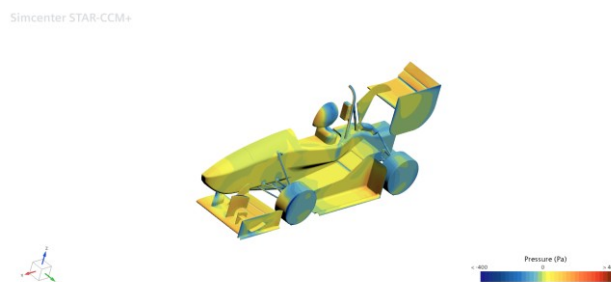


Figura 44 - Scena di pressione Turn 5

Il dato qualitativo fondamentale proviene dalla vista inferiore (Figura 45). Le estese aree blu scuro sul ventre dell'ala anteriore e, crucialmente, lungo i canali del fondo piatto confermano che la miniaturizzazione del ponte trasversale ha evitato i disastrosi effetti collaterali del Turn 4. Le groundwing e l'ingresso del diffusore lavorano in condizioni di suzione ottimali, dimostrando che il campo di moto a valle del deviatore ibrido non interferisce negativamente con l'estrazione aerodinamica del sotto scocca.

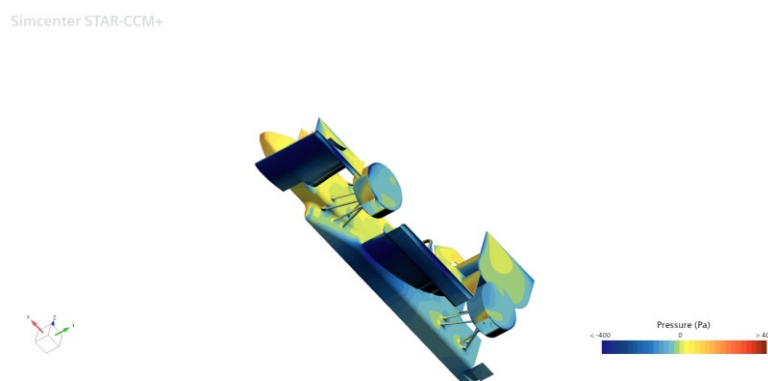


Figura 45 -Scena di pressione fondo Turn 5

L'abbattimento della resistenza sulla ruota sfiora il 43% senza innescare lo stallo indotto sui flap anteriori, garantendo anzi un aumento del carico locale del 2.53%. Soprattutto, l'analisi visiva delle pressioni conferma che le macro-strutture a valle (fondo piatto e groundwing) operano in piena efficienza. Nonostante il drag locale dell'ala subisca un inevitabile incremento (+15.72%)

4.1.7 Confronto simulazioni

Al termine di una campagna di ottimizzazione CFD estesa su cinque differenti varianti geometriche, la selezione del pacchetto aerodinamico definitivo impone un bilancio critico che trascenda le sole performance locali, analizzando l'efficienza complessiva del sistema veicolo. L'analisi comparativa dei dati numerici, normalizzati a vettura completa, evidenzia come la configurazione Turn 1 si elegga a tutti gli effetti come l'ottimo globale di progetto, superando sul piano olistico soluzioni apparentemente più aggressive o sofisticate. Per comprendere la superiorità del Turn 1, è fondamentale mappare i limiti intrinseci mostrati dalle configurazioni successive:

- **Il bloccaggio aerodinamico del Turn 2 e Turn 3:** Sebbene l'estremizzazione dell'effetto scudo nel Turn 3 porti a un abbattimento straordinario del drag della ruota (che crolla a un valore vettura di appena 0.38 N), l'ostruzione geometrica introdotta dal profilo ad alta curvatura E423 innesci un massiccio stallo indotto sui flap superiori dell'ala anteriore. Questo fenomeno degrada la deportanza dell'ala portandola a soli 186.40 N, un deficit prestazionale inaccettabile all'avantreno.

- **Il paradosso del fondo piatto nel Turn 4:** La variante Turn 4 riesce a sanare lo stallone sui flap ripristinando il carico alare anteriore (-224.30 N) tramite il profilo CH10, ma genera una distorsione tridimensionale della scia che investe negativamente le groundwing posizionate a valle. Il crollo del carico generato dal fondo piatto (che passa da -130N a soli -86N) distrugge l'efficienza globale del veicolo, determinando una perdita netta sulla lift totale.
- **Il trade-off energetico del Turn 5:** La configurazione ibrida Turn 5 esprime un potenziale locale eccellente, coniugando un ottimo isolamento dello pneumatico (1.56 N di drag ruota) a un elevato carico alare (-224.64 N). Tuttavia, la complessità geometrica del doppio deviatore accoppiato al mini-ponte trasversale si traduce in un drammatico incremento della resistenza aerodinamica locale dell'ala anteriore, la quale schizza al valore record di 30.92 N (+15.72 % rispetto alla Baseline). Questo forte onere di drag penalizza severamente l'efficienza di penetrazione avanzata ($\frac{L}{D}$) dell'avantreno.

In questo scenario di complessi compromessi, la configurazione Turn 1 emerge come la soluzione più solida, bilanciata e priva di effetti collaterali distruttivi. Il Turn 1 garantisce un eccellente abbattimento della resistenza all'avanzamento dello pneumatico anteriore, che scende da 2.74 N a 1.86 N (pari a un netto -32.12 % di resistenza locale sulla ruota). Allo stesso tempo, il posizionamento e il dimensionamento accurato dell'appendice singola non introducono alcun bloccaggio nocivo: i flap superiori ricevono un flusso teso ed energetico, permettendo all'ala anteriore di sprigionare il massimo valore di deportanza dell'intera campagna aerodinamica, toccando ben -224.86 N complessivi (2.63% rispetto alla condizione Baseline). Ancora più importante, la pulizia del campo di moto del Turn 1 non perturba la traiettoria dei flussi diretti al sotto scocca, preservando la piena efficienza estrattiva delle groundwing e del diffusore posteriore. Mantenendo un drag locale dell'ala contenuto (30.24 N) rispetto all'esasperazione del Turn 5, il Turn 1 offre il miglior rapporto di efficienza globale, minimizzando la scia complessiva e garantendo il perfetto bilanciamento aero-meccanico tra i due assi della monoposto. Alla luce di queste evidenze, la configurazione Turn 1 viene formalmente deliberata come la geometria definitiva e ottimale della presente campagna di ricerca

	Front Whel lift	Front wheel drag	FW DRAG	FW LIFT
Baseline	1.12	1.37	13.36	-109.55
Turn 1	2.08	0.93	15.12	-112.43
Turn 2	2.25	0.79	14.20	-90.70
Turn 3	2.55	0.19	14.94	-93.20
Turn 4	1.93	1.30	12.90	-112.15
Turn 5	2.63	0.78	15.46	-112.32

Tabella 8 - Tabella riassuntiva Turning vanes

4.2 dive plane

4.2.1 obbiettivo fluidodinamico e selezione della geometria

L'implementazione dei dive planes sulla superficie esterna delle paratie laterali (endplates) dell'ala anteriore è stata finalizzata alla gestione energetica della scia esterna e al controllo del bilanciamento aerodinamico. L'obiettivo geometrico dei dive planes è duplice: generare una quota di deportanza localizzata sulla superficie superiore del dive plane e, simultaneamente, indurre il distacco di un forte vortice ad asse longitudinale. Sfruttando l'interazione tra l'alta pressione sul dorso del profilo e la bassa pressione sul ventre, l'appendice genera una struttura vorticoso che viaggia verso il retro della vettura fungendo da barriera aerodinamica invisibile. Questo vortice imprime una deviazione trasversale alla corrente, generando un netto effetto outwash che allontana la scia turbolenta della ruota (tire wake) dalle pance laterali e dal fondo piatto, preservando l'efficienza estrattiva del diffusore posteriore.

Al fine di convergere verso la configurazione ottimale del pacchetto aerodinamico anteriore, è stata pianificata ed eseguita una campagna computazionale comprendente 9 simulazioni CFD complete. Ciascun caso studio è stato impostato mantenendo rigorosamente invariati il dominio computazionale e le condizioni al contorno descritti nel capitolo precedente, al fine di garantire la perfetta confrontabilità dei risultati differenziali.

L'indagine numerica è stata articolata secondo un approccio iterativo a due stadi: e una prima fase di ottimizzazione posizionale (comprendente 2 simulazioni), finalizzata a testare lo spostamento nello spazio cercando di individuare la posizione ottimale per massimizzare le prestazioni. e una seconda fase di ottimizzazione geometrica (comprendente 6 simulazioni), volta a individuare il profilo e la forma più efficiente dei componenti.

