



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria meccanica

**Influenza degli angoli di rollio e beccheggio
sull'aerodinamica di una vettura di formula
sae**

**Influence of roll and pitch angles on the
aerodynamics of a formula sae car**

Relatore:

Prof. Andrea Crivellini

Tesi di Laurea di:

Lorenzo Muselli

A.A. 2020/2021

“Non si può descrivere la passione, la si può solo vivere”

Enzo Ferrari

Alla mia famiglia.

INDICE

1. INTRODUZIONE	6
2. LA FORMULA SAE	8
2.1 L' EVENTO	9
3. IL POLIMARCHE RACING TEAM	14
3.1 REGOLAMENTO FORMULA SAE.....	15
4. IL CONCETTO DI AERODINAMICA NELLE VETTURE DA CORSA....	16
4.1 FLUSSI ATTACCATI E FLUSSI SEPARATI	17
4.2 DISTRIBUZIONE DI VELOCITA'	18
4.3 FLUSSO LAMINARE E TURBOLENTO	19
4.4 PROPRIETA' DEI FLUIDI	20
4.5 LO STRATO LIMITE.....	22
4.6 EQUAZIONE DI BERNOULLI	25
4.7 LA SCIA DI UN VEICOLO	27
4.8 FORZE E COEFFICIENTI AERODINAMICI	28
5. CENNI DI DINAMICA DEL VEICOLO	35
6. PACCHETTI AERODINAMICI	40
6.1 IL FONDO.....	40
6.2 LE ALI.....	42
7. IMPOSTAZIONE ANALASI FLUIDODINAMICA “CFD”	48
7.1 DOMINIO DI CALCOLO	51
7.2 SUDDIVISIONE DELLA VETTURA	52
7.3 SURFACE WRAPPER	56
7.4 MESH VOLUMETRICA	58
7.5 CONDIZIONI AL CONTORNO	62
7.6 FISICA DELLA SIMULAZIONE	63
8. VISUALIZZAIONE RISULTATI SIMULAZIONE	66

8.1	ANALISI CONVERGENZA	66
8.2	VALORI SIMULAZIONE AUTO IN ASSETTO STANDARD	69
9.	MODIFICA ANGOLI DI ROLLIO E BECCHEGGIO DELLA VETTURA	74
9.1	RISULTATI SIMULAZIONE ACCELERAZIONE	76
9.2	RISULTATI SIMULAZIONE FRENATA.....	80
9.3	RISULTATI SIMULAZIONE SKID-PAD.....	84
10.	CONFRONTO RISULTATI	89
11.	CONCLUSIONI	92
	BIBLIOGRAFIA.....	93
	SITOGRAFIA.....	94
	RINGRAZIAMENTI.....	95

1. INTRODUZIONE

Negli autoveicoli, le forze che si generano in frenata, accelerazione e in curva sono generate dalla zona di contatto che si instaura tra gli pneumatici e l'asfalto. Questi carichi sono fortemente influenzati dalle componenti verticali delle forze applicate sulle ruote e sono limitati da un valore massimo del coefficiente d' attrito.

Per incrementare l'entità della forza normale che agisce sugli pneumatici, quindi aumentare la forza d' attrito riducendo il rischio di slittamento, si ricorre all' utilizzo di appendici aerodinamiche che permettono di ottenere questi risultati, senza incrementare in modo significativo il peso del veicolo.

Questi tipi di accorgimenti vengono utilizzati maggiormente per le vetture da competizione dove l'obiettivo principale è diminuire il tempo sul giro. Mentre le auto stradali hanno come scopi principali la riduzione dei consumi ed il comfort dei passeggeri.



Figura 1.1: Foto vettura P4 Evoluzione Polimarche Racing Team (FSAE).

Nelle competizioni di Formula SAE, l'obiettivo è quello di riuscire a massimizzare i carichi aerodinamici progettando superfici alari più ampie possibili (Figura 1.1), poiché si è limitati a velocità che si aggirano intorno ai 100 km/h, per motivi di sicurezza, a causa del layout della maggior parte dei circuiti sui quali vengono disputati gli eventi dinamici.

Sono stato un membro del reparto di aerodinamica del Polimarche Racing Team per due anni, questo percorso trasversale al corso di studi di Ingegneria Meccanica, mi ha permesso di avere un riscontro pratico delle nozioni teoriche acquisite e mi ha insegnato a lavorare armoniosamente in team, per questo ho deciso di orientare la seguente tesi di laurea su un argomento interno alla nostra squadra.

Questa tesi nasce dall'idea di cercare di colmare una mancanza di comunicazione tra il reparto di aerodinamica e di dinamica del veicolo, che ci è stata fatta notare dai giudici nell'ultima competizione di Formula Student East, in Ungheria. L'obiettivo è quello di analizzare il comportamento dell'aerodinamica, della nostra vettura di formula SAE "P4 Evoluzione", nelle condizioni di rollio e beccheggio più gravose alle quali è sottoposta, tramite l'utilizzo del software di fluidodinamica computazionale a disposizione del team "STAR CCM+".

2. LA FORMULA SAE

La Formula SAE è una competizione tra studenti universitari che hanno come obiettivo quello di progettare e realizzare una monoposto da corsa, la quale poi potrà partecipare agli eventi facenti parte del campionato internazionale di Formula SAE organizzato dalla Society of Automotive Engineers. Ad oggi la SAE conta più di quindici eventi in tutto il mondo (Figura 2.1), organizzati in collaborazione con le associazioni nazionali di ingegneri e tecnici dell'automobile.



Figura 2.1: Foto panoramica di tutti i team partecipanti a FS East 2021.

L'idea posta alla base della Formula SAE è che un'azienda fittizia ingaggi il team affinché realizzi un prototipo di auto da corsa da realizzare in piccola serie e con determinate caratteristiche, che occupi il segmento di mercato dedicato a piloti non professionisti, definiti come "weekend autocross racers". Il prototipo quindi, oltre ad essere prestazionale, deve essere affidabile, confortevole e soprattutto avere un costo contenuto, atto alla produzione in serie. È compito degli studenti progettare, costruire, testare, valutare economicamente e promuovere il prototipo. Questo lavoro viene valutato nelle gare in diverse tipologie di prove, sia statiche che dinamiche. L'obiettivo dell'ente è quello di fornire agli studenti un'esperienza concreta nel mondo dell'automotive, in

modo da farli confrontare con il concetto di team work, con le scadenze e con il mondo dell'industria in generale.

2.1 L' EVENTO

Prima di poter partecipare alle prove guidate le vetture vengono sottoposte ad una serie di verifiche ed ispezioni, note comunemente come "techs", da parte dei giudici, che ne verificano la conformità al regolamento, soprattutto per quanto concerne le norme preposte a garantire l'incolumità del pilota. A seguito del superamento dell'ispezione avviene il rifornimento della vettura, che viene successivamente posizionata sulla "tilt table", una piattaforma in grado di inclinare il prototipo su entrambi i lati fino ad un angolo di 60 gradi, al fine di certificare che non vi sia perdita di liquidi (Figura 2.2).



Figura 2.2: Foto P4 Evoluzione al tilt test.

Eseguita la prova di tilt, la vettura viene sottoposta alla prova di "noise", nella quale i giudici accertano che il motore, girando a diversi regimi, non superi i 110 dB di rumore. L'ultima delle prove pre-gara è il test di frenata, in cui la macchina deve essere in grado,

dopo una lunga accelerazione, di bloccare contemporaneamente tutte e quattro le ruote senza arrivare allo spegnimento del motore. Superate le verifiche preliminari, si può accedere alle prove vere e proprie dell'evento, le quali iniziano con delle prove statiche:

- **Cost analysis:** L'obiettivo dell'analisi dei costi è quello di insegnare ai partecipanti quanto il costo in relazione al budget disponibile sia fattore imprescindibile, cui è fondamentale tenere conto in una progettazione ingegneristica. La prova è suddivisa in due parti: la compilazione di un report scritto (che deve essere inviato ai giudici prima della competizione) e una discussione durante l'evento stesso. Questo consente di valutare non soltanto il costo del prototipo, ma anche l'abilità del team di produrre una stima accurata dei costi di produzione e progettazione.
- **Business plan presentation:** Questa presentazione è finalizzata a valutare l'abilità del team nello sviluppare e consegnare un ampio ed esaustivo business case. L'evento è giudicato da persone provenienti dal mondo dell'automobile, pertanto il team deve ipotizzare di confrontarsi non soltanto con ingegneri, ma con un esecutivo rappresentate le varie aree di una società, inclusi manager di produzione, marketing e finanza. La valutazione è focalizzata al contenuto, all'organizzazione e all'illustrazione del progetto, nonché all'abilità nel rispondere alle domande dei giudici.
- **Engineering Design:** Il concetto alla base dell'evento è quello di valutare le scelte e gli sforzi progettuali e come essi incontrino le esigenze di mercato. Questi aspetti vengono valutati dai giudici in unione alla capacità del team di rispondere ai quesiti posti e all'ispezione della macchina, la quale deve essere presentata totalmente assemblata e pronta a gareggiare.

Finite le prove statiche, si procede con le prove dinamiche:

- **Acceleration:** Durante il test di accelerazione la vettura deve accelerare per 75 metri lungo un percorso rettilineo su superficie piana. La prova è divisa in due batterie, che devono essere corse da due differenti piloti, ognuno dei quali ha a disposizione due tentativi. Il punteggio è determinato dalla differenza tra il peggiore e il migliore tempo assoluti fatti registrare, tenendo presente che il tempo più alto preso in considerazione dai giudici non deve superare i 5.8 secondi, pari ad una velocità media di 46.55 km/h.

- Skid-pad: La prova valuta la capacità in curva della vettura. Il tracciato richiama la figura di un 8 con due cerchi di 15.25 metri, al cui centro è posta la linea di partenza/arrivo e delimitati da sedici coni nel lato esterno e sedici lungo il lato interno di ciascun cerchio (Figura 2.3).

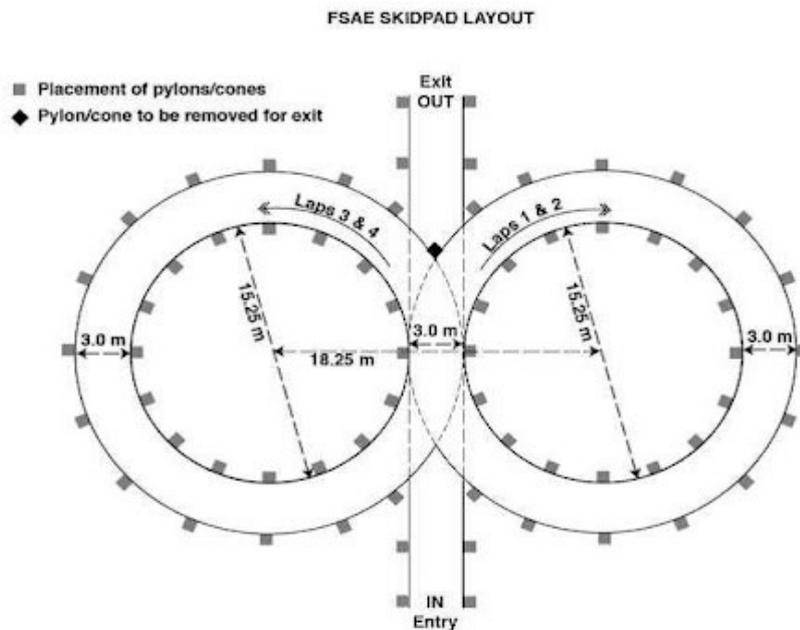


Figura 2.3: Tracciato della prova di skid-pad.

La vettura, una volta entrata nel percorso, deve compiere un giro del cerchio destro, per stabilire il senso di marcia, al termine del quale deve compierne un secondo, il quale viene cronometrato dai giudici. Terminato il secondo giro, la vettura deve spostarsi nel cerchio sinistro per effettuare due ulteriori giri, il secondo dei quali viene cronometrato. Ultimato il quarto giro, la macchina lascia il tracciato, nella stessa direzione da cui è entrata. La prova è divisa in due batterie, che devono essere corse da due differenti piloti, ognuno dei quali ha a disposizione due tentavi. Il punteggio è determinato sulla capacità di accelerazione laterale.

- Autocross: è una prova di sprint da eseguire su due giri di circuito per valutare la maneggevolezza della vettura. Il circuito è disegnato in modo da ottenere velocità medie

comprese tra i 30 ed i 40 km/h e comprende brevi rettilinei (non più di 60 metri), curve a raggio costante (da 23 a 45 metri di diametro), tornanti (9 m di diametro esterno minimo), slaloms (coni a distanza compresa tra 25 e 40 m), chicanes e curve a raggio variabile. Per il punteggio vale il miglior tempo su due prove effettuate da piloti diversi.

- **Endurance and fuel economy:** La prova di endurance è l'evento che chiude il week end di gare e mira a valutare le performance complessive del prototipo. Si svolge lungo un tracciato molto simili a quello in cui si corre la prova di autocross, per un totale di 22 km. Ai componenti del team non è permesso di intervenire sul veicolo durante lo svolgimento della prova, mentre è previsto un cambio di pilota a metà prova, durante un periodo di sosta di tre minuti. L'ordine di partenza viene stilato in base ai risultati dell'autocross, con il team più veloce primo a scendere in pista, seguito dal secondo e così via, scorrendo la classifica. Il tempo complessivo dell'endurance è dato dalla somma dei tempi di ciascun pilota, cui vanno a sommarsi le eventuali penalità, comparato con quello del team più rapido in pista. Nello stesso contesto dell'endurance viene stilata una classifica, e conseguentemente assegnati dei punti, per la fuel economy. Il risparmio di carburante rappresenta un aspetto fondamentale in molte forme di competizione motosportiva, oltre a mostrare quanto efficacemente sia stata preparata la vettura. Durante l'endurance non è consentito per questo alcun rifornimento di carburante. Il punteggio è basato sul conteggio della media di litri di carburante per chilometro durante la prova di endurance.

La suddivisione del punteggio è ripartita come di seguente illustrato.

Eventi statici:

- Presentazione del business plan
(75pt)

- Engineering Design
(150pt)
- Cost analysis
(100pt)

Eventi dinamici:

- Acceleration
(75pt)
- Skid-pad
(50pt)
- Autocross
(150pt)
- Fuel economy
(100pt)
- Endurance
(300pt)

Per un totale di 1000pt.

3. IL POLIMARCHE RACING TEAM

L'Università Politecnica delle Marche è presente nella competizione di Formula SAE dal 2014 con il Polimarche Racing Team. Questo progetto è nato nel 2013, guidato dal Faculty Advisor, l'Ing. Amodio Dario, ed è un progetto tutt'ora attivo con la quarta generazione di vettura: "P4 Evoluzione". Questa monoposto si rifà al progetto della versione precedente, "Peacock 4" (Figura 3.1), ma con l'obiettivo di apportare alcune modifiche mirate ad ottenere: riduzione del peso, affidabilità, maggior carico aerodinamico.

Il team 2021 è composto da circa 70 studenti divisi in 7 reparti: aerodinamica, dinamica del veicolo, elettronica, marketing, powertrain e telaio; inoltre c'è anche il reparto veicolo elettrico che si sta occupando della progettazione della prossima auto che sostituirà la attuale a combustione. Ci sono, poi, 4 piloti che sono comunque studenti e membri dei vari reparti. Tutte le attività sono coordinate da un team manager e un team leader tecnico a cui fanno capo i vari capo-reparti.

La P4 Evoluzione, per quest' anno, ha già preso parte alla competizione di Formula Student East, presso il circuito di Formula 1 "Hungaroring" (Figura 3.2), dove ha ottenuto buoni risultati agli eventi statici, ma non è stato lo stesso per quelli dinamici poiché sono stati riscontrati alcuni piccoli problemi tecnici, dovuti allo scarso tempo avuto a disposizione per testare adeguatamente l'auto, che non hanno permesso di portarli tutti a termine. Nel mese di ottobre parteciperà anche alla competizione di Formula Student Italy, presso l'autodromo di Varano de' Melegari, prima di lasciare spazio al progetto dell'auto elettrica.



Figura 3.1: Foto P4 ad FS Germany 2019.



Figura 3.2: Foto P4 Evoluzione ad FS East.

3.1 REGOLAMENTO FORMULA SAE

Ci sono diversi vincoli progettuali, scanditi dal regolamento di gara, ai quali devono attenersi gli studenti per realizzare il prototipo. I limiti che sono posti spaziano in tutti gli ambiti della vettura come ad esempio: componenti del telaio, materiali utilizzabili, ingombri massimi. Tuttavia, viene lasciato ampio spazio alle soluzioni adottabili.

Per quanto riguarda la sezione di aerodinamica, tutte le parti dell'auto che rientrano nella categoria di dispositivo aerodinamico, ovvero ogni struttura montata sul veicolo che serve per guidare il flusso d'aria attorno ad esso, aumentare la deportanza e/o diminuire la resistenza all'avanzamento, sono sottoposte a limiti di ingombro e devono avere una minima altezza da terra (Figura 3.3), oltre che un raggio di curvatura minimo per le zone che sono a rischio di contatto con i pedoni.

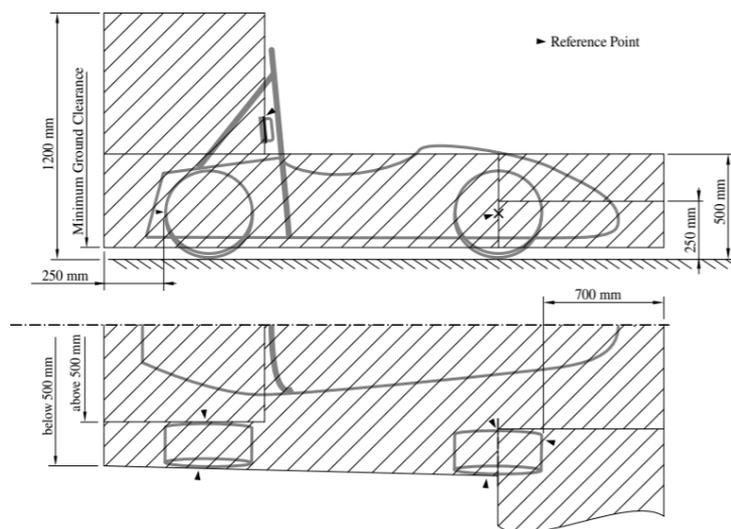


Figura 3.3: Ingombri massimi dei dispositivi aerodinamici.

Inoltre, ogni dispositivo aerodinamico è sottoposto a limiti per quanto riguarda la rigidità, infatti se applicata su di loro una forza di 200 N distribuita su una superficie minima di 225 cm², non devono deformarsi di più di 10 mm nella direzione del carico; o comunque devono resistere ad una forza di 50 N applicata in qualsiasi direzione ed in qualsiasi punto e non deformarsi per più di 25mm.

4. IL CONCETTO DI AERODINAMICA NELLE VETTURE DA CORSA

Da sempre in tutte le competizioni automobilistiche, specialmente in Formula 1, lo sviluppo del pacchetto aerodinamico dei veicoli ha sempre ricoperto un ruolo molto importante, fino ad arrivare ai nostri giorni dove un'aerodinamica ben sviluppata rappresenta l'elemento più importante per abbassare il tempo sul giro. In Formula 1 lo sviluppo dell'aerodinamica iniziò con semplici forme a siluro dove, l'obiettivo principale era quello di avere la minore resistenza all'avanzamento possibile. Poi a partire dagli anni Sessanta è iniziato lo studio degli alettoni che avevano come scopo principale quello di aumentare la deportanza; quindi, le forze scaricate sugli pneumatici e di conseguenza le prestazioni. Negli anni seguenti, negli uffici tecnici delle squadre di Formula 1 arrivarono i primi calcolatori elettronici, inizialmente per effettuare i calcoli di rigidità e dei relativi sforzi nella progettazione dei telai; successivamente per i calcoli legati all'aerodinamica. Questo grande passo in avanti, permise di spingersi sempre di più verso forme complesse dei kit aerodinamici (Figura 4.1).



Figura 4.1: Confronto ala anteriore Ferrari SF90, Ferrari 312T.

Una seconda rivoluzione del mondo delle corse avvenne in Gran Bretagna, dove nel 1978 nacque la Lotus 79, caratterizzata da un fondo sagomato secondo la linea di un'ala rovesciata, tanto che venne rinominata "wing car". Inoltre, il fondo, per sigillarlo ed eliminare i trafileamenti di aria, venne accoppiato lateralmente con delle minigonne. Quest'auto riusciva a generare il cosiddetto "effetto suolo". Il principio di base era quello dell'effetto Venturi: tramite un canale sotto la vettura, convergente all'inizio e divergente

alla fine, si creava sotto il fondo una forte depressione dovuta alla variazione di velocità del flusso, generata a sua volta dalla variazione di sezione (Figura 4.2).