La Tabella 4.2 illustra la matrice complessiva delle simulazioni eseguite, definendo la progressione logica dello studio.

simulazione	Denominazione configurazione	Focus geometrico	Obbiettivo della prova
0	Baseline	Vettura standard senza appendici aggiuntive	Estrazione dei dati di riferimento globale
0.1	Dp 1 no Turn	dell'introduzione del Diveplane senza Turn	Valutare la bontà dell'introduzione dell'elemento.
1	Dp 1	Applicazione di un'appendice sull'endplate	Generazione dei vortici e schermatura ruota anteriore
1.1	Dp 1 y+	Verifica di posizionamento	Spostamento in alto del profilo
1.2	Dp 1 y-	Verifica di posizionamento	Spostamento in basso del profilo
2	Dp 2	Aggiunta secondo dive in serie al primo	Generare un vortice più energetico
3	Dp 3	Aggiunta secondo dive in parallelo al primo	Generare più vortici
4	Dp 4	Sagomatura tramite profilo	Diminuzione del drag del componente
5	Dp 5	Adozione di una forma a S	Studio di forme geometriche differenti usate in ambito automobilistico

Tabella 9 - Iter progettuale dei Dive Plane

4.2.2 Dive plane “DP1 no turning vanes”

Una volta deliberata la configurazione Turn 1 come l'ottimo geometrico per quanto concerne i deviatori di flusso verticali (turning vanes), l'indagine aerodinamica si è estesa all'analisi dei dive planes (o canard), piccole appendici alari curve applicate sulla faccia esterna dell'endplate. L'obiettivo di questi elementi è duplice: generare carico verticale locale sfruttando il proprio angolo d'attacco e innescare un forte vortice d'estremità in grado di guidare la scia dello pneumatico verso l'esterno (outwash). Per comprendere a fondo l'impatto fluidodinamico isolato del solo dive plane, prima di valutarne l'interazione mutua con i componenti preesistenti, si è deliberata l'esecuzione di una simulazione propedeutica denominata “Dp1 no Turn”. In questa variante geometrica è stato installato il primo prototipo di dive plane (DP1) rimuovendo completamente il turning vane. Tale approccio "isolato" è fondamentale in ambito CFD per mappare accuratamente l'influenza dei singoli componenti ed evitare che l'effetto di schermatura del deviatore verticale mascheri i reali fenomeni fluidodinamici generati dalla nuova appendice orizzontale.

Configurazione	Lift Ala Intera [N]	Drag Ala Intera [N]	Drag Zona Schermata (Ruote Ant.) [N]
Baseline	-219.10	26.72	2.74
Dp1 non Turn	-174	28.20	4.46
Variazione Assoluta	5.54	4.20	-1.18
Variazione Percentuale (%)	-20.58%	5.54%	55.47%

Tabella 10 - Confronto Dp 1no Turn e Baseline

L'analisi quantitativa del bilancio delle forze evidenzia un comportamento altamente polarizzato e di grandissimo interesse ingegneristico. L'assenza del turning vane genera un crollo prestazionale immediato nel comparto ruota-ala anteriore:

- Il drag complessivo delle ruote anteriori subisce un'impennata drammatica, passando da 2.74 N a 4.26 N (+55.47 %).
- Il carico aerodinamico locale sviluppato dall'ala anteriore decade vistosamente, registrando una perdita netta di down force pari a -45.10 N (-20.58 % rispetto alla Baseline).
- Di contro, il solutore registra un dato globale di assoluto rilievo: la vettura completa esprime un livello di deportanza complessiva (Lift Totale) pari a ben -317.00 N, a fronte di una resistenza avanzamento complessiva (Drag Totale) stabilizzata a 99.30 N.

I severi scostamenti percentuali registrati sui singoli componenti trovano una chiara giustificazione fisica nei meccanismi d'interazione aerodinamica tridimensionale. Il balzo in avanti del drag ruota (+55.47 % dimostra in modo inconfutabile che il dive plane, se utilizzato da solo, non possiede un'estensione geometrica tale da bloccare o deviare lateralmente la massa d'aria che impatta direttamente contro il battistrada avanzato. Senza la barriera fisica verticale offerta dal turning vane, lo pneumatico torna a essere investito da un flusso ad alta energia, generando un massiccio distacco della vena fluida e ampliando la scia turbolenta a valle (tire wake). La marcata riduzione del carico locale dell'ala anteriore (che scende a -174.00 N) suggerisce l'instaurarsi di un gradiente di pressione avverso indotto dal dive plane stesso. Essendo posizionato sull'endplate, l'alta pressione che si genera sul dorso del dive plane per produrre down force locale si espande lateralmente, andando a disturbare il campo di moto dei flap superiori dell'ala anteriore, riducendone l'effetto di upwash e accelerazione del flusso sotto il profilo principale. Tutta via, il paradosso di un carico alare debole associato a una deportanza totale di veicolo eccellente (-317.00 N) svela l'autentico punto di forza del dive plane. Il forte vortice longitudinale energetico innescato dall'estremità libera del canard si propaga al di sotto del corpo vettura e lungo le pance laterali. Questo vortice agisce come una vera e proprio " sigillo", impedendo all'aria esterna ad alta pressione di infiltrarsi sotto il fondo. Di conseguenza, l'efficienza estrattiva delle groundwing e del diffusore posteriore subisce un incremento esponenziale, compensando ampiamente il deficit all'avantreno e incrementando il carico globale della monoposto. La simulazione Dp1 no Turn ha adempiuto con successo al proprio ruolo di indagine preliminare. Ha dimostrato che il dive plane non può e non deve essere inteso come un sostituto dei deviatori verticali, poiché la completa rimozione del turning vane espone l'assale anteriore a resistenze parassite inaccettabili e degrada il funzionamento locale dell'ala. Allo stesso tempo, lo straordinario potenziale mostrato nel favorire la deportanza totale del veicolo (-317.00 N) promuove a pieni voti l'introduzione di questa appendice. Il passo successivo della campagna CFD prevederà obbligatoriamente l'accoppiamento simbiotico del dive plane DP1 con la geometria Turn 1, alla ricerca di una configurazione combinata in grado di sommare l'eccellente tire wake management del deviatore verticale all'effetto sigillo sul fondo generato dal canard.

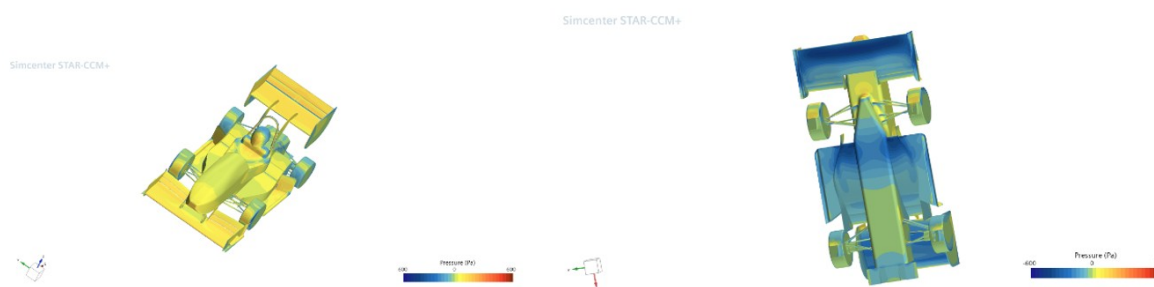


Figura 46 - scena di pressione Dp1 no Turn

4.2.3 Dive plane “DP1”



Figura 47 - Dp1

A valle dell'analisi isolata del Dive Plane, che aveva evidenziato un notevole potenziale di interazione con il fondo vettura a discapito però del carico locale sull'ala anteriore, la campagna di ottimizzazione si è conclusa con la simulazione del pacchetto aerodinamico completo (Prova 1). In questo scenario definitivo, il Dive Plane 1 (DP1) è stato accoppiato sul medesimo endplate insieme al deviatore verticale Turn 1.

L'obiettivo di questa configurazione è sfruttare l'azione di condizionamento del Turn 1 per proteggere il campo di moto attorno al DP1, evitando che l'alta pressione del canard causi un bloccaggio aerodinamico sui flap superiori dell'ala.

I dati quantitativi estratti dalla simulazione di delibera della monoposto mostrano il raggiungimento dei seguenti valori di forza:

- **Lift Ala Anteriore (Drag FW): -238.9 N** (Deportanza)
- **Drag Ala Anteriore (Drag FW): 30.0 N**
- **Lift Totale Veicolo: -750.0 N** (Deportanza)
- **Drag Totale Veicolo: 188.0 N**

I risultati numerici certificano lo straordinario successo ingegneristico del pacchetto accoppiato, evidenziando una sinergia che va ben oltre la semplice somma dei singoli componenti:

1. **Massimizzazione del Carico Locale (Avantreno):** Rispetto alla configurazione isolata Dp1 no Turn (dove l'ala anteriore crollava a causa dei disturbi fluidodinamici), l'introduzione del Turn 1 scherma e canalizza perfettamente la vena fluida. L'ala anteriore non solo recupera le perdite, ma lavora in condizioni di massima efficienza erogando ben -238.9 N di carico locale, con una resistenza di forma associata estremamente contenuta e bloccata a soli 30.0 N. Questo garantisce il corretto bilanciamento aero-meccanico e l'autorità sterzante necessaria sull'asse anteriore.

2. **Esplosione dell'Effetto Sigillo sul Fondo Vettura:** La presenza del turning vane non inibisce la nascita del vortice d'estremità ad alta energia generato dal DP1. Questo vortice si propaga in modo stabile verso il retrotreno, scorrendo lungo i lati delle pance. Fungendo da vera e propria "minigonna pneumatica", la struttura vorticoso isola il sottoscocca dalle infiltrazioni di aria ad alta pressione esterne.
3. **Raggiungimento del Target Globale di Downforce:** L'efficienza estrattiva di fondo piatto e diffusore viene esaltata al massimo livello grazie all'effetto sigillo del canard. Il dato macroscopico della vettura completa ne è la prova definitiva: il Lift Totale compie un balzo eccezionale toccando i -750.0 N di deportanza complessiva. Il tutto viene ottenuto mantenendo il Drag Totale del veicolo a soli 188.0 N, un valore ottimale che preserva l'efficienza aerodinamica globale di 3.989 ($E = \frac{L}{D}$).

La configurazione combinata Turn 1 + Dive Plane 1 si dimostra l'architettura di maggior successo dell'intero percorso di sviluppo dell'avantreno. Sanando i deficit locali e potenziando macroscopicamente il rendimento del fondo, il pacchetto garantisce -750.0 N di downforce totale. Alla luce di questi dati, la configurazione viene ufficialmente deliberata come assetto aerodinamico di riferimento per le prove dinamiche ad alto carico

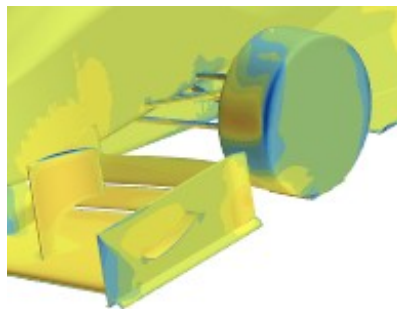


Figura 48 - Scena di pressione Dp1

4.2.4 Dive plane “DP1 y+” e Dive plane “DP1 y-”

Al fine di validare formalmente che la posizione spaziale deliberata per il Dive Plane 1 (DP1) rappresentasse l'ottimo globale e non un ottimo locale, è stata condotta uno studio di sensibilità geometrica lungo l'asse verticale (y). Mantenendo invariati l'angolo d'attacco (AoA) e la corda del profilo, sono state eseguite due ulteriori simulazioni CFD traslando il corpo del canard rispetto alla sua quota iniziale:

1. **Configurazione DP1 y+ (Traslazione verso l'alto):** Il dispositivo viene allontanato dal profilo del main plane dell'ala anteriore, muovendosi verso il bordo superiore dell'endplate.

2. **Configurazione DP1 y- (Traslazione verso il basso):** Il dispositivo viene ravvicinato ai flap dell'ala anteriore, riducendo lo spazio di scorrimento del flusso intermedio.

I dati estratti dai report del solutore per le tre varianti geometriche a confronto sono stati normalizzati a vettura completa e riassunti nella Tabella 11.

Parametro / Componente	Configurazione 1 (Delibera)	Configurazione DP1 y+ (Alto)	Configurazione DP1 y- (Basso)
Lift Totale Veicolo	-750.00 N	-536.00 N	-528.00 N
Drag Totale Veicolo	188.00 N	180.04 N	185.20 N
Lift Ala Anteriore	-238.90 N	-158.00 N	-226.00 N
Drag Ala Anteriore	30.00 N	26.80 N	82.00 N
Lift Ruota Anteriore	1.32 N	3.22 N	6.23 N
Drag Ruota Anteriore	1.65 N	2.77 N	2.30 N

Tabella 11 - Tabella confronto simulazioni analisi di posizione Dive plane

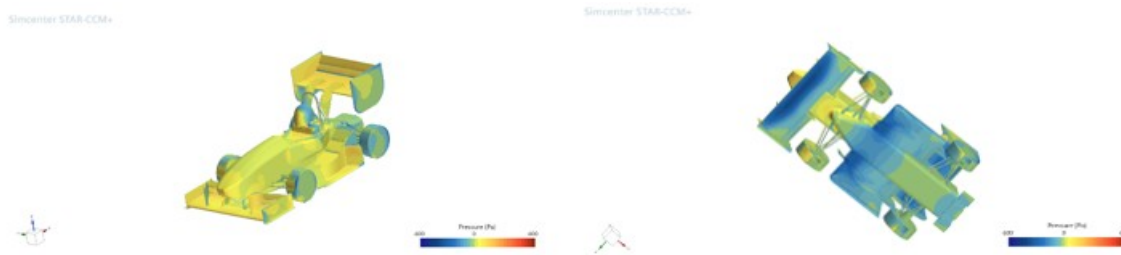


Figura 49 - Scena di pressione DP1 y+

L'analisi dei dati della configurazione DP1 y+ evidenzia un netto decadimento prestazionale della monoposto. Spostando il dive plane verso l'alto, il flusso d'aria ad alta energia manca l'interazione sinergica con il fondo scocca, riducendo drasticamente il Lift Totale del veicolo a soli -536.00 N (una perdita secca di 214 N di down force rispetto alla Configurazione DP1). Inoltre, l'allontanamento del canard riduce l'effetto di schermo sulla ruota anteriore: il drag della ruota sale a 2.77 N e il lift parassito dello pneumatico schizza a 3.22 N, a dimostrazione del fatto che il vortice generato è troppo alto per deviare correttamente le turbolenze del battistrada. Il lievissimo guadagno in termini di resistenza dell'ala (26.80 N) non compensa minimamente il crollo verticale del carico utile.

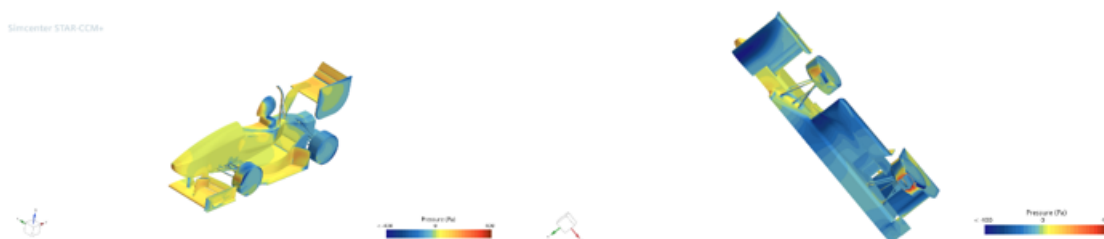


Figura 50 - Scena di pressione DP1 y-

La configurazione DP1 y- manifesta criticità analoghe seppur governate da un principio fisico differente. Il forte ravvicinamento del canard ai flap superiori satura lo spazio inter-profilo, innescando un severo fenomeno di bloccaggio aerodinamico locale. Questo strozzamento della vena fluida fa letteralmente esplodere la resistenza all'avanzamento dell'ala anteriore, che passa da 30 N a ben 82.00 N. Questo accumulo di pressione altera pesantemente il campo di moto a valle dell'ala, incrementando il lift parassito sulla ruota fino a 6.23 N. Di conseguenza, il fondo vettura perde il suo isolamento pneumatico e il Lift Totale della macchina crolla a -528.00 N, facendo registrare il peggior rendimento complessivo del pacchetto. Il confronto numerico incrociato dissipa ogni dubbio sul posizionamento spaziale del componente. La Configurazione 1 si attesta come l'unico punto di equilibrio capace di far cooperare i gradienti pressori dell'avantreno con la vorticità destinata al fondo vettura. Mentre le varianti traslate y+ e y- registrano perdite di down force globale superiori al 28%, la posizione nominale della Configurazione 1 garantisce il picco massimo di efficienza con -750.00 N di lift complessivo e un drag vettura bilanciato a 188.00 N. Questo studio di

sensibilità decreta la definitiva approvazione geometrica del posizionamento del Dive Plane 1, congelando il design strutturale dell'endplate per la produzione del componente.

4.2.5 Dive plane “DP2”

Inserito il Dive Plane 1 (DP1) come solido pilastro di riferimento prestazionale (benchmark dell'avantreno), l'indagine numerica è proseguita testando una seconda variante geometrica denominata Dive Plane 2 (DP2). Questa configurazione si prefiggeva l'obiettivo di variare il profilo e l'estensione superficiale del canard per verificare la possibilità di incrementare ulteriormente il sigillo pneumatico attorno alle ruote anteriori e al fondo vettura. I dati di forza estratti dai report CFD della simulazione con DP2 sono stati normalizzati a vettura completa e messi a confronto diretto con l'architettura di riferimento nella Tabella 12.

Parametro / Componente	Configurazione 1 (Benchmark DP1)	Configurazione 2 (Evoluzione DP2)	Variazione Assoluta ($\Delta DP2-DP1$)
Lift Totale Veicolo	-750.00 N	-658.00 N	+92.00 N (Perdita carico)
Drag Totale Veicolo	188.00 N	199.00 N	+11.00 N (Aumento drag)
Lift Ala Anteriore	-238.90 N	-208.00 N	+30.90 N (Perdita carico)
Drag Ala Anteriore	30.00 N	29.80 N	-0.20 N
Lift Ruota Anteriore	1.32 N	2.50 N	+1.18 N (Aumento lift parassito)
Drag Ruota Anteriore	1.65 N	2.07 N	+0.42 N (Aumento drag parassito)

Tabella 12 - Confronto Dp1 e Dp2

Dal punto di vista locale, la nuova geometria altera negativamente il bilanciamento pressorio sull'estremità dell'ala anteriore. Il Lift FW subisce una flessione sensibile, passando da -238.90 N a -208.00 N. Questa perdita di carico (pari a circa il 13%) indica che il profilo del DP2 genera un bloccaggio aerodinamico precoce o un'interazione d'onda nociva che riduce l'espansione dei flap adiacenti, a fronte di un guadagno in resistenza puramente trascurabile (-0.20 N sul Drag FW).