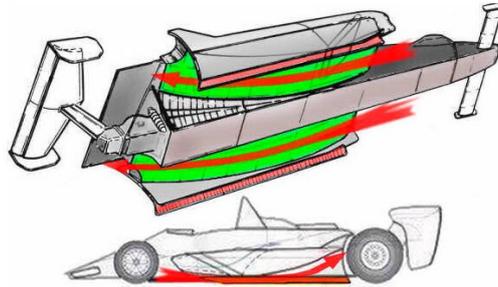


Figura 4.2: Rappresentazione fondo e minigonne Lotus 79.

4.1 FLUSSI ATTACCATI E FLUSSI SEPARATI

Consideriamo un veicolo immerso in una corrente fluida con velocità del flusso indisturbato pari a V_∞ , ovvero la velocità che ha quando non risente della presenza del corpo.

Si possono verificare due casistiche, se il corpo è affusolato come nel caso A, le linee di corrente vicino la superficie seguiranno esattamente la forma dall' inizio alla fine, se il corpo risulta tozzo come nel caso B, nella zona posteriore potrebbe presentarsi un distacco del flusso che genererà una zona di turbolenza (Figura 4.3).

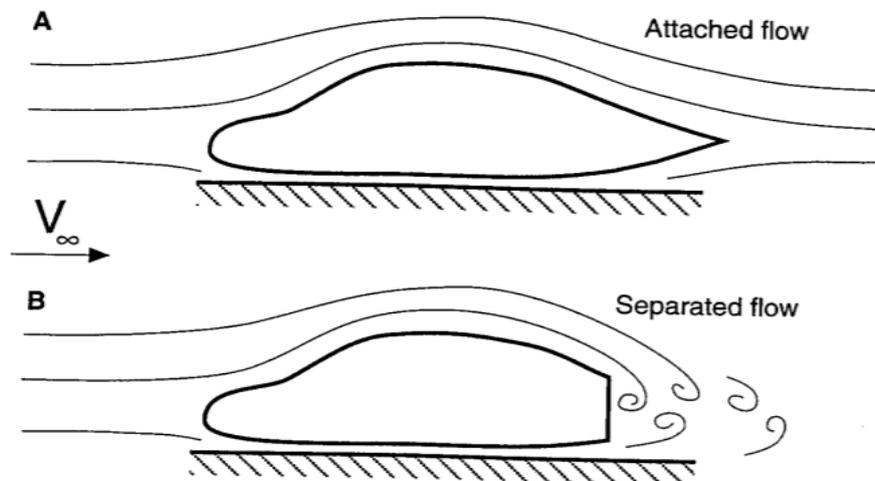


Figura 4.3: Flusso attaccato e flusso separato.

4.2 DISTRIBUZIONE DI VELOCITA'

Quando un veicolo si muove all'interno di un determinato volume di aria in quiete, la sua forma, a causa del suo moto, disturberà le particelle d'aria che quindi non avranno la stessa velocità in tutti i punti del flusso, bensì avranno un andamento che va da zero per quelle che saranno a contatto con le pareti della vettura, fino a tornare alla velocità del fluido indisturbato ad una distanza sufficientemente elevata dal corpo.

La zona del flusso dove si ha questo gradiente di velocità da $V=0$ a $V=V_{\infty}$ viene chiamata strato limite.

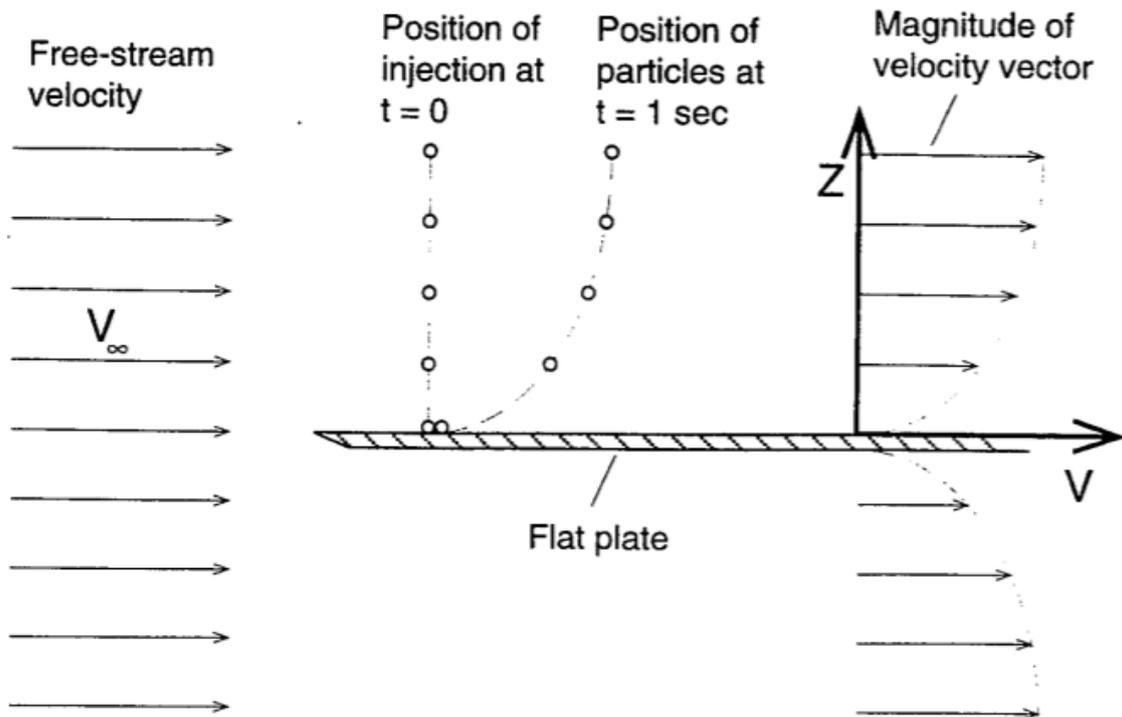


Figura 4.4: Distribuzione di velocità.

Introducendo una lastra piana in un flusso d'aria indisturbato si può notare come all'istante di tempo $t=0$, ovvero quando entreranno in contatto con essa, avranno tutte la stessa velocità. All'istante di tempo $t=1 \text{ sec}$, le particelle che si troveranno sulla superficie del corpo avranno velocità nulla, per cui si genererà un gradiente atto a riportare la velocità da un valore nullo a quella del fluido indisturbato (Figura 4.4).

4.3 FLUSSO LAMINARE E TURBOLENTO

Consideriamo una condizione di flusso indisturbato, se seguissimo le tracce create dalle particelle presenti nel fluido, ci aspetteremmo di vedere delle linee parallele tra di loro. Se, infatti, hanno queste caratteristiche e seguono la direzione della velocità media e il moto del fluido sembra essere “ben organizzato”, questo tipo di flusso viene denominato laminare (Figura 4.5).

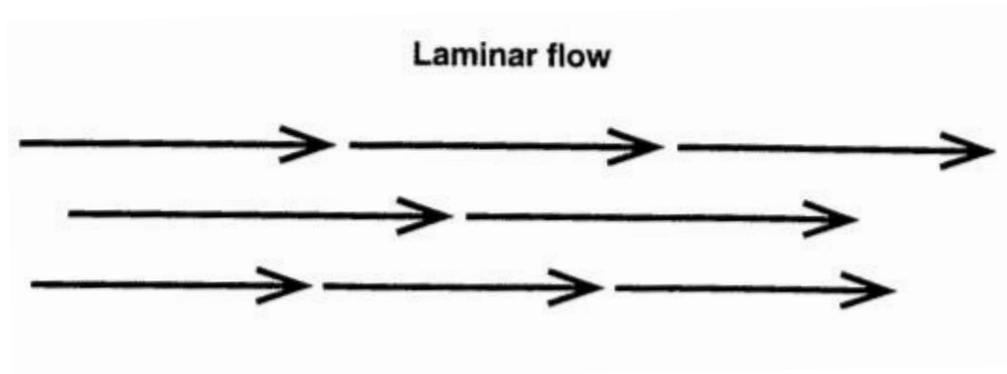


Figura 4.5: Disegno di un flusso laminare.

Considerando sempre un flusso indisturbato, se le particelle di fluido hanno la stessa velocità media, ma si muovono in direzioni diverse ed il moto del fluido non sembra più essere “ben organizzato”, questo tipo di flusso viene denominato turbolento (Figura 4.6).

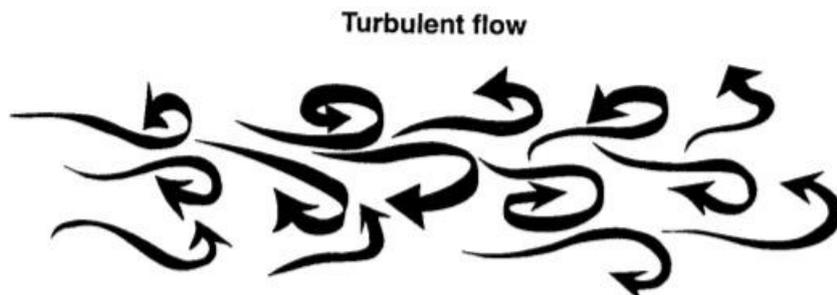


Figura 4.6: Disegno di un flusso turbolento.

Conoscere la condizione del flusso, se laminare o turbolento, presente su una vettura da competizione è molto importante, poiché nei due casi cambiano drasticamente alcune caratteristiche quali: separazione del flusso, la resistenza all' avanzamento anche detta drag, la deportanza anche detta lift.

Solitamente, quando un veicolo si muove in un ambiente indisturbato, il flusso può essere considerato per la maggior parte dei casi laminare. Tuttavia, può accadere che un flusso in condizione inizialmente laminare, può avere una transizione in turbolento nella parte posteriore del veicolo dovuto a disturbi causati dalle parti del veicolo stesso.

4.4 PROPRIETA' DEI FLUIDI

Le forze esercitate su un veicolo che si muove in un flusso, oppure su un modellino in scala in una galleria del vento, dipendono oltre che dalla forma della vettura e dalla sua velocità, anche dalle caratteristiche e dalle proprietà del fluido stesso come ad esempio: viscosità, densità, temperatura e pressione.

L' effetto della viscosità può essere spiegato tramite un semplice esempio (Figura 4.7). Due superfici solide parallele sono separate da un fluido viscoso, la superficie inferiore è ferma, mentre quella superiore si muove verso destra a velocità costante V_∞ . Le particelle vicine alle lastre tenderanno ad assumere le loro velocità: nulla per quella ferma e V_∞ per quella in moto. Questa viene chiamata condizione di no-slip.

Proprio a causa della viscosità le particelle sono obbligate a muoversi una rispetto all'altra per rispettare la condizione appena citata. Il fluido, quindi, eserciterà una forza discorde al movimento della lastra piana superiore, la viscosità infatti può essere definita proprio come la forza che occorre applicarle per mantenerla in moto.

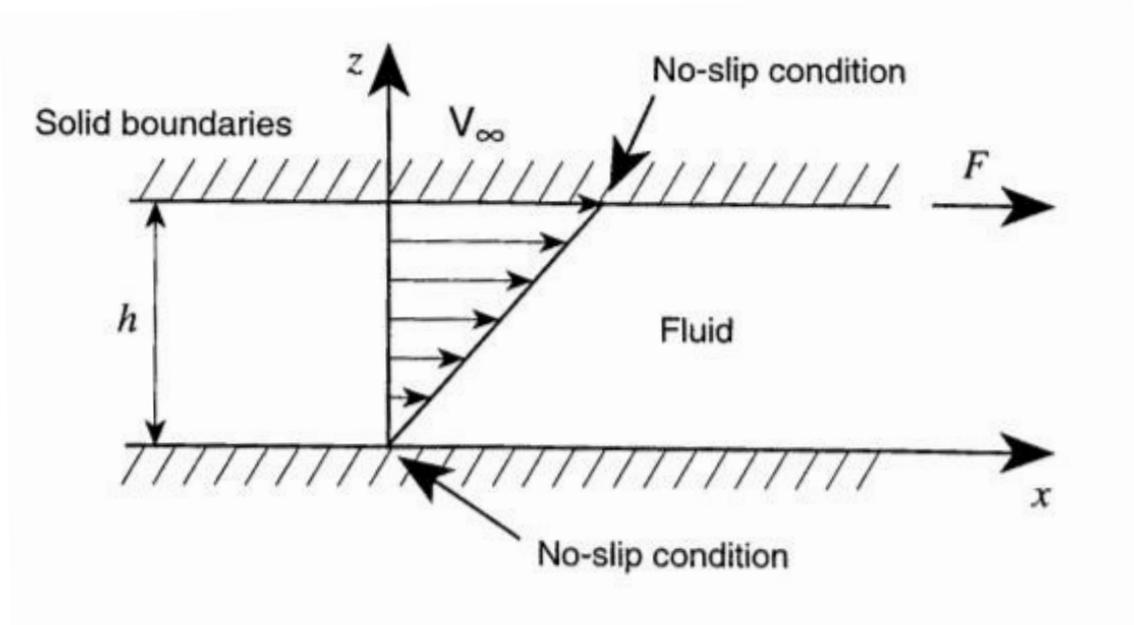


Figura 4.7: Esempio che spiega la viscosità di un fluido.

Eq.1:

$$F = \frac{\mu A V_{\infty}}{h}$$

Dove:

F: forza da applicare alla piastra superiore per mantenere il moto

μ : coefficiente di viscosità

V_{∞} : velocità della piastra in movimento

h: distanza tra le piastre

A: area della piastra in movimento

Si può notare come il coefficiente di viscosità sia direttamente proporzionale alla forza da applicare alla lastra per mantenere il moto. Quindi, per quanto riguarda la resistenza aerodinamica di un veicolo che si muove in un fluido varrà la stessa considerazione, ovvero aumenterà con la viscosità che a sua volta sarà influenzata dalla temperatura e dalla pressione.

4.5 LO STRATO LIMITE

Lo strato di fluido caratterizzato da un rapido cambiamento di velocità tramite un gradiente che va dalla velocità nulla a quella del fluido indisturbato viene chiamato strato limite. Il suo spessore δ cresce all' aumentare della distanza dal punto in cui il fluido viene a contatto con il corpo, detto bordo di attacco (Figura 4.8).

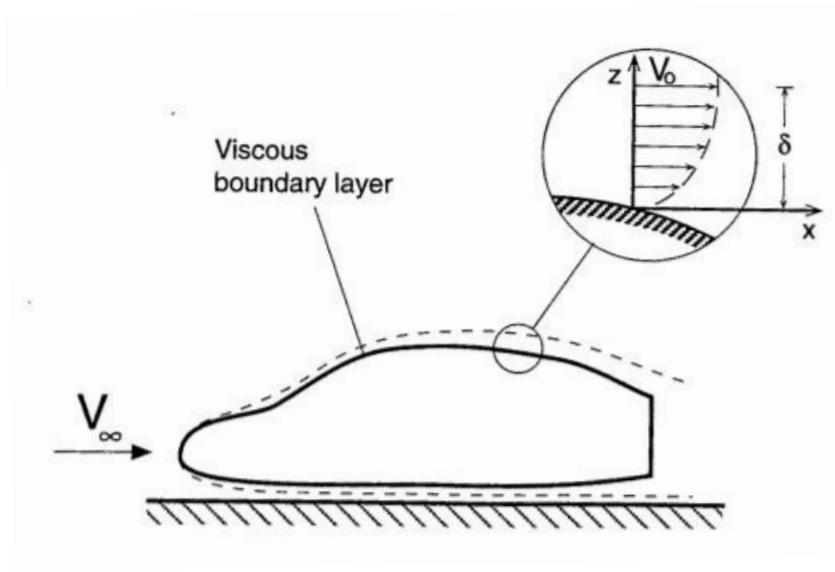


Figura 4.8: Andamento dello strato limite su una vettura.

È molto importante conoscere le caratteristiche dello strato limite che circonda il corpo in analisi poiché: una vettura in movimento con uno spessore di tale strato molto elevato genererà un attrito viscoso maggiore rispetto ad una con uno spessore più piccolo.

A questo punto si può definire un numero adimensionale, il numero di Reynolds, che rappresenta il rapporto tra forze d'inerzia e forze viscosi. Grazie al valore che viene fuori da questo rapporto si riesce a prevedere il comportamento che avrà un determinato fluido, se laminare o turbolento. Inoltre, visto che a parità di geometria e di Reynolds avremo lo stesso tipo di flusso, può essere anche usato per fare paragoni in galleria del vento con modellini a diverse scale.

Eq.2:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu}$$

Con:

ρ : densità del fluido

V : velocità del fluido

L : dimensione caratteristica del corpo

μ : coefficiente di viscosità

Inoltre, il rapporto tra μ e ρ è definito come ν e prende il nome di viscosità cinematica portando a riscrivere la relazione in questo modo:

Eq.3:

$$Re = \frac{VL}{\nu}$$

Il numero di Reynolds in generale è più elevato quanto più ci si avvicina alla condizione di moto turbolento. Nello strato limite presente su una vettura, nella maggior parte dei casi, si avrà una zona laminare vicino al bordo di attacco; all' aumentare della distanza da esso, infatti aumenterà Re poiché crescerà L si trasformerà in turbolento (Figura 4.9).

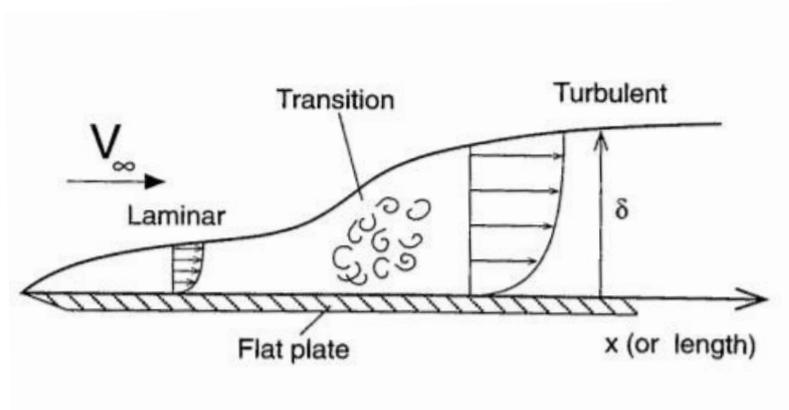


Figura 4.9: Transizione da laminare a turbolento.

Nella regione di spazio dove il flusso è turbolento, lo spessore dello strato limite aumenta, con conseguente aumento del drag dovuto all' attrito viscoso.

Si può notare come, aumentando la velocità, lo spessore dello strato limite diminuisce, viceversa se diminuisce.

È opportuno definire un coefficiente adimensionale che è una misura dell' attrito sulla superficie del corpo immerso nel fluido. Questo indicatore è molto utile poiché si svincola dalla velocità; quindi, permette il confronto tra prove a diversi valori di essa.

Eq. 3:

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

Con:

τ : forza di taglio sulla superficie per unità di lunghezza

$\frac{1}{2} \rho V_\infty^2$: pressione dinamica

Per una lastra piana immersa in un flusso parallela ad essa, si può valutare l'andamento del C_f al variare del numero di Reynolds; in base al valore del primo si potrà risalire alla tipologia del flusso. Avremo due curve, una per quello laminare ed una per il turbolento, entrambe avranno un andamento decrescente con l'aumentare del Re (Figura 4.10).

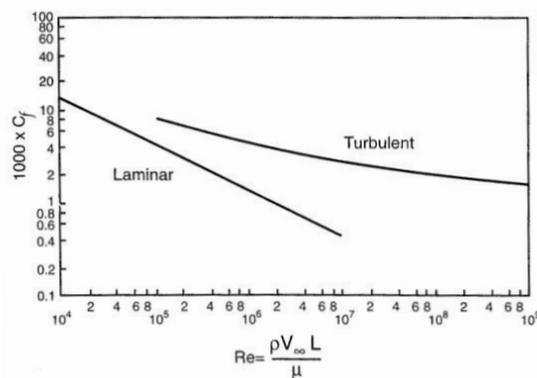


Figura 4.10: Andamento del C_f in funzione del Re.

Si può notare come, per un ampio range di valori del numero di Reynolds, sono possibili sia flussi di tipo laminare che turbolento. L' attrito del flusso laminare è sicuramente minore del secondo, per cui è preferibile.

Alcune conclusioni importanti:

- Lo spessore dello strato limite laminare è minore di quello turbolento.
- Principalmente per flussi laminari, il valore del coefficiente di attrito decresce con l'aumentare del numero di Reynolds.
- Per alcuni valori di Re si potrebbe avere sia un flusso laminare che un flusso turbolento, a seconda delle caratteristiche del corpo o dei disturbi del flusso, avremo l'uno o l'altro.
- Il coefficiente di attrito per uno strato limite turbolento è maggiore di quello per uno laminare.
- In alcuni casi è preferibile un flusso turbolento ad un laminare, poiché nel secondo caso, la separazione dello strato limite potrebbe avvenire in anticipo rispetto al primo.