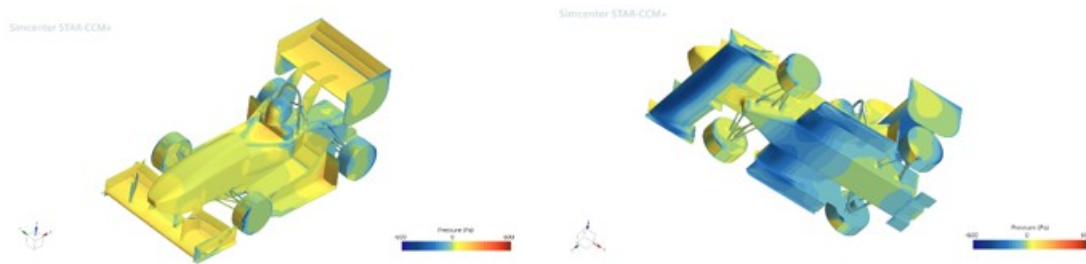


Figura 51 - Scena di pressione Dp2

L'aspetto più critico emerge tuttavia dall'analisi del comparto ruota e dall'interazione globale con il veicolo. Il DP2 fallisce nel suo compito primario di wake management:

- Il drag parassito dello pneumatico sale a 2.07 N (+0.42 N rispetto al benchmark).
- Il lift indotto sulla ruota quasi raddoppia, portandosi a 2.50 N.

Questi due fattori indicano inequivocabilmente che la struttura vorticoso generata dal DP2 è meno energetica o geometricamente disallineata rispetto a quella ottimale del DP1. Il vortice d'estremità non riesce a deviare in outwash lo strato limite turbolento generato dal rotolamento della ruota, permettendo alla scia nociva di impattare contro le pance laterali e di infiltrarsi al di sotto del fondo piatto.

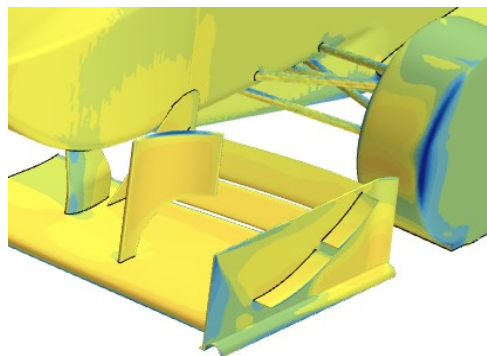


Figura 52 - Dp2

La perdita dell'effetto sigillo si ripercuote macroscopicamente sul rendimento del diffusore e dell'intero corpo vettura: il Lift Totale crolla a -658.00 N (perdendo ben 92 N di down force complessiva), mentre il Drag Totale sale a 199.00 N, penalizzando severamente sia l'efficienza in curva che la velocità nei tratti rettilinei.

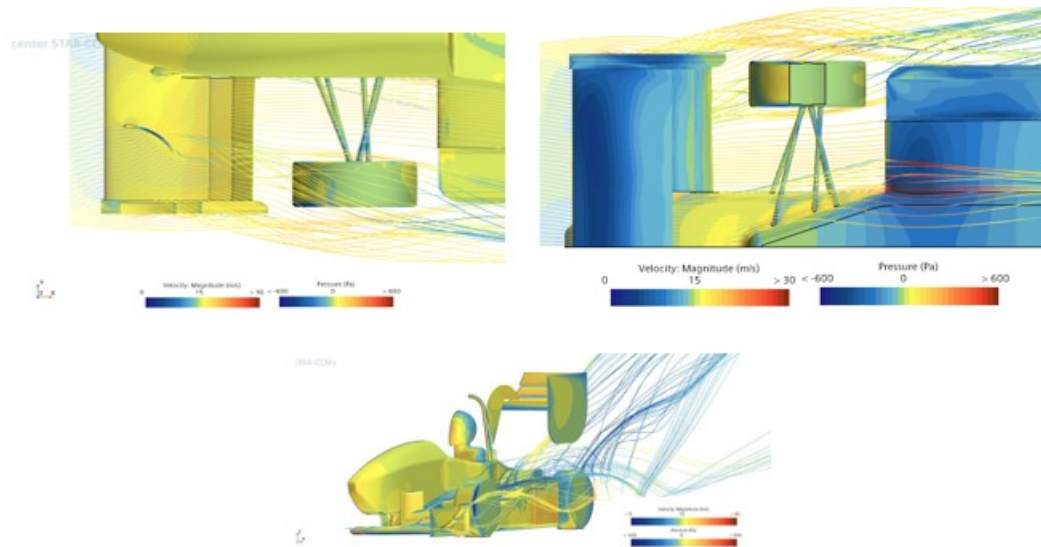


Figura 53 - Scene Stream line Dp2

4.2.6 Dive plane “DP3”

Inserito il Dive Plane 1 (DP1) come solido pilastro di riferimento prestazionale (benchmark dell'avantreno), l'indagine numerica è proseguita testando una seconda variante geometrica denominata Dive Plane 3 (DP3). La modifica sostanziale rispetto alla linea di base consiste nell'introduzione di un secondo dive plane disposto in parallelo al primo sull'endplate, configurando un sistema a doppio canard sovrapposto. L'obiettivo teorico di questa soluzione era raddoppiare la generazione di vorticità locale per incrementare il sigillo pneumatico attorno alle ruote anteriori e al fondo vettura.

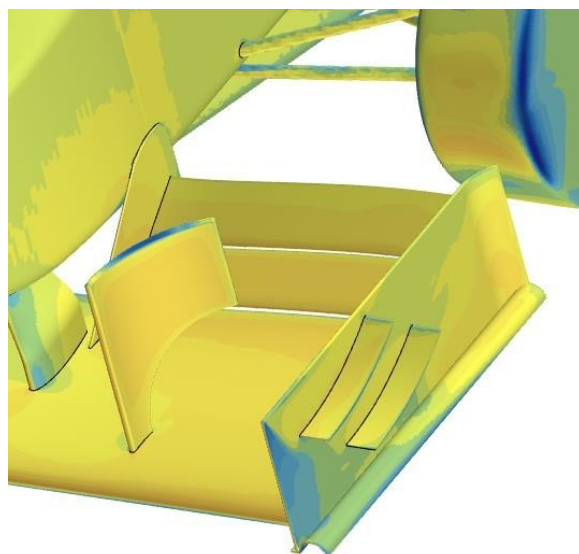


Figura 54 - Dp3

I dati di forza estratti dai report CFD della simulazione con DP3 sono stati normalizzati a vettura completa e messi a confronto diretto con l'architettura a canard singolo nella Tabella 13

Parametro / Componente	Configurazione 1 (Benchmark DP1)	Configurazione 3 (Doppio DP in Parallelo)	Variazione Assoluta ($\Delta DP3-DP1$)
Lift Totale Veicolo	-750.00 N	-658.00 N	+92.00 N (Perdita carico)
Drag Totale Veicolo	188.00 N	199.00 N	+11.00 N (Aumento drag)
Lift Ala Anteriore	-238.90 N	-208.00 N	+30.90 N (Perdita carico)
Drag Ala Anteriore	30.00 N	29.80 N	-0.20 N

Parametro / Componente	Configurazione 1 (Benchmark DP1)	Configurazione 3 (Doppio DP in Parallelo)	Variazione Assoluta ($\Delta DP3-DP1$)
Lift Ruota Anteriore	1.32 N	2.50 N	+1.18 N (Aumento lift parassito)
Drag Ruota Anteriore	1.65 N	2.07 N	+0.42 N (Aumento drag parassito)

Tabella 13 - Confronto Dp1 e Dp3

I risultati numerici evidenziano un comportamento chiaramente peggiorativo della variante a profili paralleli sotto tutti i macro-indicatori aerodinamici, bocciando la soluzione geometrica. Dal punto di vista fisico, l'aggiunta del secondo elemento in parallelo innesca un severo fenomeno di interferenza aerodinamica distruttiva:

1. **Bloccaggio Locale e Perdita di Carico sull'Ala:** La forte vicinanza verticale dei due dive plane paralleli satura il canale di flusso intermedio (effetto strozzamento o slot blockage). L'alta pressione che si genera sul ventre del canard superiore va a impattare direttamente sulla zona di bassa pressione (dorso) del canard inferiore, annullando la circolazione locale e riducendo l'efficacia dell'espansione dei flap adiacenti. Questo bloccaggio aerodinamico sul lato esterno dell'endplate fa flettere il Lift FW dell'ala anteriore da -238.90 N a -208.00 N.
2. **Destabilizzazione e Rottura dei Vortici d'Estremità:** Invece di generare una singola struttura vorticoso coerente e ad alta energia (come in DP1), la configurazione in parallelo genera due vortici d'estremità distinti e molto vicini. Per la legge di Biot-Savart, questi due nuclei vorticosi tendono a interagire mutuamente, entrando in un regime di rotazione reciproca instabile che ne provoca il prematuro vortex bursting (scoppio del vortice) prima di raggiungere lo pneumatico.
3. **Infiltrazione della Scia Ruota e Perdita del Sigillo:** Fallendo l'azione di outwash a causa dello scoppio dei vortici, il DP3 non riesce più a schermare lo pneumatico anteriore scoperto. Di conseguenza, i carichi parassiti sulla ruota aumentano sensibilmente: il drag dello pneumatico sale a 2.07 N e il lift parassito raddoppia quasi, toccando i 2.50 N. La scia turbolenta indotta dal rotolamento della ruota non viene deviata esternamente, ma investe le pance e si infiltra sotto il fondo scocca.

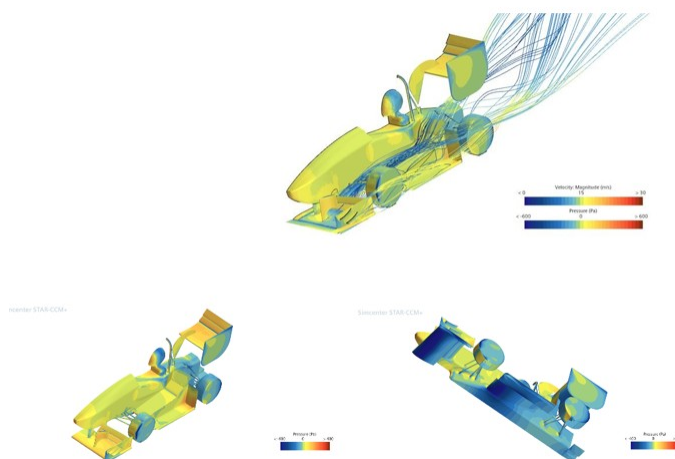


Figura 55 - Scene di pressione e streamline Dp3

Privato dell'effetto minigonna pneumatica, il diffusore perde gran parte della sua capacità estrattiva. Il risultato macroscopico a vettura completa è fallimentare: il Lift Totale crolla a -658.00 N (una perdita netta di 92 N di downforce rispetto al canard singolo), mentre l'espansione incontrollata delle scie incontra una maggiore resistenza all'avanzamento, facendo lievitare il Drag Totale a 199.00 N.

4.2.7 Dive plane “DP4”

Nel tentativo di ottimizzare localmente la distribuzione dei gradienti di pressione e massimizzare l'intensità del vortice di estremità si procede, visti gli scarsi risultati dell'introduzione di un ulteriore dive plane, con l'implementazione di uno specifico aerodinamico curvato applicato direttamente sul DP.

Parametro / Componente	Configurazione 1 (Benchmark DP1)	Configurazione 4 (Evoluzione Profilata DP4)	Variazione Assoluta ($\Delta DP4-DP1$)
Lift Totale Veicolo	-750.00 N	-730.00 N	+20.00 N (Perdita carico)
Drag Totale Veicolo	188.00 N	200.00 N	+12.00 N (Aumento drag)

Parametro / Componente	Configurazione 1 (Benchmark DP1)	Configurazione 4 (Evoluzione Profilata DP4)	Variazione Assoluta ($\Delta DP4-DP1$)
Lift Ala Anteriore	-238.90 N	-214.00 N	+24.90 N (Perdita carico)
Drag Ala Anteriore	30.00 N	30.20 N	+0.20 N
Lift Ruota Anteriore	1.32 N	1.49 N	+0.17 N (Aumento lift parassito)
Drag Ruota Anteriore	1.65 N	2.76 N	+1.11 N (Aumento drag parassito)

Tabella 14 - Confronto Dp1 e Dp4

La configurazione DP4 si attesta come la migliore tra le varianti evolutive finora testate, avvicinandosi sensibilmente ai target macroscopici del veicolo, ma fallisce nel confronto diretto con il benchmark per precise ragioni fluidodinamiche:

1. Interazione con l'Ala Anteriore: L'introduzione del profilo alare sul canard genera un lieve upwash locale che scarica parzialmente l'estremità dei flap dell'ala anteriore. Il Lift FW fa registrare una flessione, passando da -238.90 N a -214.00 N. Tuttavia, a differenza di DP2 e DP3, l'interferenza non è distruttiva: il canale di flusso intermedio viene preservato e il drag dell'ala rimane praticamente invariato a 30.20 N (+0.20 N rispetto a DP1), escludendo fenomeni di bloccaggio aerodinamico macroscopico.
2. Innalzamento del Drag Parassito sullo Pneumatico: Il vero limite della configurazione DP4 risiede nel wake management della ruota scoperta. I dati evidenziano un sensibile innalzamento del Drag della ruota anteriore, che passa da 1.65 N a 2.76 N. Fisicamente, la curvatura impressa sul profilo del DP4 sposta l'asse del vortice d'estremità o ne riduce l'energia di outwash. Questo fa sì che la struttura vorticoso non riesca a "pulire" e deviare l'aria attorno alla spalla interna dello pneumatico, provocando un impatto più diretto del flusso contro il battistrada in rotolamento, traducendosi in un aumento della resistenza parassita della ruota.

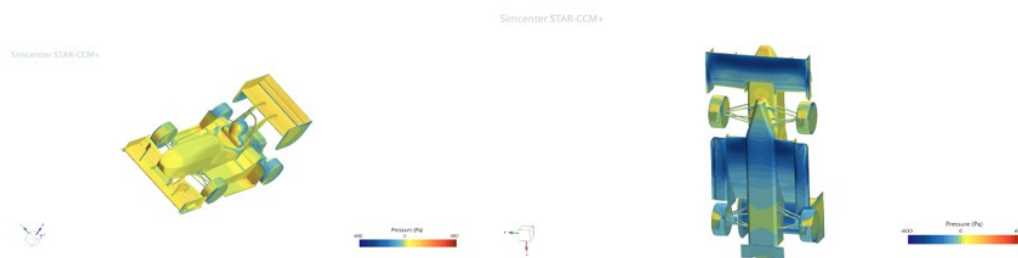


Figura 56 - Scena di pressione Dp4

Ripercussioni sul Bilancio Globale Vettura: La perdita di efficienza nel controllo della scia ruota si ripercuote direttamente sul fondo piatto. Sebbene il vortice continui a esercitare un parziale effetto sigillo (garantendo comunque un ottimo valore di -730.00 N di Lift Totale, di gran lunga superiore ai -658 N del DP2 anche se nettamente inferiori rispetto al DP1 di -750 N), le infiltrazioni turbolente causate dalla scia allargata dello pneumatico frenano l'estrazione d'aria dal diffusore e innalzano il Drag Totale della macchina a 200.00 N.

4.2.8 Dive plane “DP5”

L’iter delle simulazioni si è concluso con lo sviluppo e il collaudo di una quinta e ultima iterazione, denominata Dive Plane 5 (DP5). Questa configurazione si distacca nettamente dalle precedenti, proponendo un concept aerodinamico più spinto e prelevato dal mondo della Formula 1 (Formula 1 “showcar” del 2022): il componente è caratterizzato da una complessa curvatura a "S" che si estende longitudinalmente per quasi l'intera lunghezza dell'endplate. L'obiettivo ambizioso era quello di generare una struttura vorticosa progressiva e altamente energetica, massimizzando il controllo della scia ruota.

I risultati estratti dai monitor di simulazione a vettura completa hanno evidenziato un netto fallimento dell'ipotesi progettuale. I dati sono stati posti in confronto diretto con il Dive plane 1 di riferimento nella Tabella 15

Parametro / Componente	Configurazione 1 (Benchmark DP1)	Configurazione 5 (Geometria a "S" - DP5)	Variazione Assoluta ($\Delta DP5-DP1$)
Lift Totale Veicolo	-750.00 N	-642.00 N	+108.00 N (Perdita carico severa)
Drag Totale Veicolo	188.00 N	196.00 N	+8.00 N (Aumento drag)

Parametro / Componente	Configurazione 1 (Benchmark DP1)	Configurazione 5 (Geometria a "S" - DP5)	Variazione Assoluta (ADP5-DP1)
Lift Ala Anteriore	-238.90 N	-202.00 N	+36.90 N (Perdita carico)
Drag Ala Anteriore	30.00 N	29.40 N	-0.60 N
Lift Ruota Anteriore	1.32 N	1.65 N	+0.33 N (Aumento lift parassito)
Drag Ruota Anteriore	1.65 N	2.91 N	+1.26 N (Aumento drag parassito severo)

Tabella 15 - Confronto Dp1 e Dp5

L'implementazione della geometria a "S" estesa su tutta la corda dell'endplate si è rivelata aerodinamicamente distruttiva, penalizzando il campo di moto dell'intera monoposto per due ragioni fondamentali:

1. Soffocamento dell'Ala Anteriore: L'eccessivo ingombro longitudinale del DP5 altera pesantemente il gradiente di pressione lungo l'intero endplate. Questo genera un forte upwash locale che "scarica" i flap dell'ala anteriore su tutta la loro sezione esterna. Il risultato è un crollo verticale del Lift FW, che scende a -202.00 N (perdendo quasi 37 N di deportanza locale rispetto al DP1). Il marginale guadagno in resistenza dell'ala (-0.60 N) è una diretta, e per nulla vantaggiosa, conseguenza del suo mancato funzionamento.
2. Destabilizzazione della Scia Ruota (Tire Wake): Invece di convogliare il flusso in un singolo vortice compatto ed energetico, la lunga geometria a "S" disperde l'energia generando una struttura turbolenta disordinata. Fallendo l'effetto di outwash, il flusso investe in pieno lo pneumatico: il Drag della ruota anteriore subisce un'impennata disastrosa portandosi a 2.91 N (il valore peggiore registrato in tutta la campagna di test).