Queste conclusioni possono essere anche riassunte con una regola: per le auto da corsa, è opportuno avere un'ampia zona di flusso laminare per ridurre al minimo la resistenza aerodinamica. Tuttavia, nel caso di distacco del flusso, è opportuno favorirne la transizione al turbolento in modo da favorirne il riattacco.

4.6 EQUAZIONE DI BERNOULLI

La forma di una vettura in movimento causa il cambiamento sia della direzione sia della velocità del flusso che attraversa. Questi cambiamenti creano, vicino al corpo, delle distribuzioni di velocità che si traducono in carichi aerodinamici che agiscono sul veicolo. Quest' ultimi possono essere suddivisi in due grandi contributi principale: il primo è quello delle forze di resistenza, dipende dallo strato limite ed agisce tangenzialmente alla superficie contribuendo al drag; il secondo è dovuto alla pressione, che agisce in direzione

normale alla superficie contribuendo sia alla downforce (per i veicoli, per ottenere più carico sugli pneumatici è opportuno avere una forza verticale diretta verso il basso) che al drag.

Entrambe le componenti sono strettamente legate alla distribuzione di velocità che si genera intorno alla vettura, questa relazione è espressa dall'equazione di Bernoulli. Tuttavia, per utilizzare quest'ultima bisogna considerare un flusso stazionario ed incomprimibile (che non varia nel tempo e a densità costante).

Eq. 4:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{costante}$$

Con:

p: pressione statica locale

ρ : densità del fluido

V: velocità locale del flusso

g: accelerazione gravitazionale

z: quota

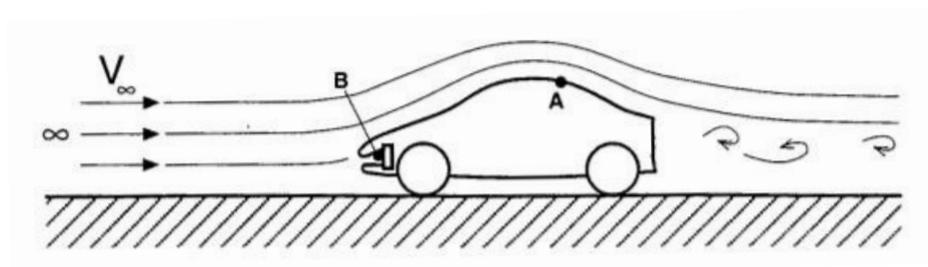


Figura 4.11: Applicazione dell'equazione di Bernoulli

Conoscendo la velocità del veicolo (Figura 4.11), di conseguenza quella del flusso V_∞ , la pressione ambiente p_∞ e ad esempio la pressione statica locale in A p_a , è possibile calcolare la velocità locale V_a del flusso nel punto A, tramite la seguente relazione:

Eq. 5:

$$\frac{p_a}{\rho} + \frac{V_a^2}{2} = \frac{p_\infty}{\rho} + \frac{V_\infty^2}{2}$$

4.7 LA SCIA DI UN VEICOLO

Il movimento di un veicolo all' interno di un flusso genera una perturbazione di quest' ultimo, variando intensità e direzione della velocità. In particolare, se il corpo è tozzo, dietro di esso si ha separazione del flusso con conseguente turbolenza, questo effetto si può sviluppare anche a grande distanza ed è chiamato scia (Figura 4.12).

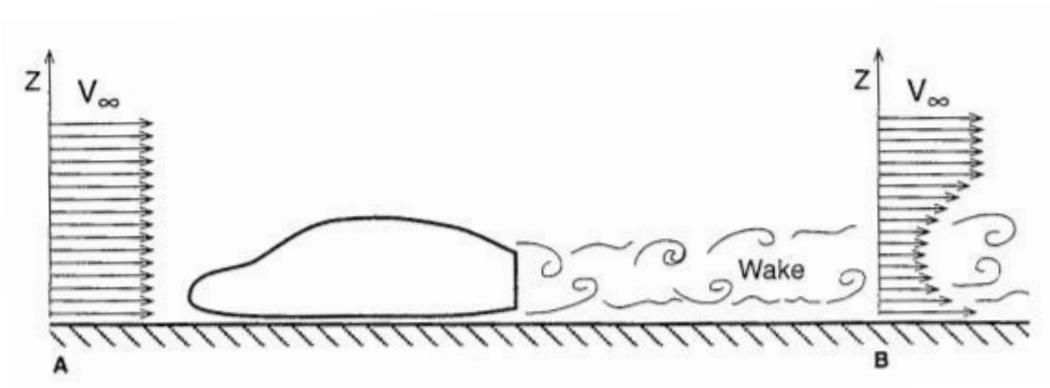


Figura 4.12: Effetto scia generato da un veicolo.

Il punto B, dove gli effetti di scia sono ancora presenti, può trovarsi ad una distanza pari a 10-20 volte la lunghezza del veicolo (considerazione importante per impostare il volume

di controllo per una simulazione CFD). La presenza della scia di un flusso separato e disturbato dietro un veicolo genera un incremento del drag.

All'interno della scia, a causa delle variazioni d'intensità e direzione della velocità del flusso, si generano periodicamente dei vortici.

A causa del flusso che si trova all'interno della scia, un veicolo che si muove in essa, generata da un altro corpo, risentirà di una resistenza aerodinamica minore. Questa situazione è spesso utilizzata nelle competizioni sportive soprattutto nelle fasi di sorpasso per raggiungere velocità di picco più alte.

Tuttavia, si presentano anche dei lati negativi. Infatti, per le vetture che puntano sul pacchetto alare per generare deportanza e raggiungere prestazioni elevate, l'effetto di scia non permette un corretto funzionamento di quest'ultime, causando un drastico calo di downforce che in curva porta alla perdita di aderenza degli pneumatici (in questo caso si parla di dirty-air).

4.8 FORZE E COEFFICIENTI AERODINAMICI

Ad agire su un veicolo esistono due principali categorie di forze: la pressione, che agisce perpendicolarmente alla superficie ed è responsabile del lift ed in parte anche del drag e l'attrito che agisce parallelamente alla superficie del corpo e contribuisce solo ed esclusivamente al drag. Inoltre, è identificabile un terzo tipo di forza che agisce lateralmente al veicolo in caso di forte vento laterale. Queste tre forze generano una terna di riferimento per le analisi fluidodinamiche, in quanto agiscono lungo direzioni differenti tra loro (Figura 4.13).

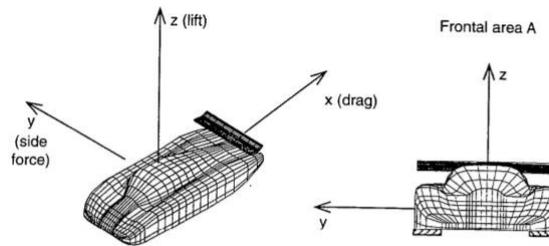


Figura 4.13: Direzione delle forze aerodinamiche.

Tuttavia, molto spesso, ci si limita o comunque, per studiare un veicolo, si parte limitandosi a discutere solamente del drag e del lift, poiché il carico laterale è difficilmente prevedibile poiché dipende dall'ambiente esterno, quindi, risulta difficile anche da modellare.

La direzione del drag è parallela alla direzione del moto del veicolo ed è diretta verso il posteriore del veicolo, mentre il lift agisce verso l'alto perpendicolarmente all'asfalto. Ovviamente, la downforce è l'equivalente del lift ma preso con il segno negativo ed agisce nella direzione negativa dell'asse z (questo poiché, l'aerodinamica inizialmente era studiata per gli aeromobili dove l'effetto positivo è quello di sollevare il velivolo dal suolo, nel caso delle automobili, invece, l'effetto desiderato è quello di spingere la vettura a terra).

È opportuno definire dei coefficienti adimensionali per il lift e il drag poiché in questo modo ci si può svincolare dalla velocità, riferendosi solo ed esclusivamente alla forma e alle dimensioni del corpo in analisi. Il C_d è il coefficiente legato al drag, il C_l è il coefficiente legato al lift, infine il C_y è quello relativo alla forza laterale. Tutti e tre i valori vengono calcolati con le stesse modalità, ovvero dividendo la forza per la pressione dinamica e per la sezione frontale del veicolo:

Eq. 6:

$$C = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 A}$$

Con:

C: generico coefficiente aerodinamico (C_d, C_l, C_y)

F: generica forza aerodinamica (drag, lift, forza laterale)

ρ : densità dell'aria

V_∞ : velocità del veicolo

A: sezione frontale del veicolo

Ovviamente la sezione frontale (Figura 4.14) del veicolo viene presa come riferimento per i calcoli dei coefficienti aerodinamici poiché rappresenta la superficie esposta al flusso. Non ci sono delle regole ben definite per determinare il suo valore, per cui potrebbe variare a seconda di chi svolge le prove, facendo variare di conseguenza C_d , C_l , C_y . In generale, per avere un metro di paragone tra prove è importante che siano riferiti allo stesso valore di sezione frontale in modo da ottenere risultati confrontabili.

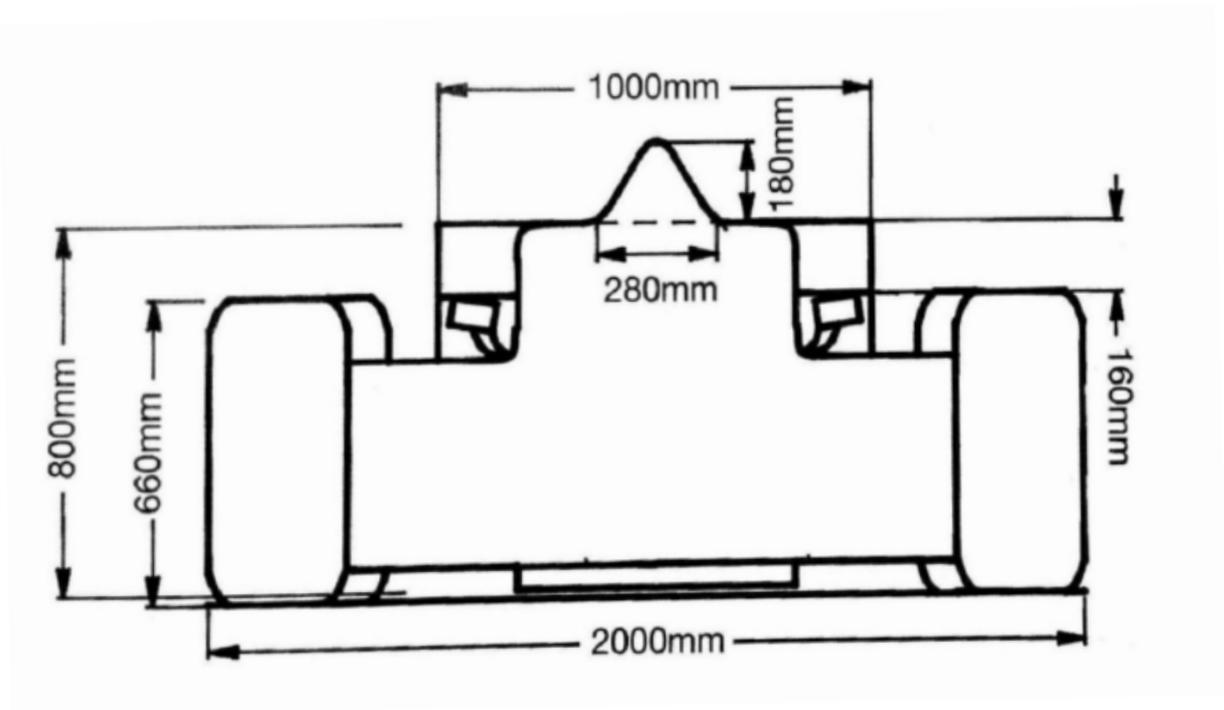


Figura 4.14: Esempio sezione frontale di un veicolo.

I valori dei coefficienti aerodinamici dipendono quasi esclusivamente dalla forma del corpo al quale si riferiscono. In generale si può affermare che per i corpi affusolati si hanno valori di C_d molto bassi, per i corpi tozzi, ovvero caratterizzati da un rapporto della

sezione frontale sulla lunghezza elevato, il valore del C_d salirà. Per quanto riguarda il C_l , in generale si può affermare che per i corpi simmetrici assumerà un valore nullo poiché non ci sarà differenza di pressione tra la superficie superiore e quella inferiore.

Nella seguente tabella sono evidenziati i valori caratteristici del C_l e C_d per alcuni corpi di riferimento (Tabella 4.1).

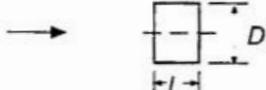
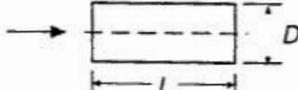
			C_L	C_D
1	Circular plate		0	1.17
2	Circular cylinder $L/D < 1$		0	1.15
3	Circular cylinder $L/D > 2$		0	0.82
4	Low drag body of revolution		0	0.04
5	Low drag vehicle near the ground		0.18	0.15
6	Generic automobile		0.32	0.43
7	Prototype race car		-3.00	0.75

Tabella 4.1: Valori caratteristici dei coefficienti per geometrie comuni.

Inoltre, è possibile definire un altro coefficiente adimensionale, il C_p . Quest'ultimo indica una misura della pressione locale statica sulla superficie del veicolo che però, è indipendente dalla velocità. Permette di conoscere la distribuzione di pressione che si presenta su un corpo potendo confrontare anche prove a velocità diverse.

Il coefficiente di pressione è definito nel modo seguente:

Eq. 7:

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

Utilizzando l'equazione di Bernoulli si può ricavare:

Eq. 8:

$$p - p_\infty = \frac{1}{2}\rho(V_\infty^2 - V^2)$$

Si può riscrivere il C_p nel seguente modo:

Eq. 9:

$$C_p = 1 - \frac{V^2}{V_\infty^2}$$

Da quest' ultima relazione si può notare facilmente come il C_p raggiunga il valore massimo, ovvero 1, in corrispondenza dei punti dove si ha velocità del flusso nulla cioè nei punti di ristagno. Mentre, nei punti in cui il flusso è indisturbato i valori delle due velocità tenderanno ad essere uguali, quindi il C_p tenderà ad un valore nullo.

Per iniziare a comprendere l'andamento del C_p lungo una vettura, si può partire da un caso ipotetico analizzando come varia su una superficie semplice come una sfera (Figura 4.14).

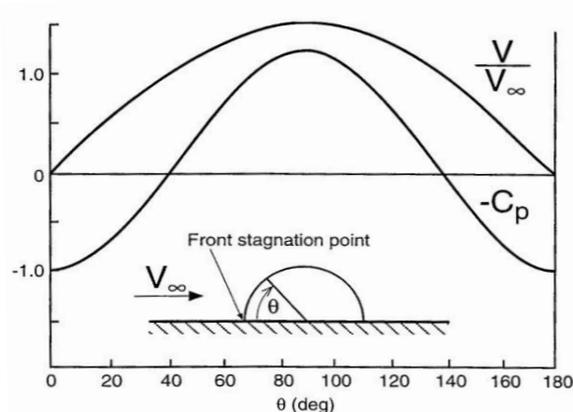


Figura 4.14: Andamento velocità e C_p su un corpo sferico.

Di fronte la sfera, vicino al fondo, si presenta un punto di ristagno, proseguendo, si può notare come cresce la velocità arrivando ad un massimo in cima alla sfera dove il coefficiente di pressione raggiungerà il valore più basso. Trattandosi di un corpo simmetrico, si presenterà un ulteriore punto di ristagno nella parte finale della sfera.

Dall'analisi di questa casistica si può trarre un'importante conclusione: se un flusso è condotto su una superficie concava, la velocità diminuisce e di conseguenza la pressione aumenterà; se invece è condotto su una superficie convessa, la velocità tenderà ad aumentare portando ad una diminuzione della pressione.

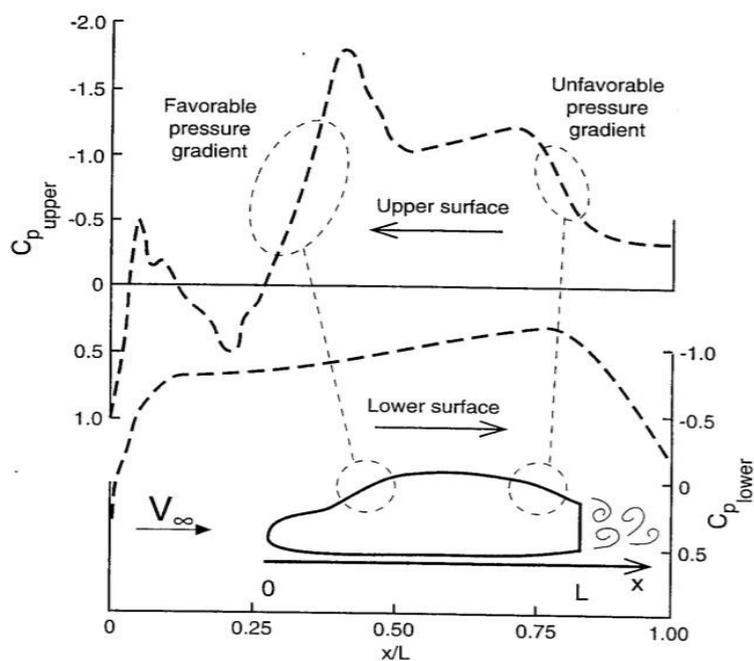


Figura 4.15: Distribuzione del C_p su un veicolo generico.

Ora si può procedere a valutare l'andamento del C_p sulla superficie di un veicolo generico (Figura 4.15). Di fronte la vettura si presenta un punto di ristagno, successivamente, il flusso accelera sul cofano, di conseguenza, il C_p assume un valore negativo fino alla base del parabrezza dove la superficie diventa concava ed il C_p torna ad essere positivo. Procedendo lungo il parabrezza, che risulta convesso, il flusso torna ad accelerare e la pressione torna a diminuire. Passando al posteriore del veicolo si avrà la stessa sequenza invertita, tuttavia, il C_p non tornerà ad 1, poiché si avrà separazione del flusso.

Nella parte sottostante della vettura, il C_p all'inizio è minore di uno poiché non si ha un punto di ristagno, poi, la velocità del flusso aumenta ed il coefficiente fino ad arrivare prima dell'uscita dove inizierà ad aumentare, ma anche in questo caso non tornerà al valore di 1 a causa della separazione. Quindi si può dire che all'uscita del veicolo la pressione sarà minore rispetto a quella in ingresso generando resistenza aerodinamica.

5. CENNI DI DINAMICA DEL VEICOLO

Un corpo a parità di geometria, di velocità del flusso sarà in grado di generare sempre carichi della stessa entità. Se da un lato con i coefficienti aerodinamici ci si riesce a svincolare dalla velocità, dall'altro avremo che un pacchetto aerodinamico che viene implementato su un'auto da corsa non si comporterà sempre allo stesso modo. Prendiamo in esempio un veicolo che percorre un circuito, esso a seconda del grado di sterzata o se si trova in fase di accelerazione o frenata, farà lavorare l'aerodinamica in modo diverso variando le forze che essa sarà in grado di sviluppare.

Spesso l'aerodinamica di una vettura viene studiata in condizioni ottimali, cioè con l'auto che non viene sottoposta ai generali spostamenti del centro di massa; questo perché l'aerodinamica ha il compito di creare deportanza, ma non tiene conto della variabilità dello spostamento del centro di massa, che inevitabilmente varia e condiziona lo sfruttamento delle forze aerodinamica

I fenomeni fisici da prendere in considerazione sono principalmente tre:

- Imbardata
- Beccheggio
- Rollio

Per imbardata di un veicolo si intende il moto di oscillazione intorno all'asse verticale passante per il baricentro (questo è il punto nel quale è possibile considerare concentrata ed applicata la forza di gravità). In altre parole, l'imbardata è la situazione in cui la parte anteriore e quella posteriore del mezzo oscillano velocemente a destra e sinistra portando il veicolo fuori controllo. Questo effetto è determinato principalmente dall'aderenza degli pneumatici, tuttavia, in caso la causa fosse innescata da una raffica di vento laterale dipenderà anche dalla posizione del centro di pressione (punto in cui può essere applicata la risultante delle forze aerodinamiche) rispetto al baricentro del veicolo. Prendiamo in esame l'esempio seguente (Figura 5.1).

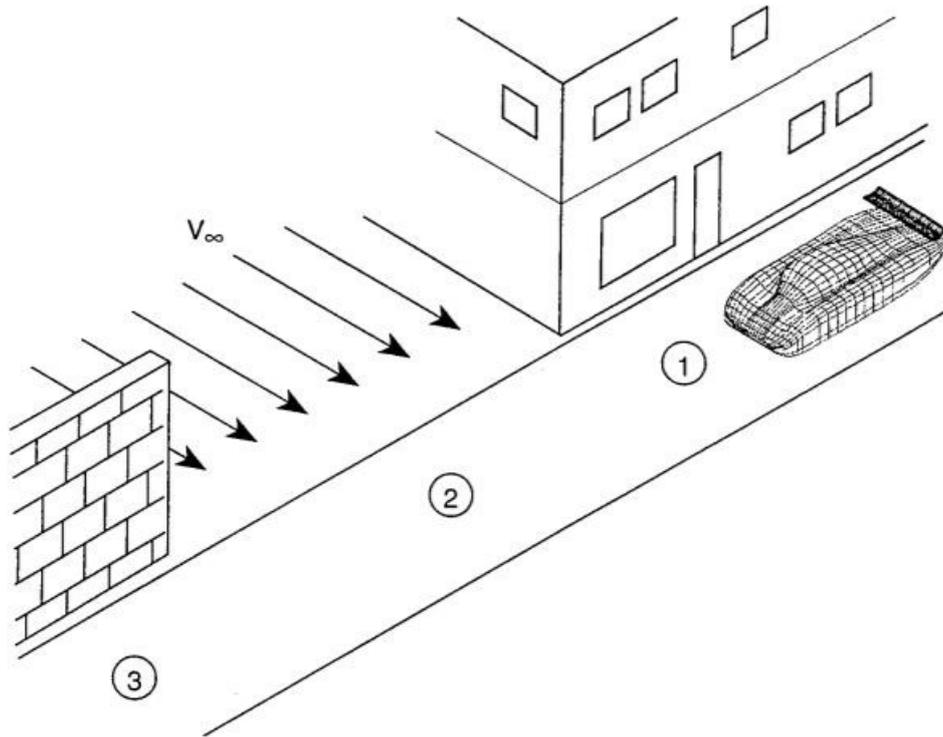


Figura 5.1: Veicolo che entra in contatto con una raffica laterale.

Un veicolo con centro di pressione avanzato rispetto al centro di massa, precedentemente in un ambiente dove non è presente vento laterale ovvero nella sezione “1”, si sposta nella sezione “2” senza alcuna reazione da parte del conducente e con il volante in posizione fissata, esso girerà gradualmente nella direzione del vento (Figura 5.2).

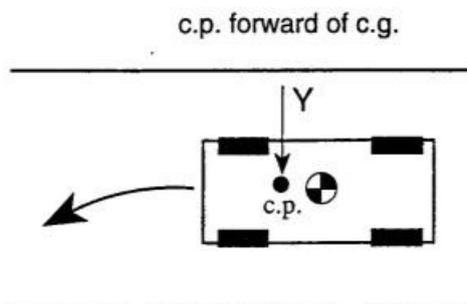


Figura 5.2: Auto con centro di pressione avanzato rispetto al centro di gravità.

Un veicolo che invece si troverà ad avere un centro di pressione posteriore al centro di massa dello stesso, nella stessa condizione di raffica di vento laterale, si troverà a girare gradualmente nella direzione contraria al vento (Figura 5.3).

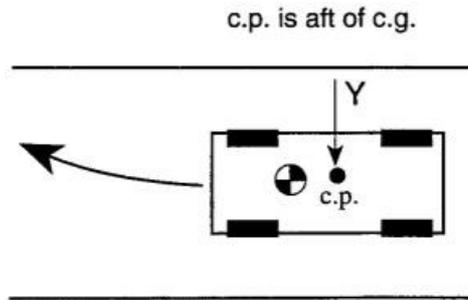


Figura 5.3: Auto con centro di pressione posteriore rispetto al centro di gravità.

Riassumendo avremo due andamenti diversi dell'imbardata nel tempo (Figura 5.4).

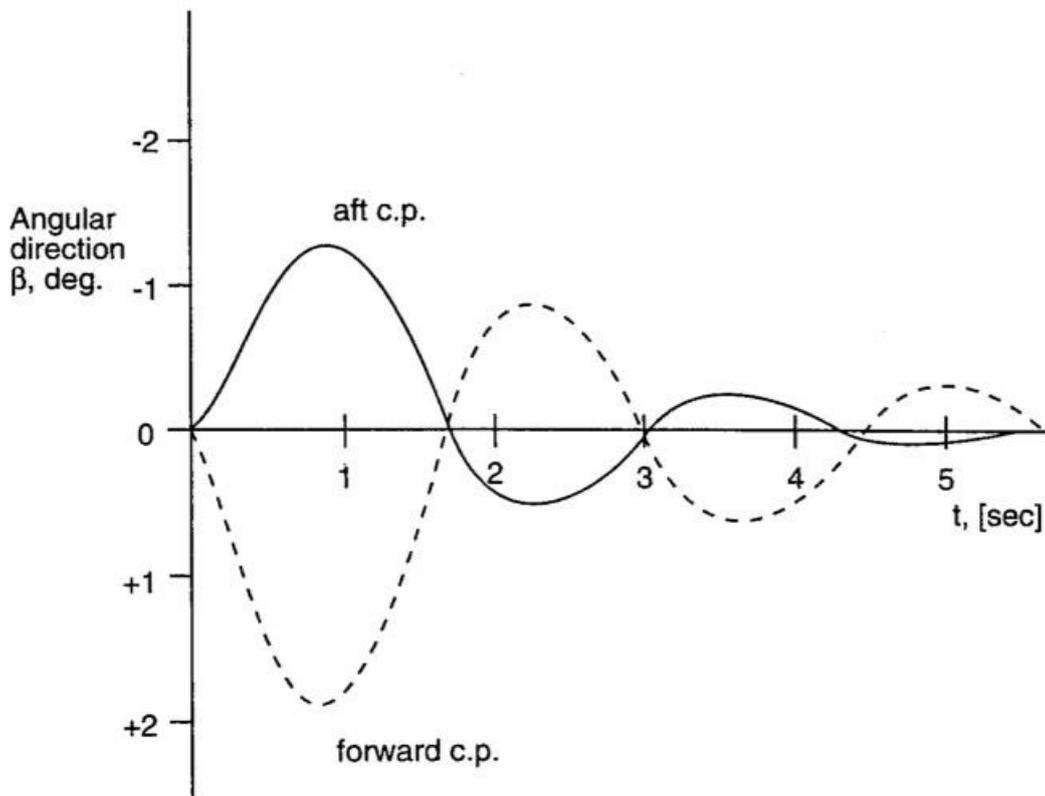


Figura 5.4: Andamento dell'imbardata nei due casi.

Nel caso del centro di pressione avanzato rispetto al centro di massa avremo un'oscillazione più pronunciata e meno smorzata nel tempo. Nell'altro caso oltre ad avere un'oscillazione meno pronunciata, sarà anche più smorzata quindi tornare prima ad un valore nullo.

Per quanto riguarda il beccheggio (Figura 5.5), nel campo automobilistico, è costituito dall'inclinazione del muso e/o della parte posteriore della vettura durante le fasi di accelerazione o frenata in maniera costante e irregolare.

In particolare, se si accelera improvvisamente, specialmente da fermo, il muso del veicolo tende ad alzarsi, mentre la parte posteriore si abbassa per effetto dello spostamento del centro di massa verso l'asse posteriore. In caso di frenata brusca il muso tende ad abbassarsi, con la parte posteriore che si alza per effetto dello spostamento del centro di massa verso l'asse anteriore. Esso dipende da vari fattori, tra cui la rigidità delle sospensioni, la misura degli sbalzi anteriore e posteriore della vettura in rapporto alla lunghezza complessiva del mezzo e dal fatto che la vettura sia a trazione anteriore o posteriore. Esiste un asse sull'auto che in entrambe le situazioni, di frenata e accelerazione, che non subisce variazioni, questo prende il nome di asse di beccheggio.

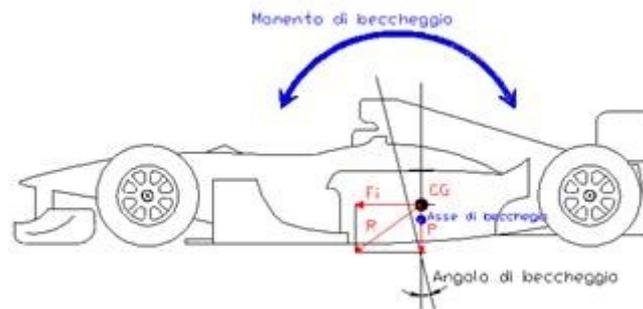


Figura 5.5: Schematizzazione del beccheggio.

Il rollio (Figura 5.6), nel campo automobilistico, indica l'oscillazione di un veicolo intorno al suo asse verticale. Questo fenomeno viene a crearsi quando, percorrendo una curva, il lato della vettura più vicino al centro della curva tende ad alzarsi dal suolo,

mentre quello opposto tende ad abbassarsi; questa oscillazione si genera poiché per effetto della forza centrifuga si verifica un trasferimento del centro di massa verso le ruote esterne rispetto al raggio della curva. Anche in questo caso esiste un asse sull'auto attorno al quale avverrà la rotazione, quest'ultimo prende il nome di asse di rollio.

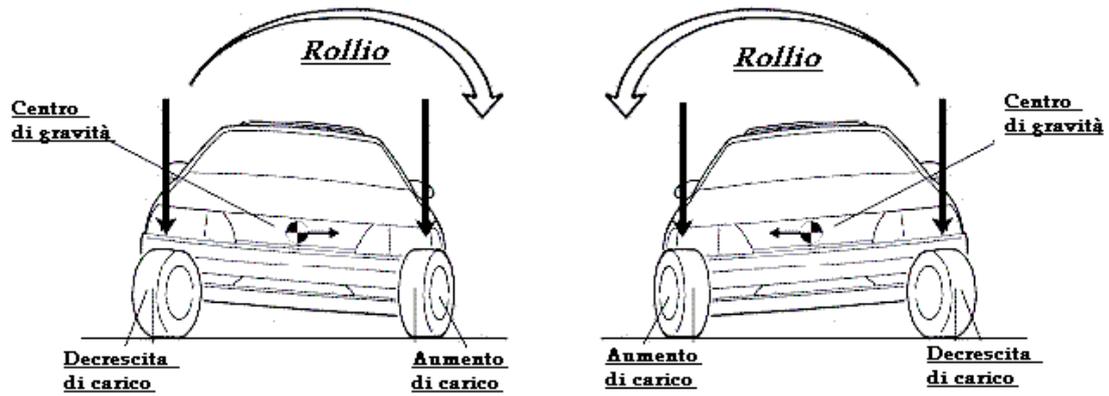


Figura 5.6: Schematizzazione del rollio.

6. PACCHETTI AERODINAMICI

L'obiettivo di un pacchetto aerodinamico efficiente è quello di incrementare la downforce cercando contemporaneamente di ridurre per quanto sia possibile il drag. Sebbene un kit base sia composto da ali anteriore, posteriore e fondo; si possono trovare molto spesso anche ulteriori appendici che prendono il nome di generatori di vortici, turbolatori e deflettori, che hanno il compito di veicolare il flusso al meglio lungo il corpo vettura.

6.1 IL FONDO

La parte più importante, poiché è quella che riesce a sviluppare più downforce possibile con un minimo incremento di drag, quindi con un'efficienza molto alta, è il fondo.

Quest'ultimo, se ben progettato, sfrutta una condizione fluidodinamica che prende il nome di effetto Venturi. Per spiegare questo fenomeno è opportuno introdurre il tubo di Venturi (Figura 6.1).

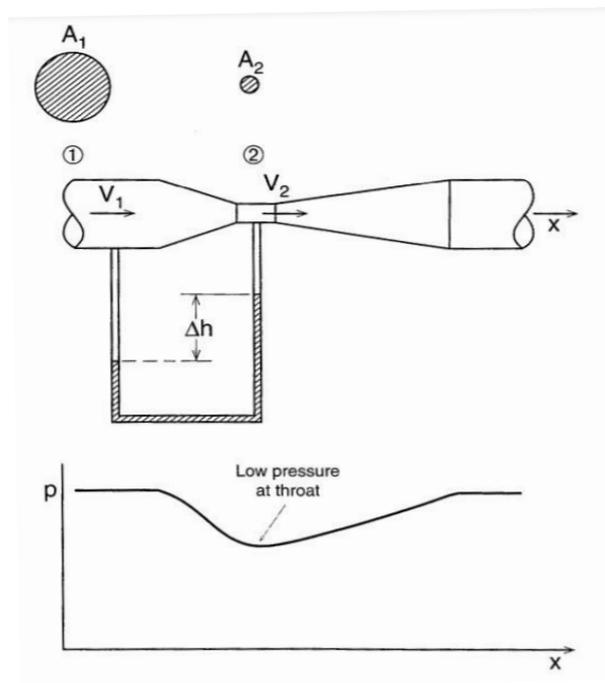


Figura 6.1: Tubo di Venturi e andamento della pressione al suo interno.

Esso consiste in un tubo a sezione non costante che presenta una restrizione al centro. Per la legge di conservazione della massa, la portata di flusso che attraversa la sezione “A₁” dovrà essere uguale a quella che attraversa la sezione “A₂”, definita nel seguente modo:

Eq. 10:

$$Q = \rho AV$$

Con:

ρ : densità del fluido

A: sezione del tubo

V: velocità del fluido

Potremo dunque uguagliare le due portate nelle due sezioni:

Eq. 11:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

Che rielaborata diventa:

Eq. 12:

$$V_1 = \frac{A_2}{A_1} V_2$$

Essendo $A_2 < A_1$ il rapporto avrà un risultato minore di 1, quindi a sua volta, V_1 risulterà minore di V_2 . Da questo, riprendendo in esame l'equazione di Bernoulli, si può giungere alla conclusione che ad una velocità minore corrisponderà una pressione maggiore e viceversa, per cui nella sezione “A₂” avremo un condotto in depressione rispetto alla sezione “A₁”.

Questo fenomeno è sfruttabile anche su un veicolo da corsa (Figura 6.2), utilizzando un fondo a profilo alare caratterizzato da una sezione convergente/divergente. Tuttavia,

quella che si genera tra l'asfalto ed il fondo non è una condotta chiusa, per cui, c'è necessità di sigillarla, per evitare la comunicazione tra zone a pressioni differenti, utilizzando delle appendici che prendono il nome di minigonne e vanno a contatto diretto con l'asfalto sfruttando il così detto effetto suolo. Questi dispositivi nel 1983 furono banditi per decisione della FIA in Formula 1, poiché, se per caso il carico aerodinamico veniva a mancare improvvisamente, per usura delle minigonne o perché queste non riuscivano a seguire perfettamente il profilo dell'asfalto, la vettura si trovava a percorrere una curva a velocità troppo elevata per la sola aderenza degli pneumatici, con inevitabili uscite di strada a velocità molto elevate.

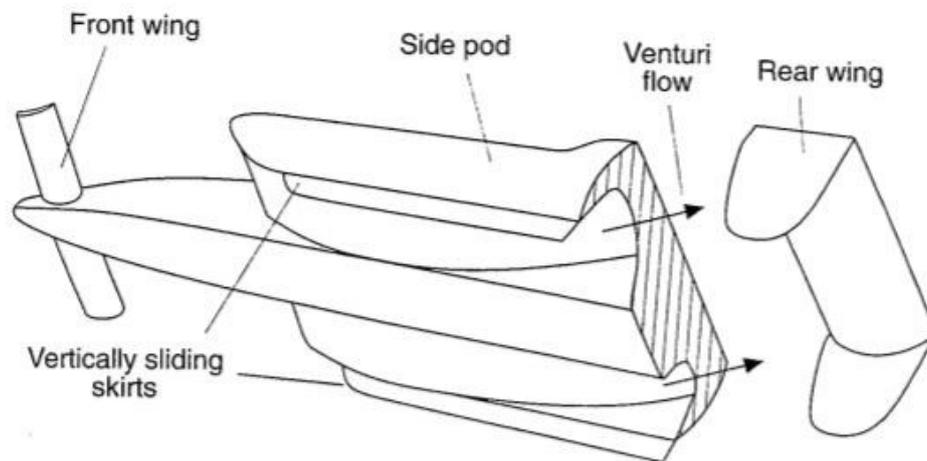


Figura 6.2: Fondo che sfrutta l'effetto Venturi.

6.2 LE ALI

Per quanto riguarda la comprensione del pacchetto alare, occorre iniziare ad analizzare le caratteristiche di una sezione su due dimensioni di un profilo generico in modo da evidenziarne i parametri caratteristici (Figura 6.3).

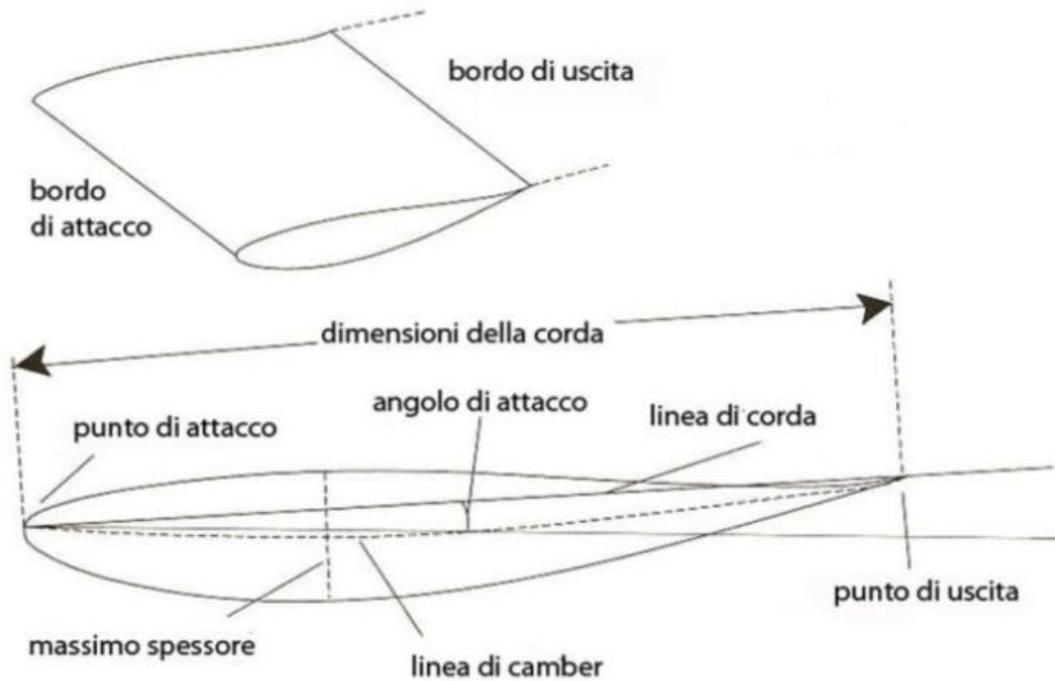


Figura 6.3: Caratteristiche principali di un profilo alare.

Per corda alare si intende il segmento che unisce il punto di entrata ed il punto di uscita. Gli spessori minimo e massimo sono espressi in rapporto alla lunghezza della corda.

L'angolo di attacco, o di incidenza, è definito come l'angolo compreso tra la corda alare e la direzione del flusso d'aria che investe l'ala. Questo importante parametro definisce l'efficienza e la regolazione dell'ala.

Lo scheletro del profilo è la linea media che passa dai centri di tutte le circonferenze inscritte nel profilo alare (tangenti alla linea del dorso e del ventre).

Il camber definisce la curvatura della linea media del profilo. Viene quantificato mediante un rapporto: l'altezza massima del dorso sulla corda alare e la lunghezza della corda alare stessa. Più è alto questo valore, maggiore sarà il camber del profilo alare, cioè la curvatura del profilo.

L'allungamento alare, detto anche aspect ratio, viene ricavato dal rapporto tra la larghezza dell'ala e la sua corda.

Inoltre, si possono identificare tre principali categorie di profilo alare:

- Concavo/convesso: caratterizzato da una curvatura con la parte centrale più in alto della punta di attacco e uscita.
- Piano convesso: il dorso del profilo è caratterizzato da una superficie convessa mentre il ventre risulta piatto.
- Biconvesso: questi tipi di profili, possono essere simmetrici o asimmetrici. Nel primo caso dorso e ventre hanno simmetricamente la stessa curvatura rispetto alla corda alare. Nel secondo caso si avranno le stesse caratteristiche ma il profilo non presenterà una simmetria rispetto alla corda alare.

La regolazione delle prestazioni di un pacchetto aerodinamico alare può essere effettuata in diversi modi. Uno dei più semplici è la modifica dell'angolo d'attacco, poiché è un tipo di regolazione che non implica la ricostruzione del kit, perciò, è la più utilizzata. Inoltre, il C_l varia linearmente con l'angolo d'attacco a meno di distacchi del flusso, in quel caso il suo valore crolla vertiginosamente (Figura 6.4).