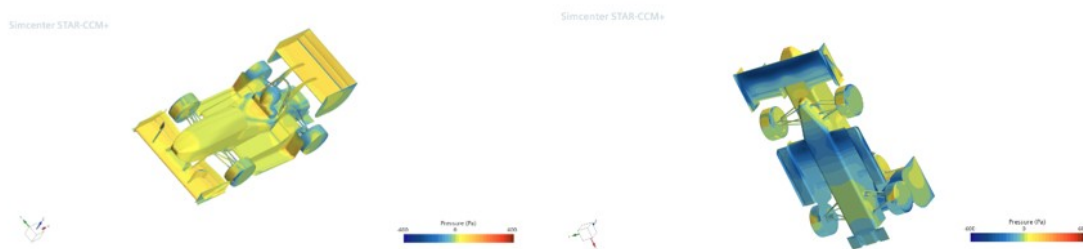


Figura 57 - Scene di pressione Dp5

L'incapacità di deviare la scia dello pneumatico condanna l'efficienza globale della vettura. La turbolenza ("aria sporca") viene inevitabilmente aspirata al di sotto del fondo piatto, distruggendo il sigillo pneumatico ai lati delle pance. Questo si traduce macroscopicamente in una drammatica perdita di estrazione dal diffusore: il Lift Totale crolla a -642.00 N (perdendo oltre 100 N di downforce utile rispetto al DP1) e il Drag Totale sale a 196.00 N.

4.3 supporti

I supporti dell'ala anteriore rappresentano un componente critico di giunzione aeromeccanica, in quanto deputati al trasferimento dei carichi verticali e longitudinali generati dal pacchetto alare direttamente verso il telaio della monoposto. Nelle precedenti iterazioni del veicolo, in particolare sulla configurazione P4 (precedente versione a combustione interna), il vincolo strutturale era affidato a un sistema basato su tiranti e puntoni metallici esterni. Sebbene tale architettura garantisse una massa contenuta pari a 0.9 kg, l'impatto fluidodinamico risultava fortemente penalizzante. I corpi cilindrici dei tiranti, investiti dal flusso ad alta velocità, operavano in regime di puro stallo aerodinamico, generando massicci distacchi di vena fluidodinamica e vistose strutture vorticosi tridimensionali (scia turbolenta). Questa vorticità parassita investiva disordinatamente i flap dell'ala anteriore e il musetto, degradando l'efficienza complessiva dell'avantreno.

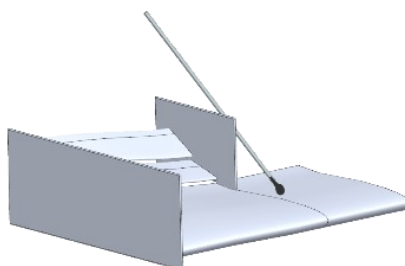


Figura 58 - Supporto P4

Al fine di sanare la generazione di vortici e ripulire il campo di moto a valle, un primo prototipo ha visto la totale transizione verso una filosofia a lamina piatta in fibra di carbonio. Questa soluzione ha rimpiazzato i tiranti con una piastra piana longitudinale tesa a guidare il flusso riducendo le turbolenze. Tuttavia, a causa delle severe restrizioni geometriche e della necessità di mantenere un elevato spessore per garantire la rigidità flessionale ed evitare fenomeni di instabilità, questo prototipo ha fatto registrare un drastico aumento di peso, portando la massa complessiva del componente al valore di 1.5 kg.

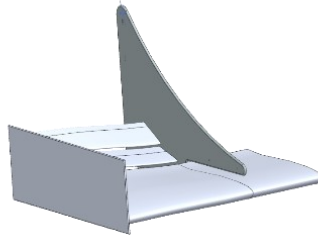


Figura 59 - Supporto versione lamina piatta

Il superamento del trade-off tra efficienza aerodinamica e rigidità strutturale è stato ottenuto attraverso uno studio sistematico volto a coniugare i pregi delle due configurazioni precedenti, eliminandone i rispettivi limiti. La geometria definitiva è caratterizzata da una forma profilata e armonica, espressamente concepita per minimizzare la resistenza di forma e l'intensità dei vortici di scia. Dal punto di vista strutturale, l'integrazione di una sezione alare simmetrica e rastremata consente di ridistribuire le tensioni interne in modo uniforme lungo l'asse principale del supporto. Questa ottimizzazione geometrica ha permesso di implementare un piano di laminazione avanzato in fibra di carbonio ad alto modulo, calibrando l'orientamento delle fibre per resistere ai carichi combinati di flessione e torsione indotti dalla downforce. Il risultato combinato di forma e materiale ha permesso di abbattere drasticamente la massa del componente, raggiungendo un target finale di soli 0.6 kg (pari a una riduzione del -33.3% rispetto alla P4 e del -60% rispetto alla lamina piatta sperimentale).

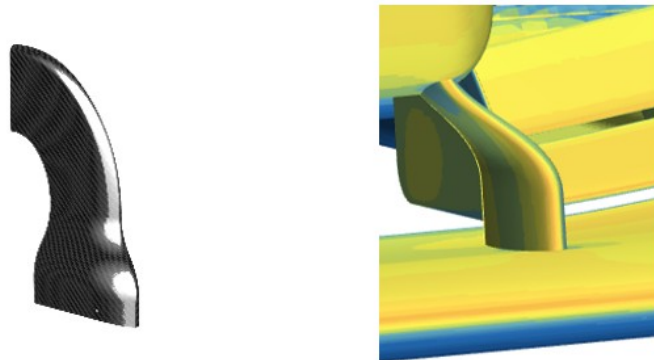


Figura 60 - Supporto laminato con profilo

Come evidenziato dalle simulazioni numeriche, la transizione geometrica dolce del supporto accompagna la vena fluida senza generare distacchi o gradienti di pressione avversi. Le strutture vorticosi, che nella configurazione P4 cannibalizzavano il flusso d'aria destinato al raffreddamento e al sottoscocca, risultano qui quasi completamente evaporate. Il flusso scorre teso e aderente alle pareti del supporto, ottimizzando l'alimentazione fluidodinamica dei flap alari adiacenti e minimizzando la resistenza all'avanzamento parassita (drag di forma) del componente. Parallelamente all'indagine aerodinamica, il componente è stato sottoposto a una rigorosa campagna di validazione strutturale tramite il metodo degli elementi finiti (FEM) per garantirne l'integrità strutturale sotto i massimi carichi aerodinamici e inerziali attesi in pista. I risultati dell'analisi FEM confermano l'eccellente comportamento meccanico della struttura in composito:

- **Distribuzione degli Sforzi:** La mappa delle tensioni (espressa secondo il criterio di Von Mises / Tsai-Hill per i compositi) mostra che le sollecitazioni si concentrano in modo sicuro e controllato in prossimità dei punti di ancoraggio al telaio e al main-plane dell'ala, rimanendo ampiamente al di sotto dei limiti di snervamento e rottura del materiale.
- **Rigidezza e Deformazione:** Il profilo alare armonico fornisce intrinsecamente un elevato momento d'inerzia sezionale che contrasta efficacemente la flessione laterale e l'instabilità torsionale. Gli spostamenti massimi registrati sotto carico limite risultano millimetrici, assicurando che l'ala anteriore mantenga la corretta incidenza geometrica e l'altezza da terra nominale (*ride height*) anche in condizioni di massimo carico aerodinamico alle alte velocità.
- **Ottimizzazione del Peso:** La conformità strutturale verificata via FEM certifica che la riduzione di massa a 0.6 kg non ha introdotto zone dove si hanno contrazioni di tensioni per il dimensionamento (sotto-dimensionamento strutturale), validando formalmente la laminazione e l'architettura finale del componente.