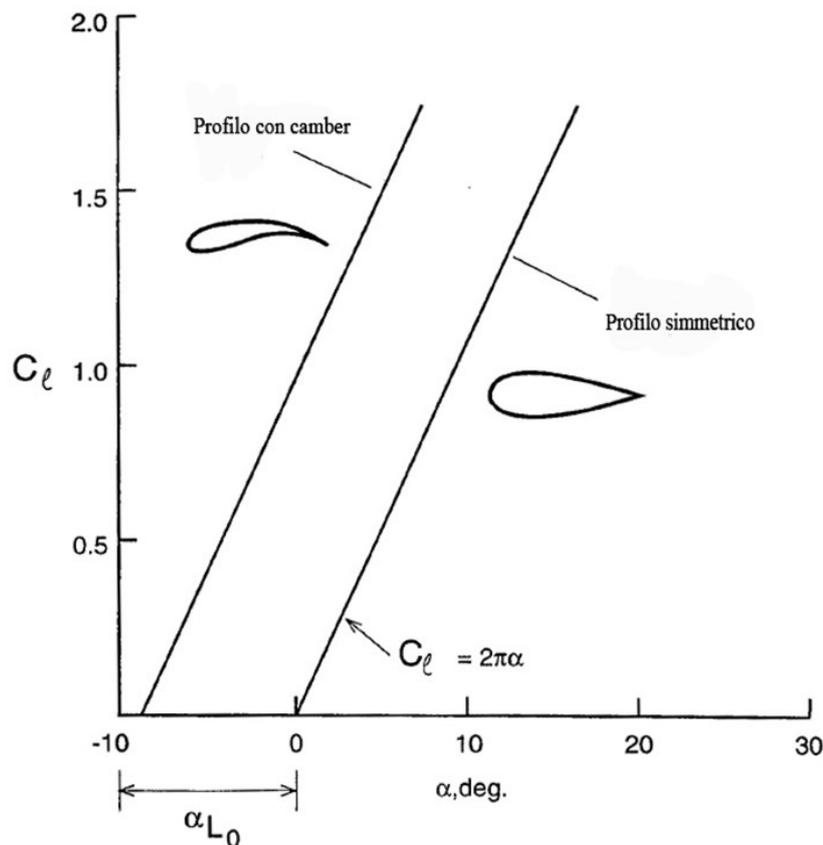


Figura 6.4: Andamento del C_l al variare dell'angolo d'attacco e del camber del profilo.

Un'altra possibilità per modificare le prestazioni di un profilo alare è quella di variare il suo camber; infatti, si può affermare che a parità di un determinato angolo di attacco, un profilo caratterizzato da un camber maggiore avrà a sua volta un C_l maggiore. Questo tipo di regolazione può essere effettuata aggiungendo dei flap (Figura 6.5) alla geometria alare che faranno variare la corda dell'ala complessiva e di conseguenza varierà anche il camber. Questo tipo di regolazione è spesso utilizzata negli aeromobili, infatti, nelle fasi di decollo e atterraggio estendono i flap, attraverso dei meccanismi elettro-attuati, in modo da aumentare la portanza anche a velocità più basse. Sono consentiti, a seconda del profilo, valori massimi sia del camber che dell'angolo d'attacco che se venissero superati porterebbero al distacco del flusso e ad un conseguente calo drastico del C_l .



Figura 6.5: Sistema alare con flap.

Per incrementare le performance di un profilo alare possono essere utilizzati degli elementi aggiuntivi. I generatori di vortici (Figura 6.6), possono essere dei piccoli elementi a forma di profilo alare oppure essere caratterizzati da geometrie più complesse. Spesso questi elementi sono leggermente più alti dello strato limite locale ed hanno lo scopo di energizzare il flusso per ritardare la separazione del flusso. In questo modo è possibile ridurre il drag.

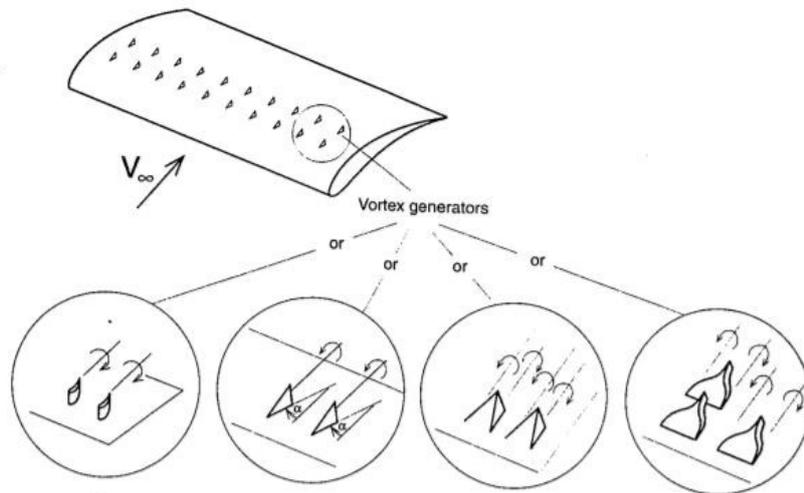


Figura 6.6: Raffigurazione dei generatori di vortici.

Il Gurney flap (Figura 6.7) viene frequentemente utilizzato sulle auto da corsa ma di recente si è vista la sua applicazione anche sugli aeromobili. Esso forma un angolo di 90° con la superficie dell'ala e spesso la sua altezza è circa il 5% della corda alare. Viene applicato al bordo dell'uscita alare e serve ad aumentare la deportanza a fronte di un piccolissimo aumento della resistenza, aggiungendo una componente verticale alla velocità del flusso sul bordo d'uscita. Inoltre, è in grado di generare due vortici controrotanti, nella zona anteriore e posteriore ad esso, che causano una caduta di pressione aiutando a far rimanere attaccato il flusso, consentendo di raggiungere maggiori angoli d'attacco senza andare in contro allo stallo.

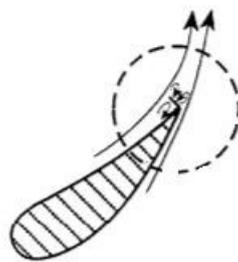


Figura 6.7: Funzione del Gurney flap.

Gli endplates sono dei dispositivi che hanno uno scopo simile a quello delle minigonne per il fondo, viste in precedenza, ovvero mantenere la differenza di pressione che esiste tra la zona superiore ed inferiore della superficie alare. Un'ala dotata di questi dispositivi ha quindi come risultato, quello di avere un aspect ratio effettivo maggiore di una che ne è sprovvista, poiché aumenta la superficie alare che lavora correttamente, senza perdere depressione da un lato e sovrappressione dall'altro. Come diretta conseguenza, gli endplates, sono in grado di ridurre i vortici d'ala d'estremità (Figura 6.8) che sono responsabili dell'aumento della resistenza all'avanzamento.

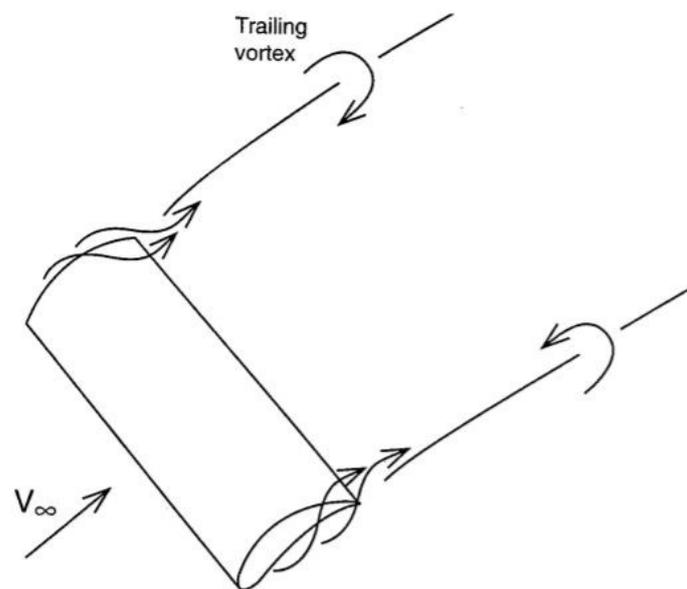


Figura 6.8: Vortici d'ala d'estremità.

7. IMPOSTAZIONE ANALASI FLUIDODINAMICA “CFD”

Il programma utilizzato all'interno del Polimarche Racing Team per le simulazioni di fluidodinamica computazionale è STAR-CCM+, un prodotto di Siemens che tra l'altro, è un partner del team. Le simulazioni presenti in questa tesi sono state effettuate con il computer di squadra che presenta le seguenti caratteristiche:

- CPU: Intel Core i9-10900K 3.70 GHz
- Memoria RAM: 64 GB
- GPU: NVIDIA Quadro RTX4000 x2

Nonostante le prestazioni elevate, nell'approccio di simulazioni CFD, è quasi sempre opportuno cercare di semplificare per quanto possibile, il modello da importare nel software di calcolo rimuovendo le parti che non hanno impatto a livello aerodinamico o comunque che ne hanno in maniera trascurabile, in modo da ottenere una mesh più leggera, riducendo di conseguenza il tempo richiesto per ottenere la soluzione.

Il primo passo per la preparazione delle simulazioni è quello di modificare il disegno 3D, nel nostro caso con SolidWorks 2017) della P4 Evoluzione passando da quello complessivo di tutti i componenti della vettura (Figura 7.1) ad uno semplificato ed ottimizzato per il software CFD (Figura 7.2).

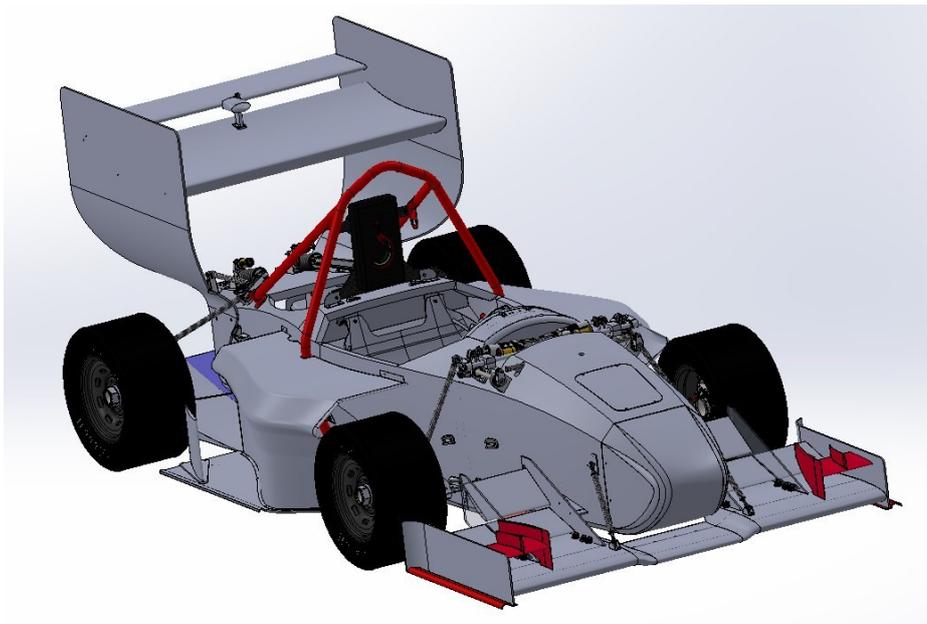


Figura 7.1: Disegno 3D completo della P4 Evoluzione.

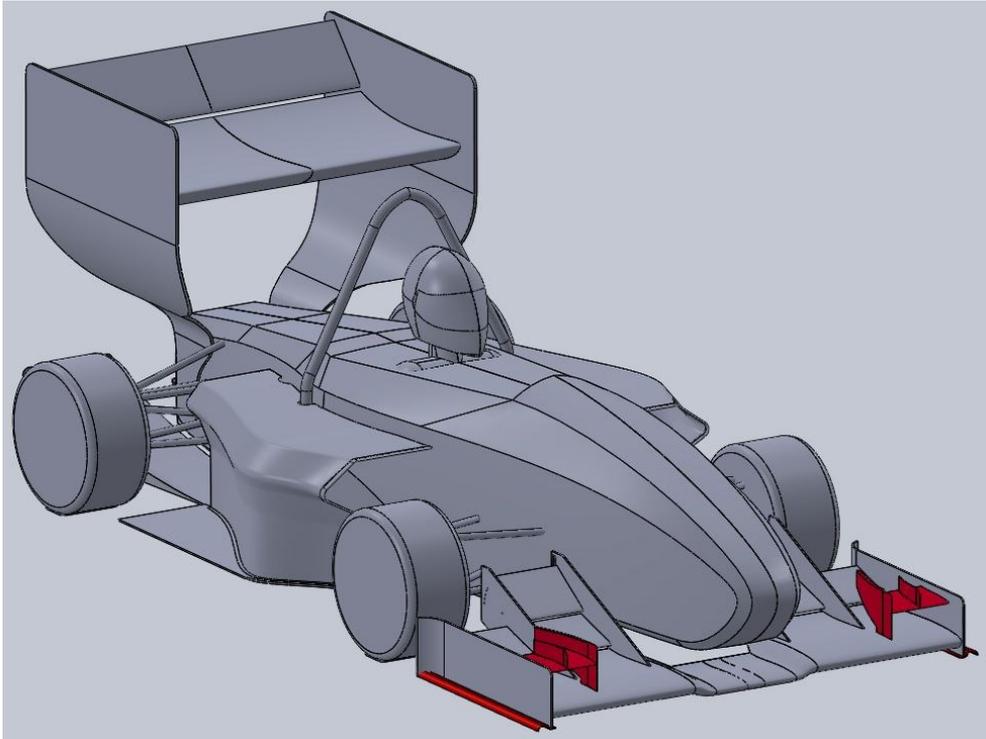


Figura 7.2: Disegno 3D semplificato della P4 Evoluzione.

Il vano motore è stato chiuso seguendo la sagoma del telaio, insieme all'apertura per l'ingresso del pilota. Inoltre, è stato aggiunto un modello di un manichino per vedere l'andamento del flusso con la presenza del casco. Un'altra modifica importante è stata quella di trattare le ruote come cilindri completamente chiusi per non creare particolari problemi con la discretizzazione del modello, poiché si sarebbe dovuta infittire la mesh notevolmente, senza particolari giovamenti sui risultati finali.

Successivamente l'auto del cad semplificata viene divisa secondo il piano di simmetria in modo tale da effettuare i calcoli su una sola metà, se le condizioni della simulazione sono simmetriche, quindi dimezzare il tempo di risoluzione del problema ed importata in STAR-CCM+ in formato Parasolid (.x_t) (Figura 7.3).

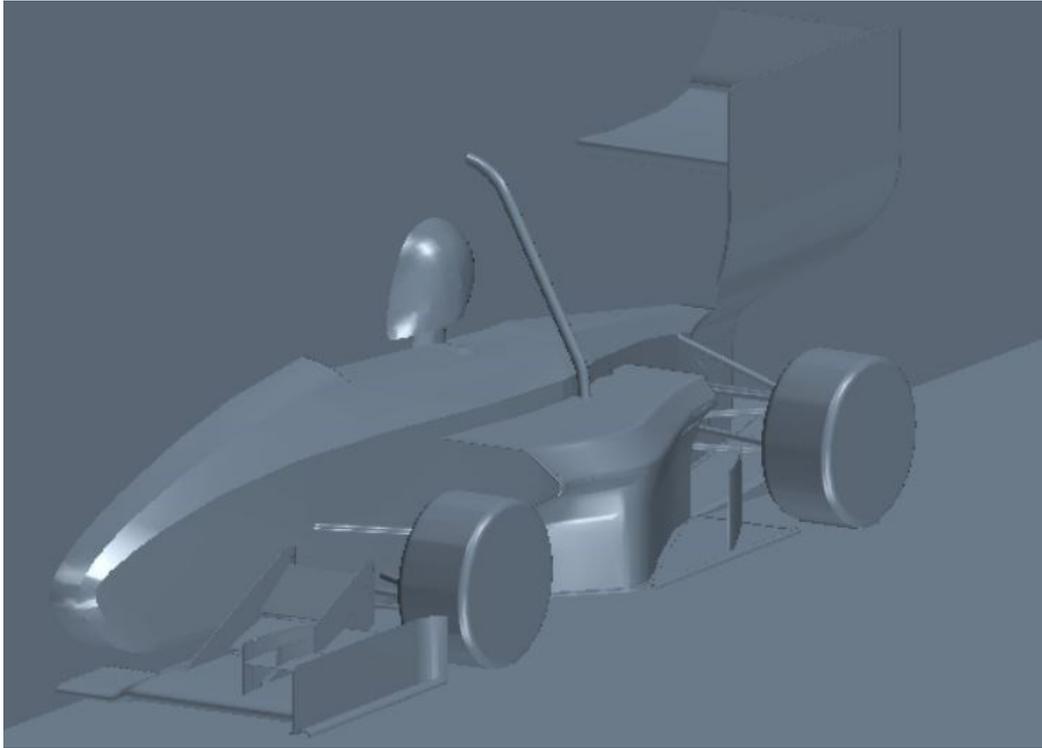


Figura 7.3: Importazione di metà auto in STAR-CCM+.

L'importazione del modello in formato Parasolid (.x_t) ci permette di avere una superficie unica per ogni parte dell'auto che poi andremo a differenziare in diverse macrocategorie per ottenere risultati differenziati per ognuna di loro.

Particolare attenzione va dedicata al modo in cui viene definito il contatto tra le ruote dell'auto ed il fondo del dominio, ovvero l'asfalto. Sulla superficie dello pneumatico che dovrà andare a contatto, in fase di modellazione, viene aggiunto un tallone (Figura 7.4) che poi nella definizione del dominio, si dovrà fare attenzione ad intersecare in modo da simulare la deformazione della ruota sotto l'effetto del peso dell'auto stessa.

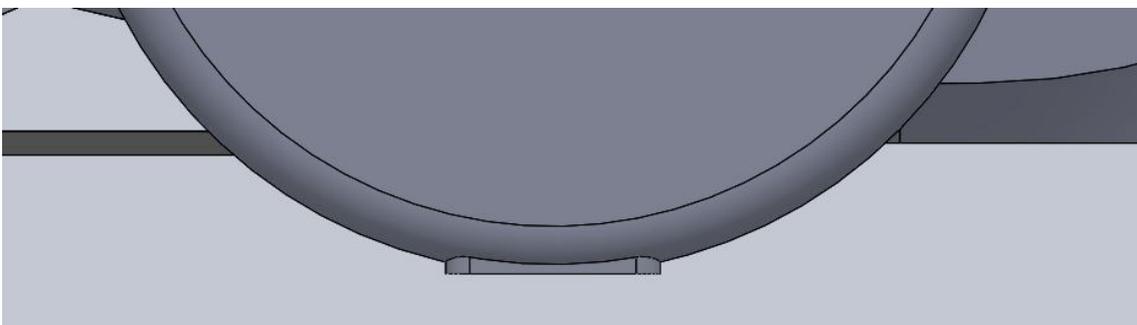


Figura 7.4: Tallone sulla parte inferiore dello pneumatico per simulare contatto.

7.1 DOMINIO DI CALCOLO

Il dominio di calcolo che viene definito nella simulazione, rappresenta il volume di fluido, nel nostro caso aria, che avvolge ed investe l'auto. È rappresentato da un parallelepipedo con determinate dimensioni che ci sono state fornite dalla stessa Siemens, proporzionali agli ingombri della macchina nelle tre direzioni, per ottenere dei risultati quanto più affidabili possibili (Figura 7.5).

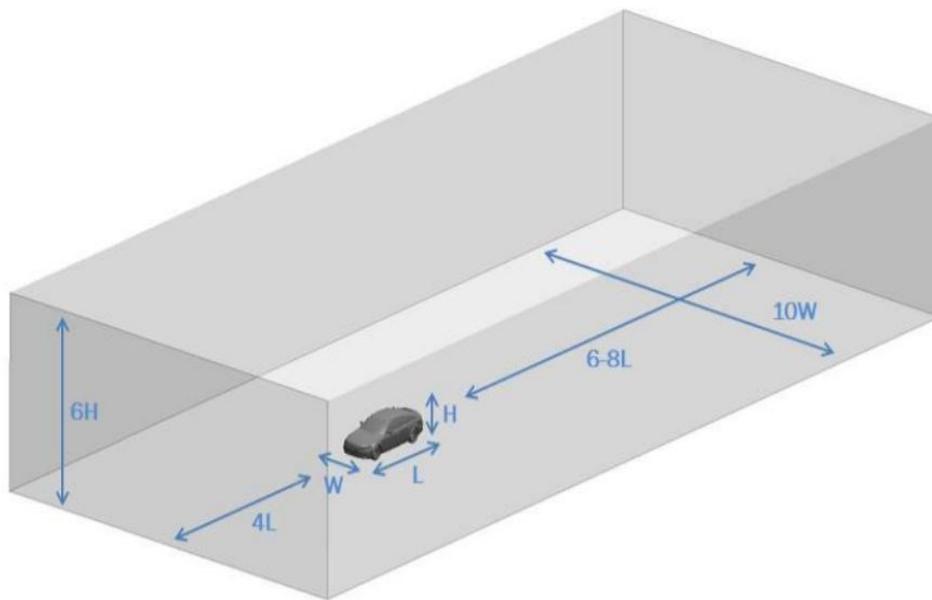


Figura 7.5: Dimensioni caratteristiche del dominio fluido.