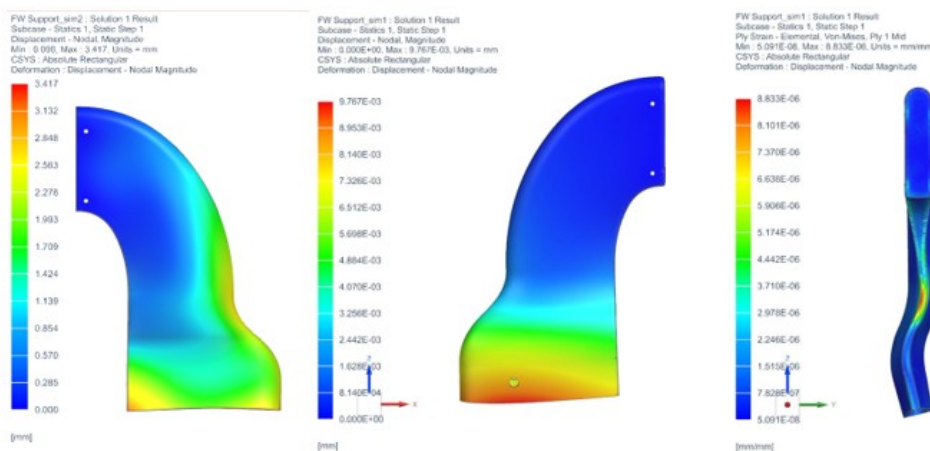


Figura 61- Analisi FEM supporto

4.4 regolazioni flap

Una volta deliberato il pacchetto aerodinamico definitivo per ala anteriore composto dal deviatore verticale Turn 1 e il canard Dive Plane 1 (DP1) l'indagine si è orientata verso la flessibilità operativa della monoposto nelle diverse prove dinamiche che caratterizzano l'evento Formula Sae. In particolare, configurazioni specifiche come la prova di Acceleration (rettilineo puro di 75 metri) richiedono la massima minimizzazione della resistenza all'avanzamento complessiva (Drag Totale), accettando come compromesso un drastico abbattimento del carico verticale (Lift), superfluo in assenza di accelerazioni trasversali che sono caratteristiche di una situazione in curva. Per ottenere questo setup low-drag senza stravolgere la rigidità strutturale del pacchetto aerodinamico, si è analizzata la variazione dell'angolo d'attacco (Angle of Attack - AoA) dei flap superiori. L'obiettivo della simulazione è valutare l'impatto fluidodinamico di differenti filosofie di regolazione cinematica, focalizzando l'attenzione sull'interazione tridimensionale tra la scia in uscita dai flap e l'efficienza dello scudo aerodinamico (tire wake management) precedentemente ottimizzato.

Per ottenere questo setup low-drag, la campagna di ottimizzazione CFD ha previsto la riduzione dell'angolo d'attacco (Angle of Attack - AoA) dei flap superiori fino a 0° . Sono state analizzate e messe a confronto diretto due differenti filosofie di regolazione cinematica:

1. Soluzione 1 (Flap Tutto Unito): Rotazione rigida e uniforme dell'intero corpo dei flap superiori lungo tutta l'apertura alare, riducendo l'incidenza a 0° anche nella zona antistante lo pneumatico.
2. Soluzione 2 (Flap Parziale - Esterno Fisso): Regolazione a geometria condizionata, in cui la porzione interna (inboard) del flap viene appiattita a 0° , mentre la sezione esterna (outboard, direttamente davanti alla ruota) viene mantenuta fissa all'incidenza nominale di massimo carico per preservare l'effetto scudo.

Esaminando il comparto ruota isolato, la Soluzione 2 (Flap Esterno Fisso) conferma la bontà della sua intuizione geometrica originaria: mantenendo il flap esterno inclinato a protezione dello pneumatico, si genera un corretto upwash locale che riduce il drag della ruota anteriore 2.15N a 1.65 N (-0.50 N di resistenza parassita sul battistrada). Di contro, la scia più pulita riduce anche il lift parassito della ruota stessa, che scende a 1.32 N.

Tuttavia, questo beneficio locale viene interamente vanificato sul piano globale dall'efficienza intrinseca del corpo alare. Nella Soluzione 2, il mantenimento della porzione esterna ad alta incidenza penalizza severamente l'ala anteriore in termini di resistenza indotta e di forma: il Drag FW sale infatti a 11.21 N (rispetto ai soli 9.35 N della Soluzione 1). L'ala, inoltre, continua a generare un elevato carico verticale locale (-68.43 N contro -52.41 N), che in una prova di puro rettilineo si traduce in un inutile costo energetico indotto.

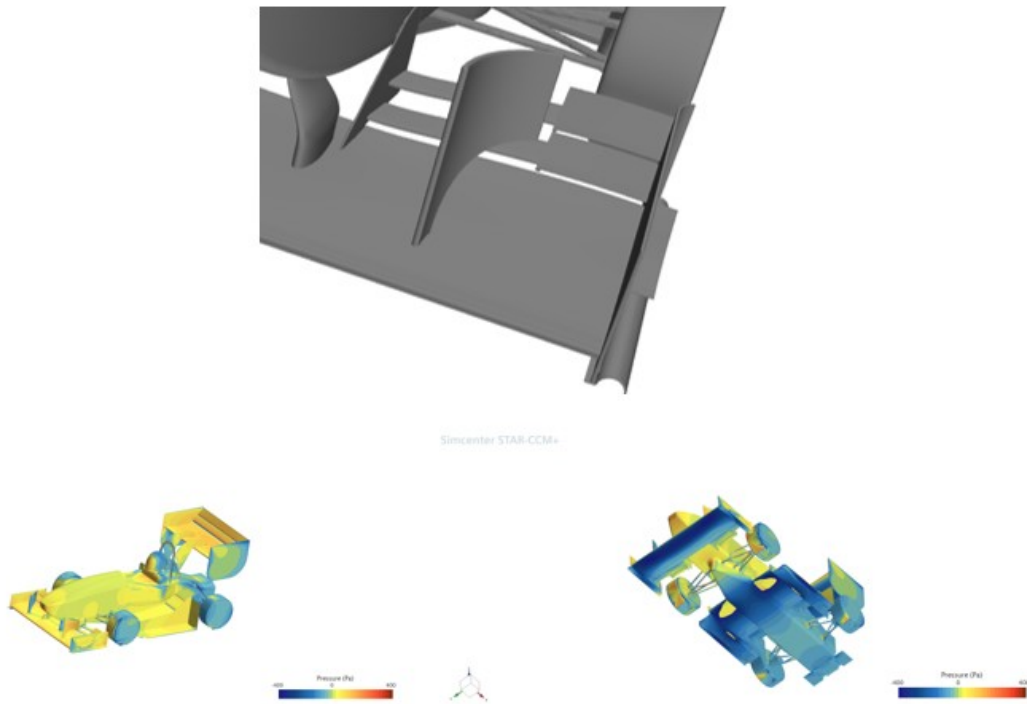


Figura 62 - Regolazione Soluzione 2

La Soluzione 1 (Flap Tutto Unito), al contrario, accettando un leggero incremento del drag sulla ruota anteriore (+0.50 N), permette all'intero profilo alare di lavorare in condizioni di minima resistenza di forma. L'appiattimento totale dei flap abbatte drasticamente sia il drag locale dell'ala (9.35 N) sia il carico verticale globale del veicolo, che si attesta a un valore marcatamente low-downforce di -233.15 N. Il bilancio complessivo finale pende inequivocabilmente a favore del Flap Tutto Unito: il Drag Totale della vettura scende a soli 88.46 N, contro i 91.24 N della soluzione a flap parziale.

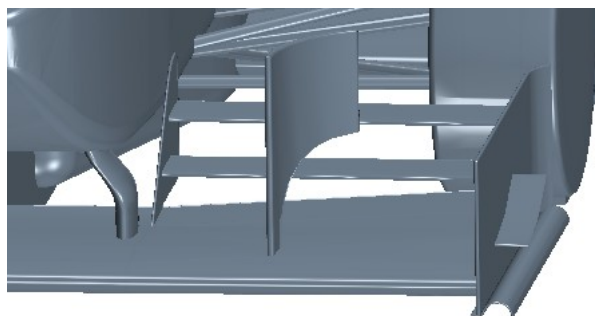


Figura 63 - Regolazione Soluzione 1

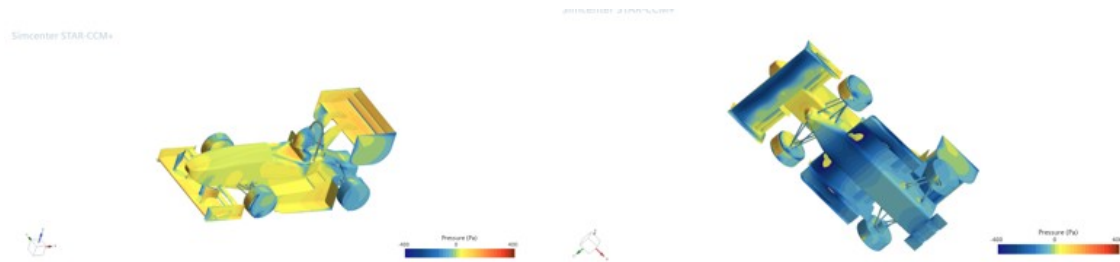


Figura 64 - Analisi di pressione Regolazione Soluzione 1

Per configurare l'assetto ideale in prove dinamiche dove la resistenza aerodinamica è il fattore limitante primario e la deportanza è irrilevante.

La configurazione a Flap Tutto Unito (Soluzione 1) garantisce un risparmio netto di ben 2.78 N sul Drag Totale del veicolo rispetto alla Soluzione 2, configurandosi come l'assetto ottimale ad alta penetrazione avanzata. Pertanto, la strategia di regolazione deliberata per l'evento di Acceleration prevede la rotazione sincrona e totale dei flap nella loro interezza fino al target di $AoA = 0^\circ$, ottimizzando l'efficienza energetica e massimizzando la velocità di punta della monoposto in rettilineo. La soluzione 1 rispetto alla configurazione definitiva della vettura dimostra una notevole riduzione della vettura totale che passa da 180N a 100N.