La distanza tra il muso dell'auto e la parte frontale del dominio deve essere pari a quattro volte la lunghezza dell'auto, mentre, lo spazio che intercorre tra la parte posteriore dell'auto e la fine del volume deve essere pari a circa sei/otto volte la lunghezza dell'auto. Per quanto riguarda l'altezza del parallelepipedo, deve essere pari a sei volte l'altezza dell'auto. La larghezza invece sarà pari a dieci volte la carreggiata del veicolo, se si parla di simulazioni simmetriche, quindi effettuate con metà auto, ovviamente basterà la metà della larghezza del dominio. Le dimensioni sono così elevate in modo tale da evitare che il flusso dell'aria attorno al veicolo non venga alterato, generando carichi aerodinamici non corretti.

Nelle simulazioni fluidodinamiche di questo tipo, non è il corpo a muoversi nel fluido, come nella realtà dove l'aria è sostanzialmente ferma e l'auto muovendosi all'interno di essa riuscirà a generare le forze fluidodinamiche, ma sarà quest'ultimo a muoversi intorno al veicolo che rimane fermo generando comunque una velocità relativa tra il corpo vettura ed il fluido stesso.

7.2 SUDDIVISIONE DELLA VETTURA

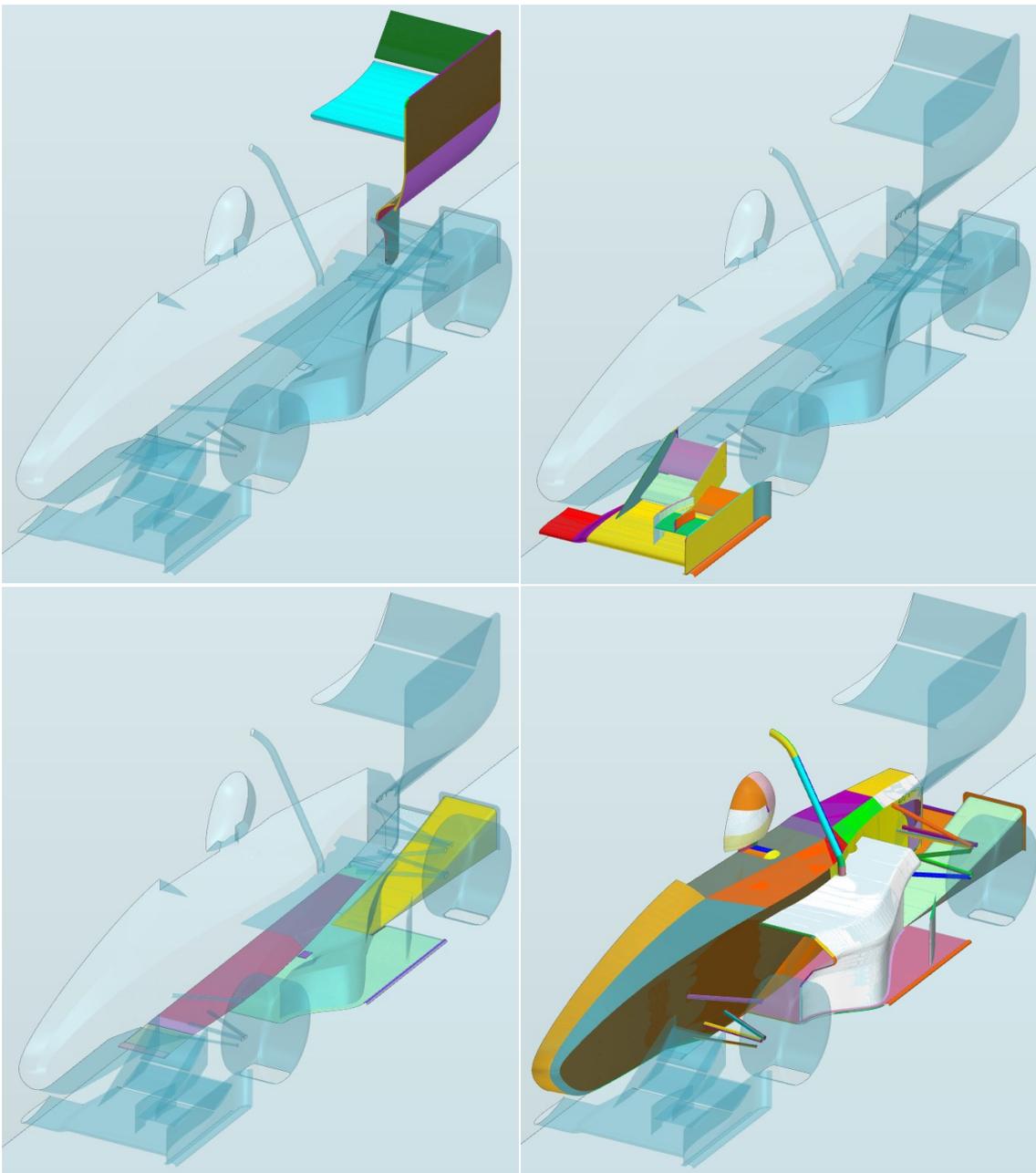
Come primo passo, la vettura è stata suddivisa in diverse parti in modo da ottenere una discretizzazione più regolare delle superfici e riuscire a stimare il contributo aerodinamico, sia di deportanza che di resistenza all'avanzamento, di ognuna di esse in modo più specifico. In questo modo, inoltre, avendo a che fare con parti dell'auto che hanno dimensioni e raggi di curvatura differenti, è possibile infittire la mesh dove serve e alleggerirla dove le superfici sono più facili da discretizzare in modo da evitare appesantimenti inutili del solutore. Le parti nelle quali è stata suddivisa la vettura sono (Figura: 7.6):

- Ala posteriore
- Ala anteriore
- Fondo
- Macchina
- Ruota anteriore
- Ruota posteriore

La parte denominata "Macchina" comprende tutta la superficie del telaio, i braccetti delle sospensioni, le pance, la parte superiore del fondo, il casco del pilota e il main hoop.

È stata applicata anche una suddivisione delle facce più esterne del dominio in modo da assegnare particolari condizioni al contorno ad ognuna di esse, nel seguente modo (Figura 7.7):

- Ingresso del volume fluido
- Uscita del volume fluido
- Parete che comprende soffitto e quella alla sinistra dell'auto
- Parete di simmetria



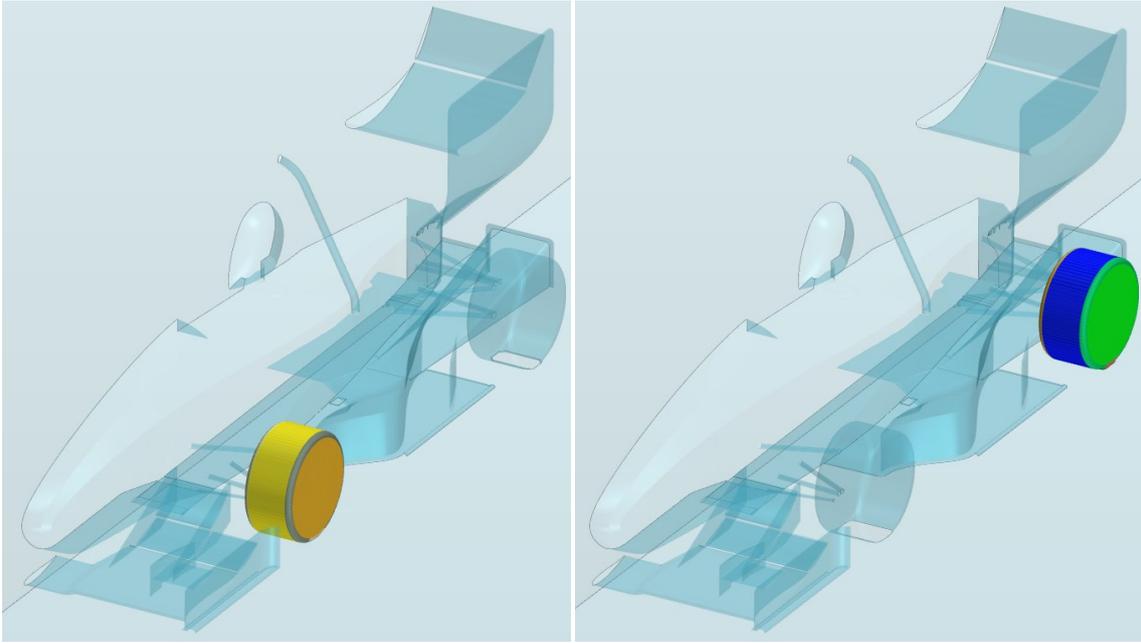
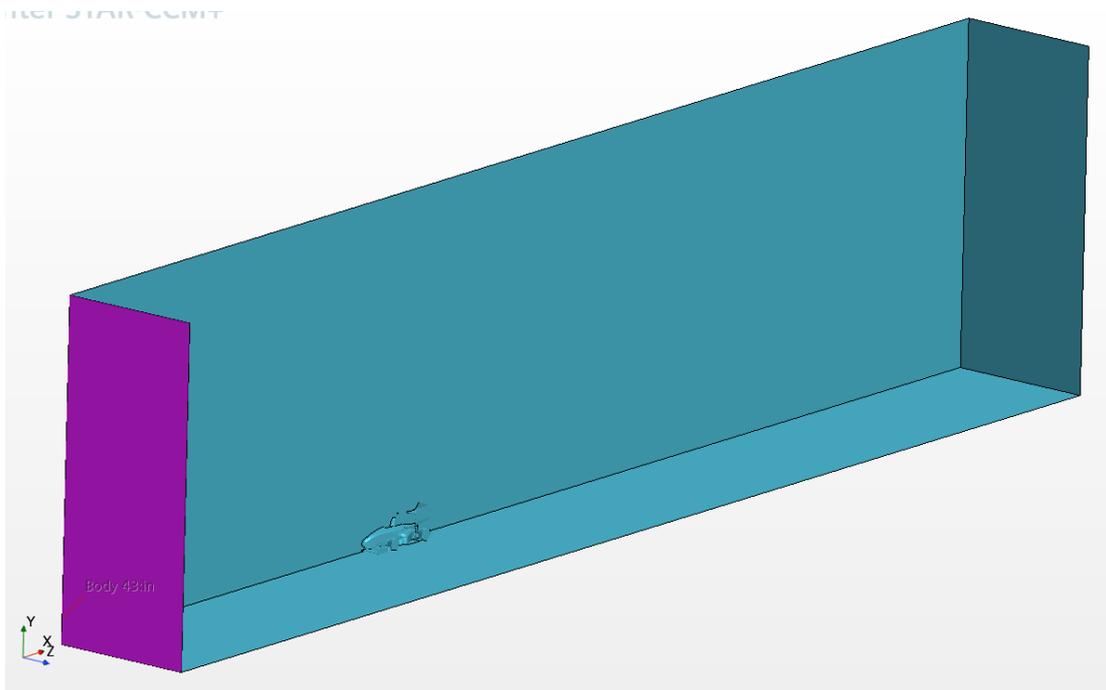
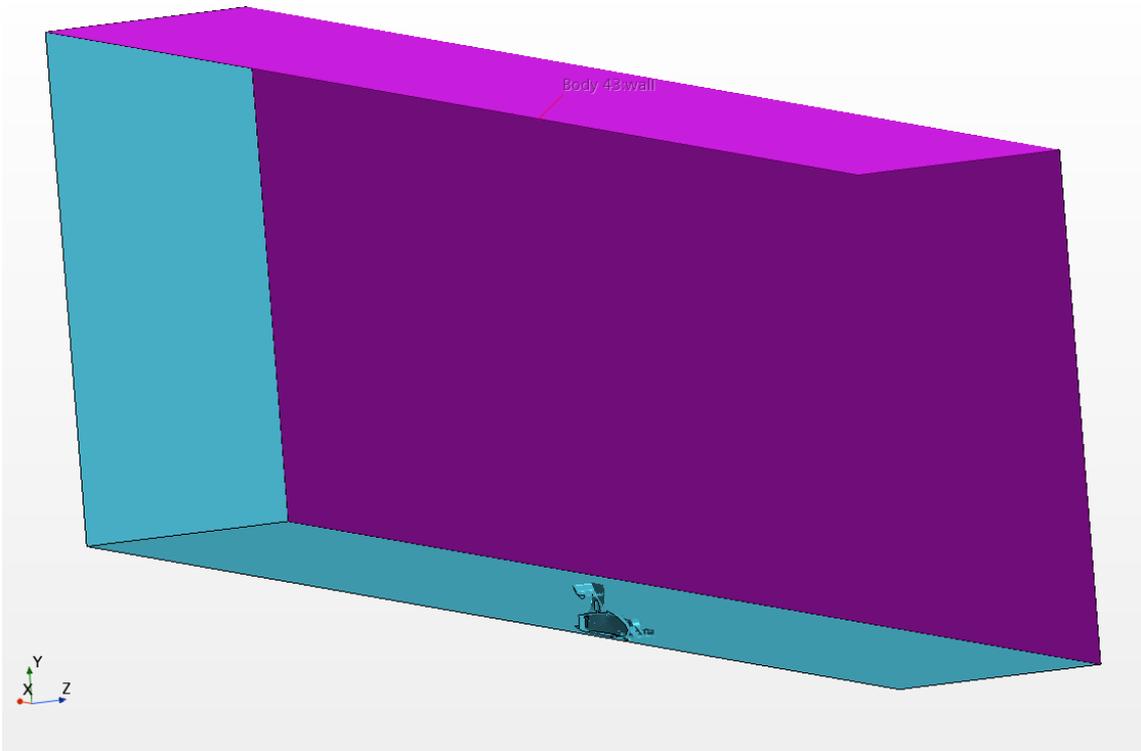
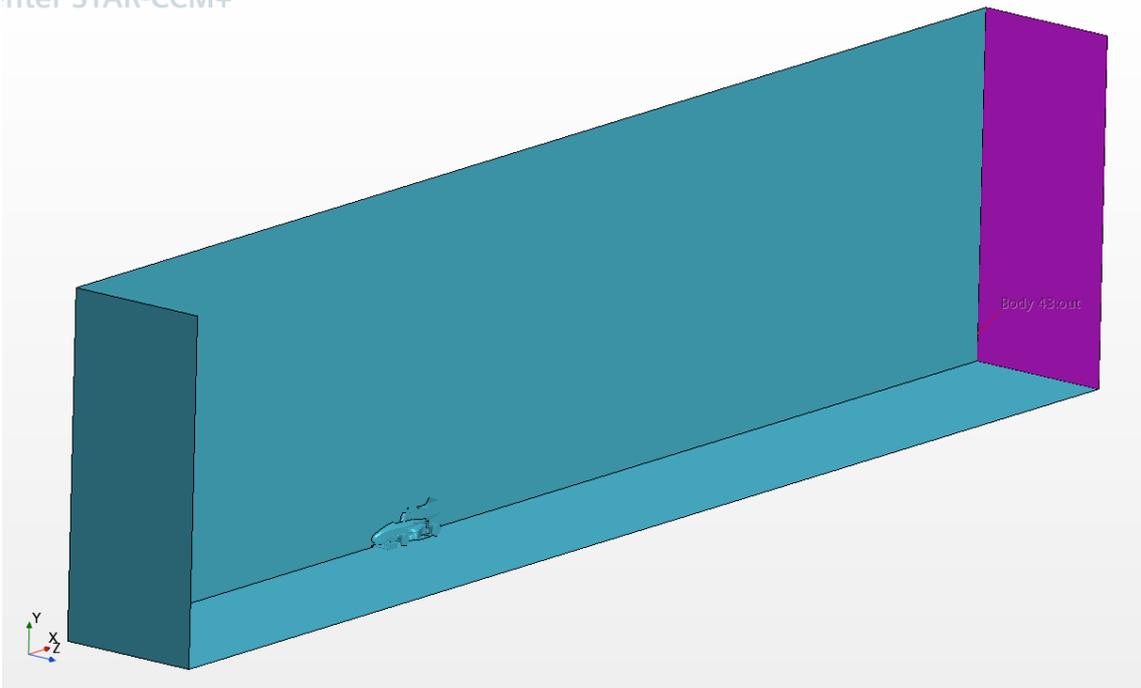


Figura 7.6: Suddivisione delle superfici dell'auto.





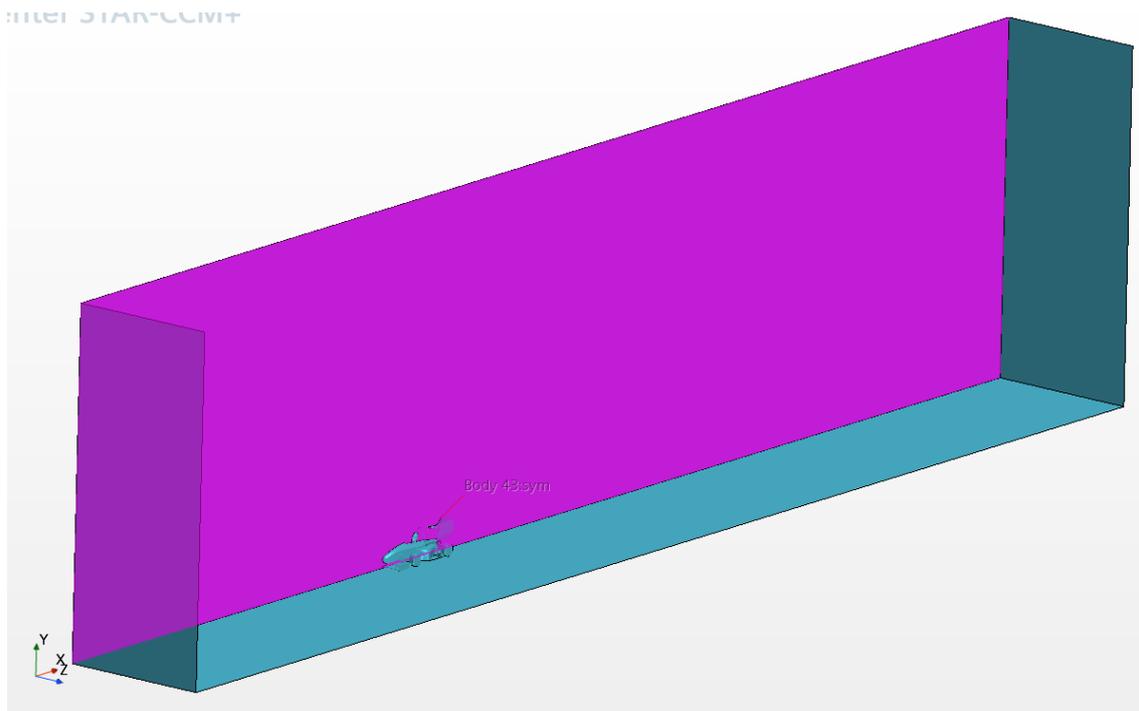


Figura 7.7: Suddivisione delle pareti del dominio.

7.3 SURFACE WRAPPER

Il surface wrapper, su STAR-CCM+, può essere definito come una mesh di superficie ed è molto utile per simulare i flussi attorno ad un corpo se caratterizzato da un elevato numero di dettagli o comunque se si parla di geometrie complesse. Utilizzando questa funzione il corpo della vettura in esame viene suddiviso in una griglia superficiale, che a seconda dei settaggi sarà caratterizzata da un numero più o meno elevato di elementi e questo processo in maniera del tutto automatica.

I valori sui quali si agisce principalmente per definire la qualità del surface wrapper sono:

- Base size: è una dimensione che si riferisce agli elementi della griglia che discretizzerà la superficie. È comodo definirla in modo tale che tutte gli altri valori caratteristici della mesh di superficie possano essere definiti relativi ad essa in percentuale.
- Target surface size: questo valore specifica la lunghezza del bordo dell'elemento della griglia che si vuole ottenere, se non vengono applicate ulteriori rifiniture

della mesh con altre impostazioni. Può essere definito in percentuale della “base size” o come valore assoluto.

- **Minimum surface size:** questo valore specifica il valore minimo che può raggiungere la lunghezza del bordo dell’elemento della griglia che si vuole ottenere. Anche questo valore può essere definito in percentuale della “base size” o come valore assoluto. La riduzione della dimensione minima della superficie consente una maggiore rifinitura nelle regioni in cui viene assegnata; tuttavia, questo perfezionamento aumenta i tempi di calcolo.
- **Surface curvature (Pts/circle):** specifica il numero di triangoli (per una mesh di superficie) o di celle (per una mesh di volume) utilizzati per definire una superficie cilindrica a 360°. In altre parole, in quanti spigoli deve essere suddivisa una superficie curva.

I valori utilizzati, a partire da un “base size” pari a 12 mm in queste simulazioni sono stati:

COMPONENTE	TARGET SURFACE SIZE	MINIMUM SURFACE SIZE	SURFACE CURVATURE
unità di misura	% della base size	% della base size	Pts/circle
MACCHINA	32	10	120
ALA ANTERIORE	15	3	120
ALA POSTERIORE	15	3	120
FONDO	15	3	120
ASFALTO	100	3	-
PARETI RESTANTI DEL DOMINIO	400	3	36

Tabella 7.1: Valori utilizzati per la mesh di superficie.

Dopo aver effettuato il surface wrapper (Figura 7.8) è comunque possibile che qualche elemento che costituisce la griglia che va a discretizzare le superfici, non rispecchi le condizioni desiderate. In tal caso è possibile utilizzare uno strumento che prende il nome di “repair surface” che permette, tramite diverse funzioni sia automatiche che manuali, di andare a modificare e correggere gli elementi indesiderati.

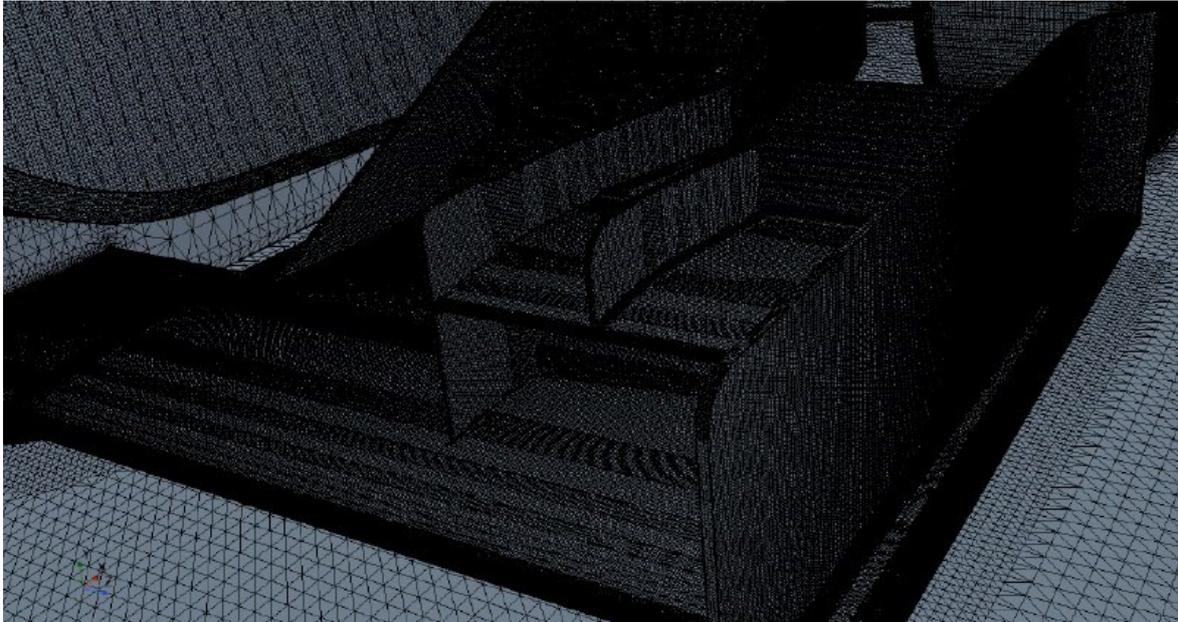


Figura 7.8: Risultato visivo del surface wrapper su una porzione dell'ala anteriore.

7.4 MESH VOLUMETRICA

Dopo aver effettuato la discretizzazione delle superfici della vettura con una mesh di tipo superficiale, si procede con la mesh volumetrica che ha lo scopo di suddividere tutto il dominio fluido in elementi discreti ai quali si possono assegnare le caratteristiche che si vogliono ottenere tramite i settaggi della funzione “automated mesh”.

Lo sviluppo della mesh di volume inizia comincia dalla base di quella superficiale, partendo dalle celle più fitte che si trovano sulla superficie del corpo in analisi, estendendosi fino alle zone più esterne dove le celle diventano a mano a mano più grandi poiché non avremo nulla da analizzare in quelle zone (Figura 7.9).

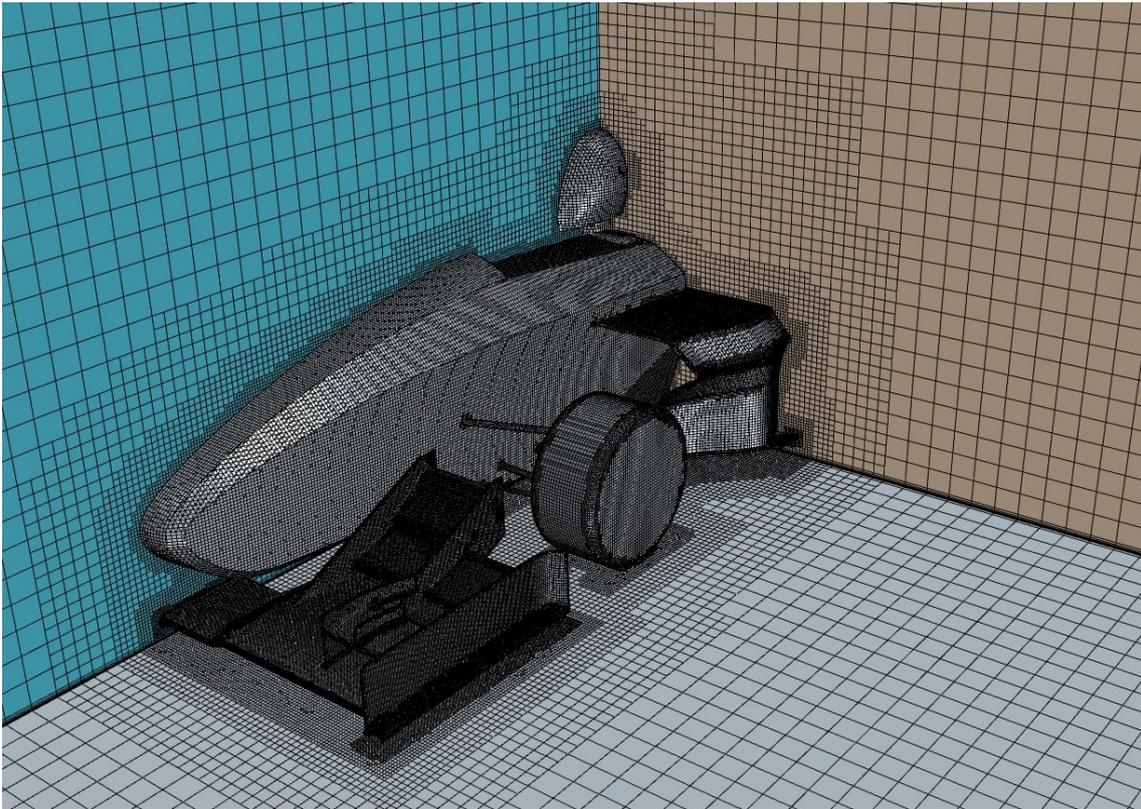


Figura 7.9: Verifica visiva della mesh volumetrica e il suo andamento.

Per infittire di molto la mesh solo nelle zone dove è strettamente necessario al fine di avere dei risultati più affidabili senza allungare di troppo i tempi di calcolo; sono stati definiti dei volumi di controllo, per avere una discretizzazione migliore, di seguito elencati:

- Blocco grande vettura e scia (Figura 7.10)
- Blocco piccolo vettura e scia (Figura 7.11)
- Offset della vettura, tramite le funzioni cad del software di simulazione si riesce a definire una geometria che riprende l'andamento delle superfici dell'auto creandone un offset. (Figura 7.12)
- Blocco uscita pancia ed endplate ala posteriore (Figura 7.13)

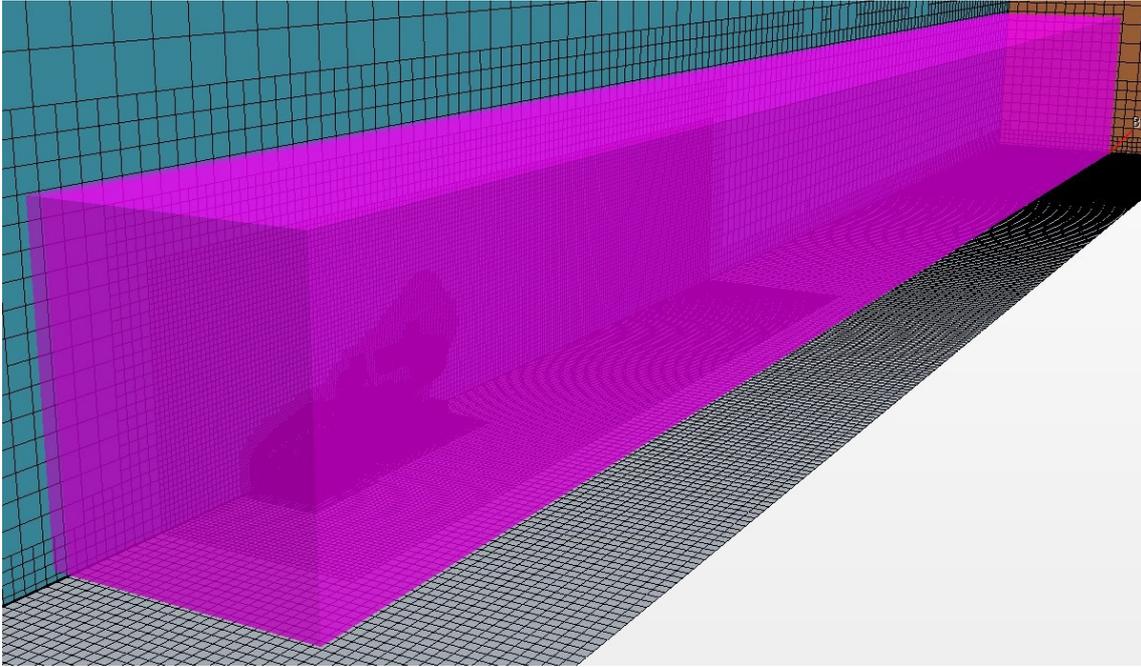


Figura 7.10: Blocco grande vettura e scia.

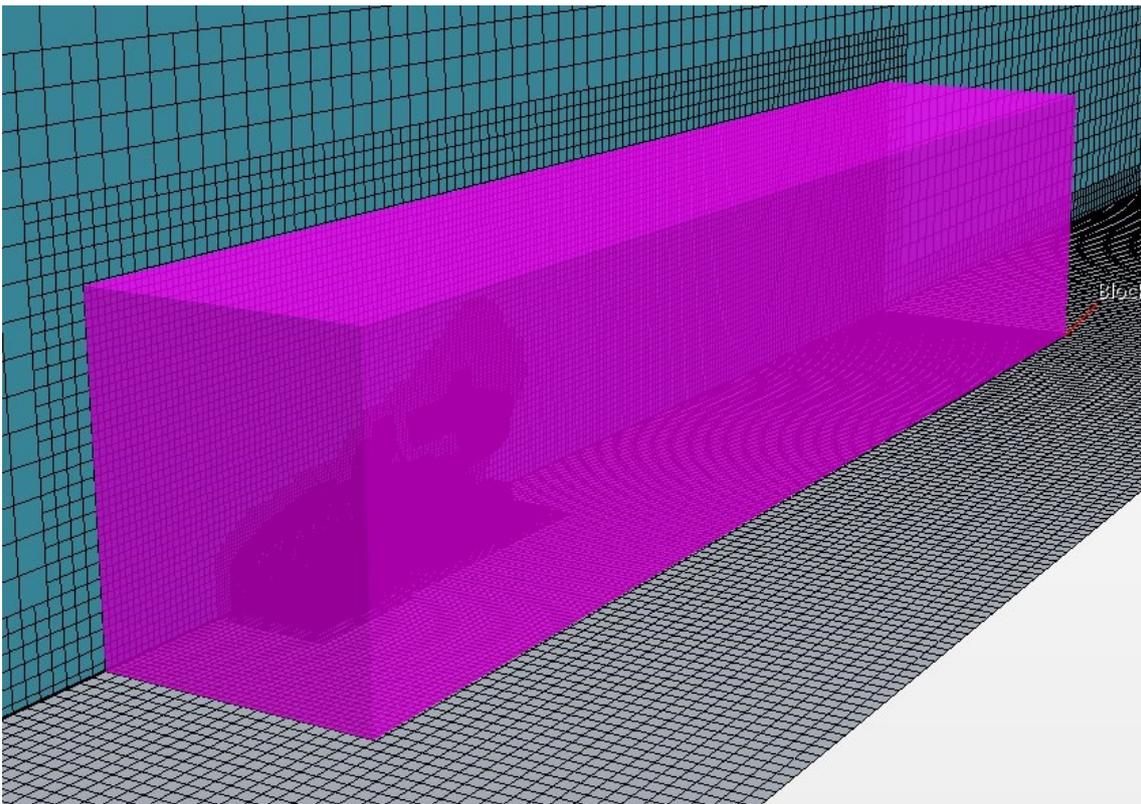


Figura 7.11: Blocco piccolo vettura e scia.

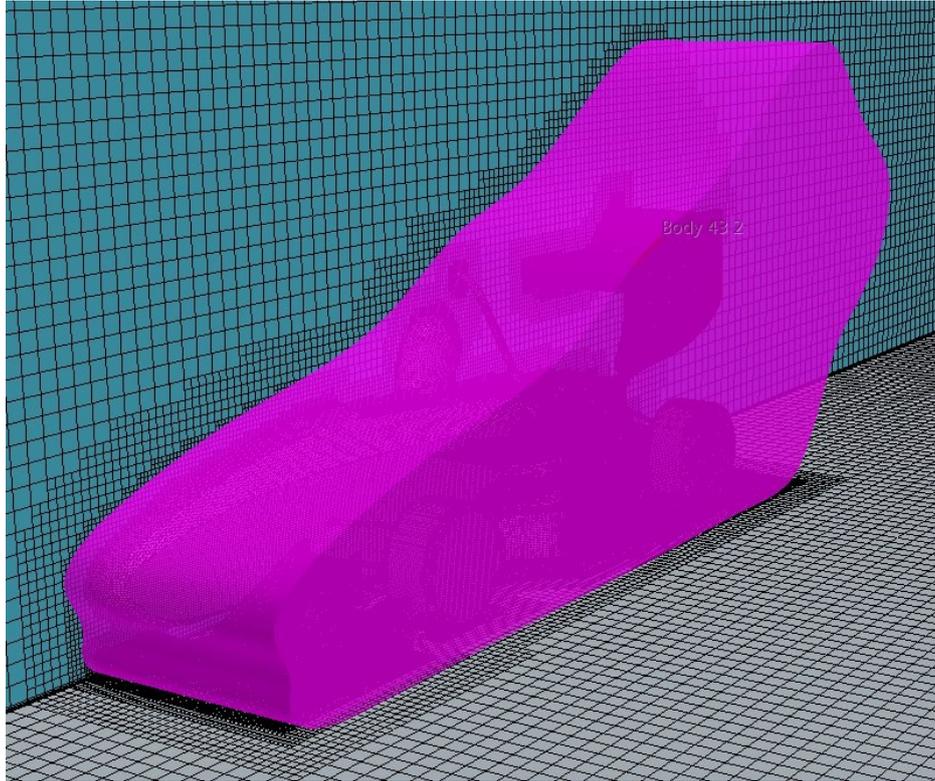


Figura 7.12: Offset della vettura.

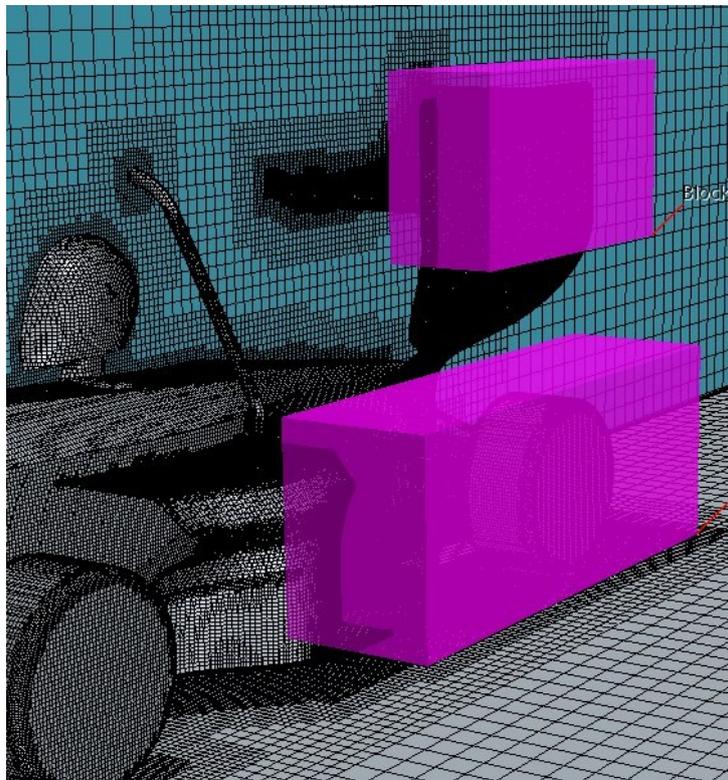


Figura 7.13: Blocco uscita pancia ed endplate posteriore.

Sono state scelte queste zone per infittire la mesh poiché, un elemento da non trascurare nel determinare la soluzione della simulazione è la presenza dello strato limite intorno al corpo della vettura. Ottimizzando in questo modo la discretizzazione del volume e il surface wrapper, dopo diverse simulazioni di prova, si è arrivate a generare un numero di celle pari a circa 8,7 milioni con un tempo di calcolo totale di circa dieci ore.

7.5 CONDIZIONI AL CONTORNO

La simulazione presa come riferimento per l'impostazione è stata eseguita ad una velocità di 16 m/s (circa 60 km/h), valore medio raggiunto nelle prove di autocross e di endurance nella maggior parte dei circuiti di Formula SAE. Non è stato utilizzato lo stesso valore per le altre simulazioni, poiché riguarderanno altre condizioni di utilizzo della vettura: fase iniziale della prova di accelerazione, fase di frenata in fondo ad un rettilineo di un circuito utilizzato nell'autocross o nell'endurance, prova di skidpad.

Le condizioni al contorno definite per le varie superfici esterne presenti nel dominio di volume fluido sono le seguenti:

CONDIZIONI AL CONTORNO DOMINIO		
REGION	CONDIZIONE	SETTAGGIO
SUPERFICIE INGRESSO	VELOCITY INLET	Velocity magnitude = 16m/s Turbulence intensity = 0,01% Turbulent viscosity ratio = 10%
PIANO DI SIMMETRIA	SIMMETRY PLANE	-
SOFFITTO	WALL	No-slip Fixed
PARETE LATERALE	WALL	No-slip Fixed
ASFALTO	WALL	No-slip Vector Relative velocity = 100 kph
SUPERFICIE USCITA	PRESSURE OUTLET	Pressure = 0,0 Pa Turbulence intensity = 0,01% Turbulent viscosity ratio = 10%

Tabella 7.2: Condizioni al contorno superfici esterne del dominio.

Le condizioni al contorno definite per le superfici della vettura presenti nel dominio sono:

CONDIZIONI AL CONTORNO AUTO		
REGION	CONDIZIONE	SETTAGGIO
ALA ANTERIORE	WALL	No-slip Fixed
ALA POSTERIORE	WALL	No-slip Fixed
FONDO	WALL	No-slip Fixed
TELAIO, BRACCETTI	WALL	No-slip Fixed
RUOTE	WALL	No-slip Fixed

Tabella 7.3: Condizioni al contorno superfici della vettura.