Capitolo 5: conclusioni e futuri aggiornamenti

A conclusione della campagna di simulazioni svolta per implementare le prestazioni aerodinamiche, che era stato posto come obiettivo primario dell'indagine, impostato sin dalle analisi geometriche preliminari era massimizzare l'efficienza globale della monoposto attraverso un accurato controllo di scia degli pneumatici anteriori scoperto e un condizionamento energetico del flusso diretto sul fondo. L'integrazione sinergica dei tre macro-elementi analizzati ha portato alle seguenti conclusioni e scelte di delibera:

Il primo step progettuale è costituito dal turning vane, il cui posizionamento strategico sulla porzione superiore dell'endplate funge da deviatore di flusso avanzato ad alto rendimento. Questa appendice ha il compito cruciale di intercettare le vene fluide superiori ad alta energia e defletterle precocemente verso l'esterno prima che impattino contro la parte alta del battistrada in rotolamento; riducendo la pressione parassita davanti alla ruota, il turning vane impedisce alla scia turbolenta dello pneumatico (tire wake) di allargarsi verso il centro vettura o di essere aspirata al di sotto del fondo scocca, preservando l'alimentazione pulita dei canali Venturi. Integrato in seguito, a lavorare in perfetta combinazione cinematica, interviene il dive plane, la cui campagna di ottimizzazione condotta su cinque differenti iterazioni ha dimostrato come la stabilità del vortice d'estremità risenta drasticamente di minime variazioni geometriche, incoronando il Dive Plane 1 (DP1) come l'unica soluzione idonea e decretandone la selezione. La configurazione con il Turn 1 e il DP1 genera -750.00 N di deportanza complessiva e un drag veicolo contenuto in 188.00 N, questa configurazione si è dimostrata l'unica capace di generare un vortice di outwash stabile ed energetico, senza generare fenomeni di bloccaggio aerodinamico locale tipici delle altre configurazioni studiate, che hanno fatto registrare crolli di Lift Totale l'incremento di resistenza sull'intera vettura. L'efficacia fluidodinamica di queste appendici va abbinata alla rigidità dei supporti e alla scarsa scia da essa generati e alla possibile regolazione per ottimizzarne le prestazioni nelle diverse prove di gara. In conclusione, dalla configurazione di partenza posta all'inizio del capitolo 4 (figura 30) siamo giunti alla seguente configurazione (figura 65)

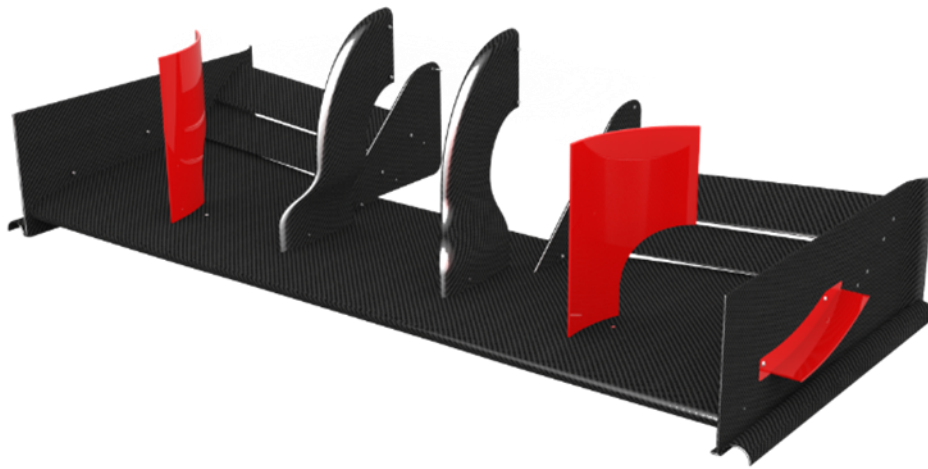


Figura 65 - Configurazione Ala anteriore Finale

Lift	Drag	Efficiency
-238.9 N	30N	7.95

Tabella 16 - valori ala anteriore finale

5.1 futuri aggiornamenti

Per la conclusione di questo studio come futuri aggiornamenti, stata condotta un'indagine preliminare per individuare i successivi sviluppi per incrementare ulteriormente le prestazioni della vettura. L'attenzione si è focalizzata sulla zona immediatamente a valle dei flap dell'ala anteriore, nello specifico sull'interazione fluidodinamica tra i flussi in uscita dall'ala e gli elementi strutturali della sospensione anteriore. Come soluzione macroscopica per gli aggiornamenti futuri del pacchetto, si prevede l'introduzione di cover aerodinamiche integrate sui braccetti della sospensione. I braccetti della sospensione a sezione cilindrica nativa rappresentano un forte elemento di disturbo: investiti dal flusso ad alta velocità, generano una scia staccata ad alto contenuto turbolento che impatta negativamente sul retrotreno. L'implementazione di profili di carenatura a corda allungata persegue un duplice obiettivo:

1. **Massimizzazione dell'Estrazione dai Flap dell'Ala Anteriore:** La presenza di una cover profilata con un opportuno angolo di calettamento (AoA) crea un gradiente di

pressione favorevole subito dietro l'ala anteriore. Questo effetto di "aspirazione" riduce la contropressione sul dorso dei flap superiori, migliorandone significativamente l'estrazione e incrementando localmente il Lift FW senza richiedere aumenti d'incidenza dell'ala stessa.

2. **Condizionamento e Pulizia del Flusso per le Groundwing:** Gli elementi strutturali non schermati distruggono l'energia cinetica del flusso diretto verso il fondo scocca. La carenatura ha il compito di orientare e "ripulire" la vena fluida in transito, raddrizzandola e indirizzandola con precisione verso l'imboccatura dei canali Venturi e delle groundwing (le paratie d'ingresso del fondo). Un flusso più laminare e coerente in questa zona incrementa l'efficienza estrattiva di tutto il sottoscocca.

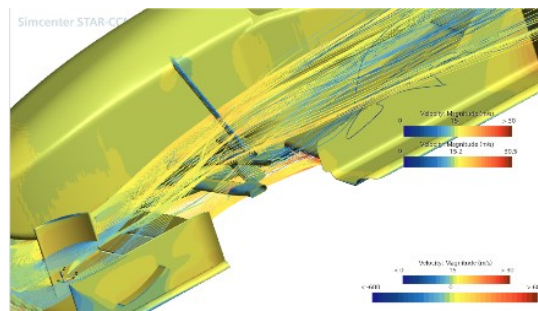


Tabella 17 - Streamline cover braccetti

La prima simulazione esplorativa condotta sul modello (Figura 4.T) conferma la validità fisica del concept. Le visualizzazioni fluidodinamiche mostrano una prima sensibile pulizia dei flussi nella zona di transizione tra l'avantreno e il canale centrale, associata a una riduzione della scia d'impatto originariamente generata dai triangoli della sospensione. Sebbene i dati numerici globali richiedano una successiva campagna di delibera e un approfondimento di dettaglio (andando a ottimizzare la corda, lo svergolo geometrico e il profilo asimmetrico delle cover in funzione del rollio e dello sterzo), la soluzione si prospetta come il canale di sviluppo più promettente per innalzare ulteriormente l'efficienza globale ($E = \frac{L}{D}$) della monoposto nelle prossime sessioni di evoluzione del design.

Bibliografia

- [1] Cicchini Alessandro (2020/2021), L'aerodinamica di una vettura formula SAE a trazione elettrica, Tesi triennale in Ingegneria Meccanica presso il Dipartimento d'Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'UNIVPM.
- [2] Trisciani Alessio (2020/2021), Studio sulla funzione aerodinamica delle sospensioni di una vettura di Formula Sae, Tesi triennale in Ingegneria Meccanica presso il Dipartimento d'Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'UNIVPM.
- [3] Petricca Mattia (2022/2023), Miglioramento delle prestazioni dell'ala anteriore di una vettura di Formula SAE, Tesi triennale in Ingegneria Meccanica presso il Dipartimento d'Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'UNIVPM.
- [4] Antonelli Riccardo (2024/2025), Analisi numerica di superfici aerodinamiche a generazione di vortici per autovettura di formula SAE, Tesi triennale in Ingegneria Meccanica presso il Dipartimento d'Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'UNIVPM.
- [5] Regolamento Formula SAE 2026 V.1.1, reperibile al sito <https://www.formulastudent.de/fsg/rules>
- [6] Katz, J. (2016). *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*. Bentley Publishers.
→ Race Car Aerodynamic
- [7] McBeath, S. (2011). *Competition Car Aerodynamics*. Haynes Publishing.
→ Competition Car Aerodynamics
- [8] Hucho, W. H. (2013). *Aerodynamics of Road Vehicles*. SAE International.
→ Aerodynamics of Road Vehicles
- [9] Hucho, W. H. (1998). *Road Vehicle Aerodynamic Design*. SAE International.
→ Road Vehicle Aerodynamic Design
- [10] Studi tecnici pubblicati da SAE International sull'aerodinamica dei veicoli.
- [11] <https://www.aerospacecue.it/2018/07/14/equazioni-navier-stokes-perche-cosi-complesse/>
- [12] <https://www.polimarcheracingteam.com/it/>
- [13] <https://www.moje-auto.pl/it/blog/suggerimenti/aerodinamica-delle-auto-sportive/#:~:text=di%20auto%20sportive-,Aerodinamica%20delle%20auto%20sportive%20nella%20storia,molte%20soluzioni%20ancora%20oggi%20utilizzate>
- [14] <https://www.autotecnica.org/aerodinamica-dei-veicoli-terrestri-prima-parte/>