7.6 FISICA DELLA SIMULAZIONE

Per i settaggi del modello fisico delle simulazioni è stato necessario fare riferimento a quelli consigliati dai tutorial che riportavano più analogie possibili con la nostra condizione di simulazione. Le ipotesi da rispettare in partenza sono state:

- Modello stazionario.
- Moto del fluido turbolento, la turbolenza viene descritta dal modello “K-Omega turbulence”, utilizzando il trattamento “All y+ Wall”.
- Le grandezze fisiche sono ritenute costanti, in questo modo si può utilizzare il solutore basato sulle equazioni di Navier-Stokes mediate.

Riguardo il secondo punto è opportuno dare una breve descrizione qualitativa del modello di turbolenza K-Omega. Non richiede correzioni nello strato limite, riproduce adeguatamente anche correnti con gradiente di pressione contrario ed in transizione e può essere applicato anche a correnti separate e con ricircolo senza modifiche rispetto al modello base. Questo modello non è però adatto a simulare l'interazione onda d'urto-strato limite e correnti su pareti curve. Inoltre, questo modello cerca di prevedere la turbolenza tramite due equazioni differenziali alle derivate parziali per due variabili, k e ω , con la prima variabile che è l'energia cinetica della turbolenza mentre la seconda è la velocità specifica di dissipazione.

Per il terzo punto invece, Le equazioni di Navier-Stokes mediate (RANS o Reynolds Averaged Navier-Stokes equations), sono equazioni di Navier-Stokes dove le grandezze risultano non più istantanee, ma mediate in un certo periodo di tempo, sufficientemente piccolo rispetto ai fenomeni che si vogliono seguire ma sufficientemente grande rispetto ai disturbi della turbolenza. Per molte applicazioni pratiche, la sola conoscenza delle grandezze medie può essere sufficiente per la soluzione del problema. Questo approccio consente una notevole riduzione dei tempi di calcolo, poiché le scale del moto medio sono molto più grandi di quelle delle fluttuazioni turbolente. In effetti un moto turbolento può essere considerato come la sovrapposizione di un moto medio e di un moto fluttuante nel tempo.

In conclusione, le caratteristiche selezionate nel programma STAR-CCM+ per descrivere la fisica del problema su detto sono (Figura 7.14):

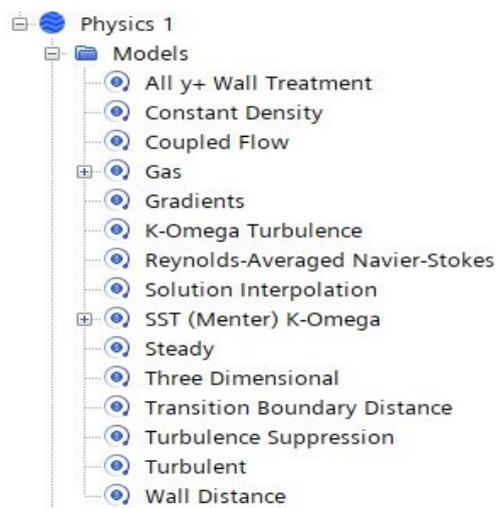


Figura 7.14: Modello fisico in STAR-CCM+.

Le condizioni operative ovviamente sono quelle dell'aria standard (Tabella 7.4).

T	288.15 [K]
ρ	1.225 [Kg/m ³]
μ	1.7894·10 ⁻⁵ [Pa s]
P_{Amb}	101325 Pa

Tabella 7.4: Condizioni aria standard.

8. VISUALIZZAZIONE RISULTATI SIMULAZIONE

Per ottenere i risultati desiderati su STAR-CCM+, è opportuno definire i report delle soluzioni che si vogliono ottenere dalla simulazione. Nel nostro caso le grandezze di interesse da analizzare sono state:

- C_d e C_l complessivi di tutta l'auto.
- Lift e drag dell'insieme delle superfici che comprendo la parte "Macchina".
- Lift e drag del fondo.
- Lift e drag dell'ala anteriore.
- Lift e drag dell'ala posteriore.

8.1 ANALISI CONVERGENZA

Per valutare la bontà del risultato di una simulazione fluidodinamica è opportuno valutare un ulteriore monitor, quello dei residui che rappresentano le variazioni normalizzate delle variabili tra due successive iterazioni (Figura 8.1).

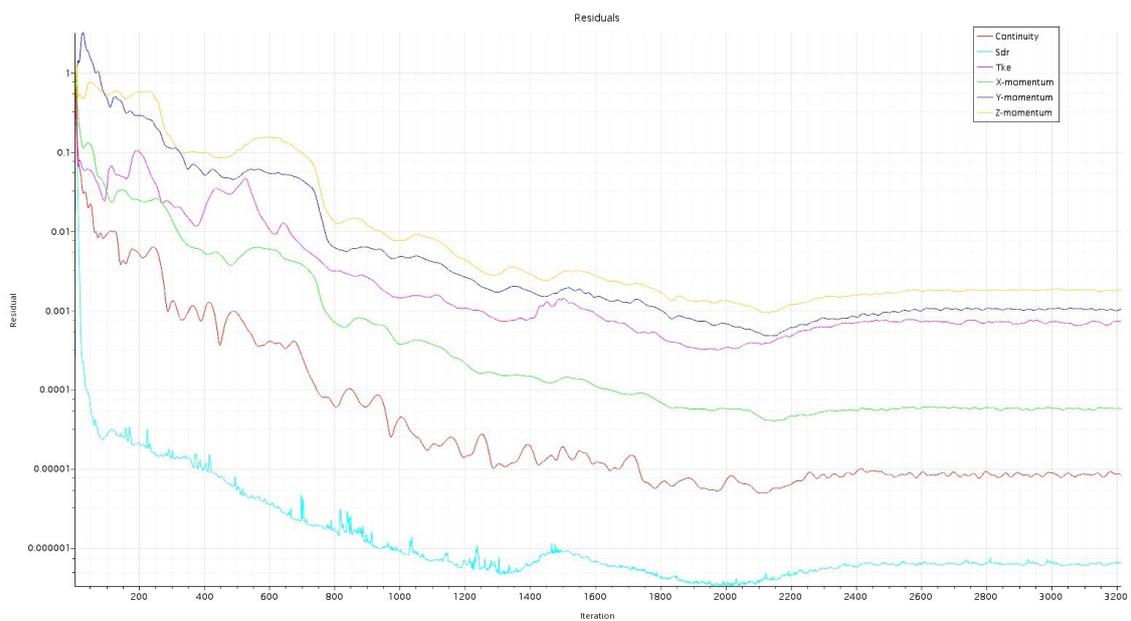


Figura 8.1: Andamento dei residui.

Le considerazioni fatte sui residui possono essere ripetute anche per quando riguarda l'andamento dei risultati ottenuti dai vari report definiti in precedenza.

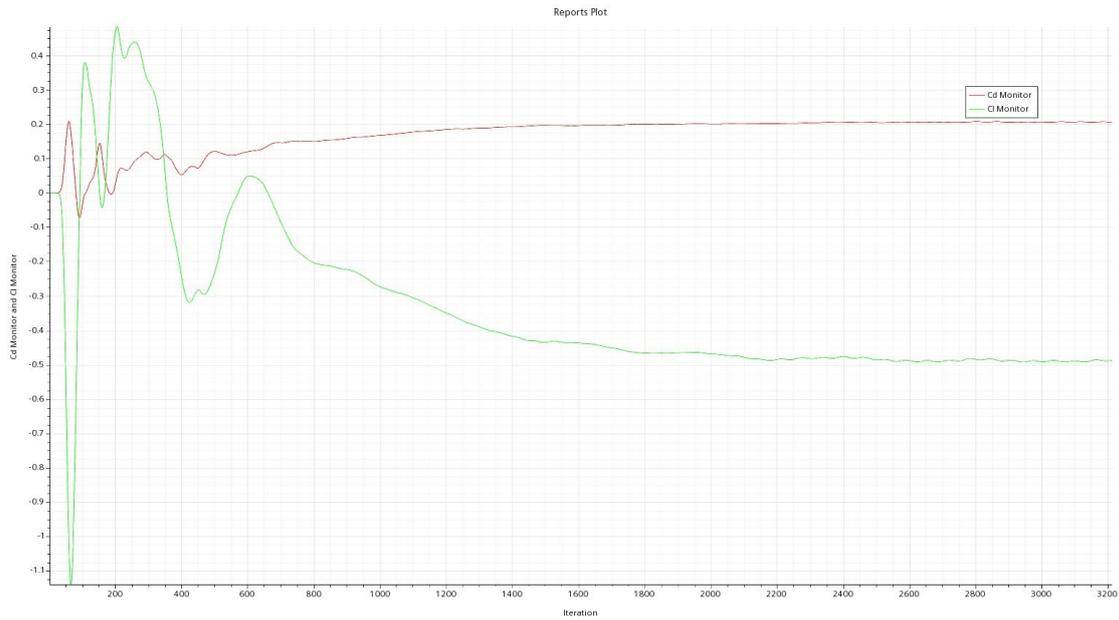


Figura 8.2: Andamento C_d e C_l auto.

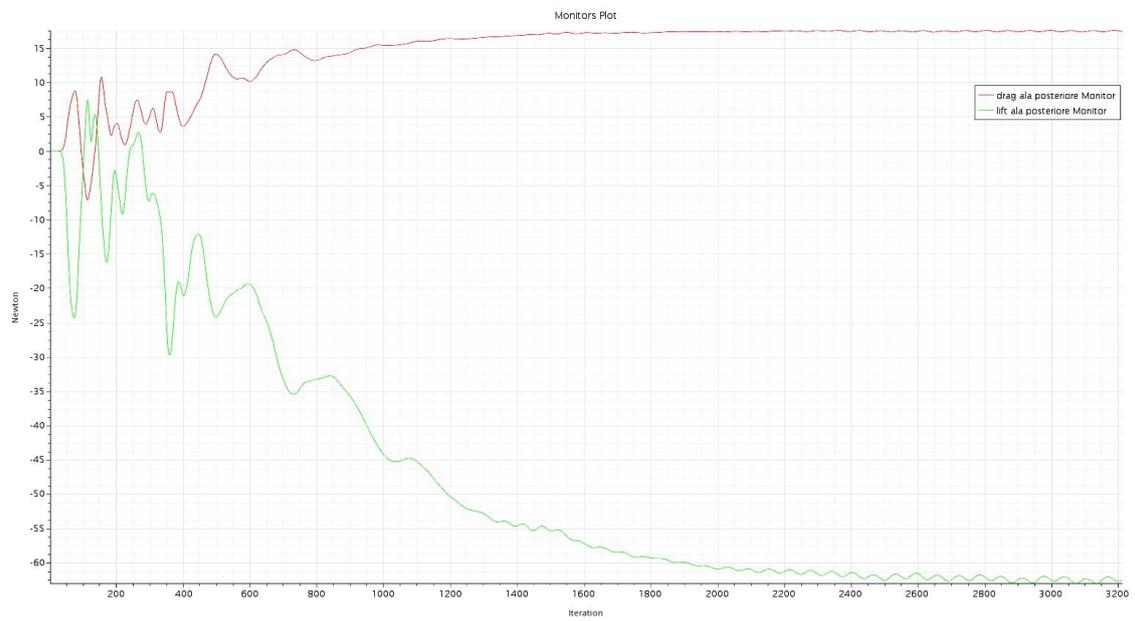


Figura 8.3: Andamento drag e lift ala posteriore.

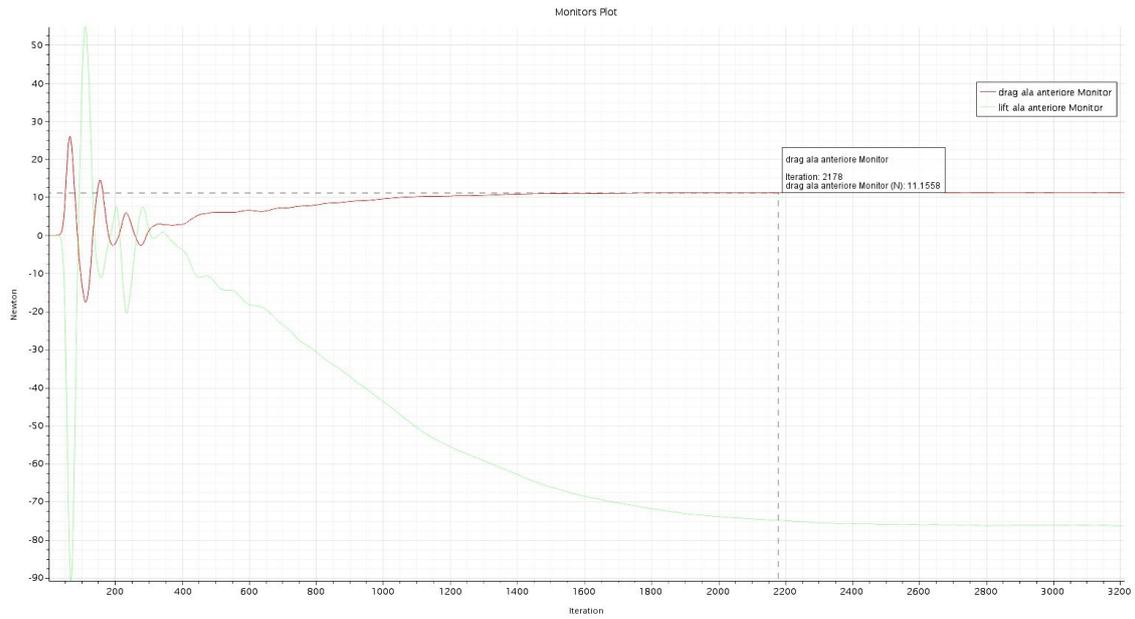


Figura 8.4: Andamento drag e lift ala anteriore.

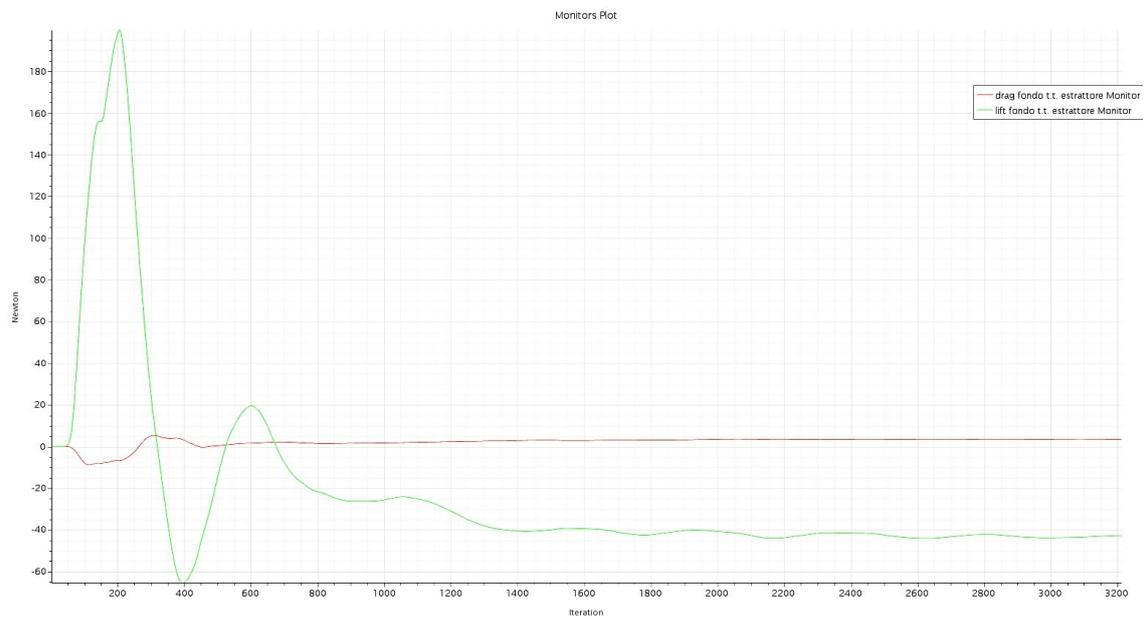


Figura 8.5: Andamento drag e lift fondo.

Se l'andamento dei residui tende ad una variazione molto bassa, dell'ordine della quarta/settima cifra dopo la virgola, e quello dei report tendono ad un valore ben preciso senza oscillare di molto intorno ad esso, il risultato può essere considerato attendibile.

Sarebbe comunque ottimale una loro validazione in galleria del vento, anche con un modello in scala della vettura.

8.2 VALORI SIMULAZIONE AUTO IN ASSETTO STANDARD

I risultati che ha prodotto la simulazione utilizzata per spiegare le impostazioni di base, che vengo riutilizzate anche nelle altre tre, in condizioni differenti di rollio e beccheggio, sono i seguenti per le singole componenti della vettura (Tabella 8.1).



Tabella 8.1: Suddivisione dei valori dei coefficienti tra le componenti dell'auto.

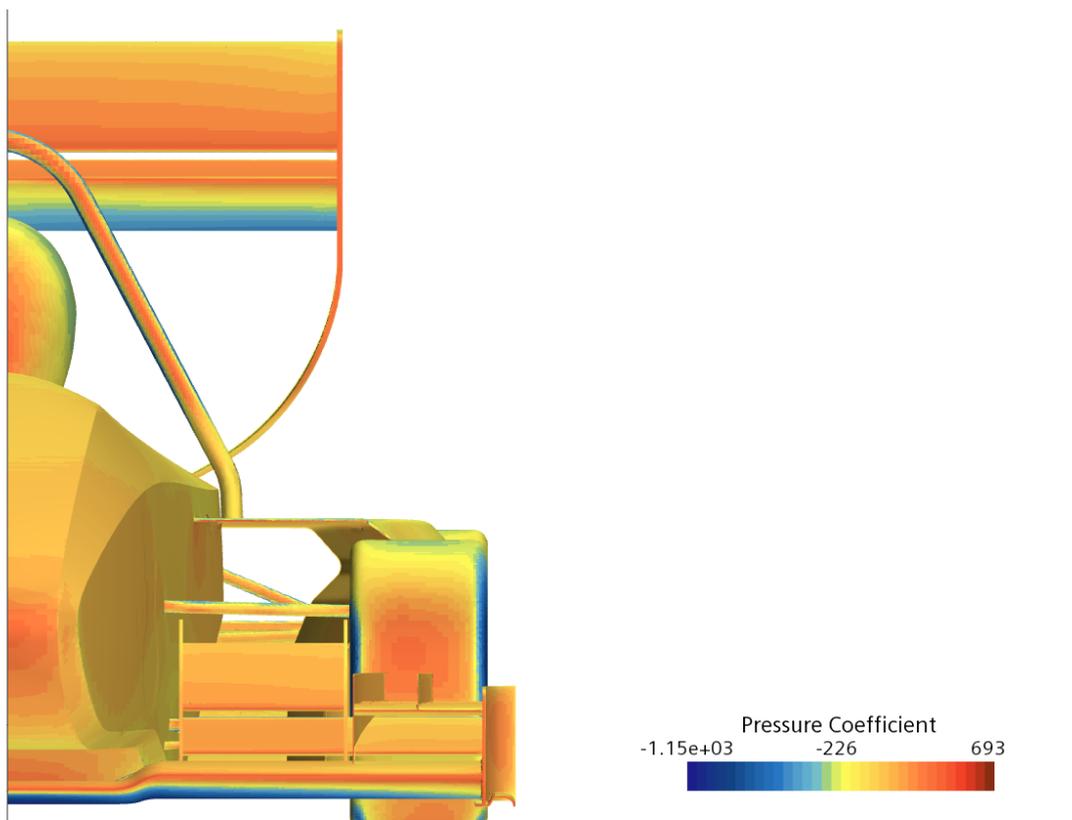
Introducendo un nuovo parametro che è definito come efficienza di un profilo aerodinamico, si indica con “E” ed è dato dal rapporto del coefficiente di lift sul coefficiente di drag, determina quanta portanza, o deportanza nel nostro caso, è in grado di produrre un profilo a parità di drag; più sarà alto questo valore, più sarà efficiente.

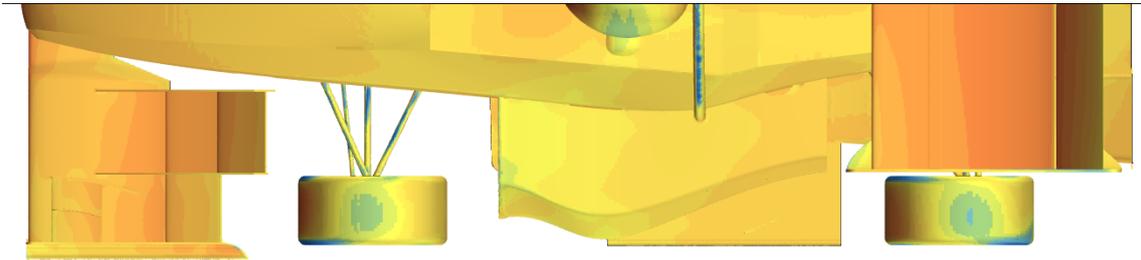
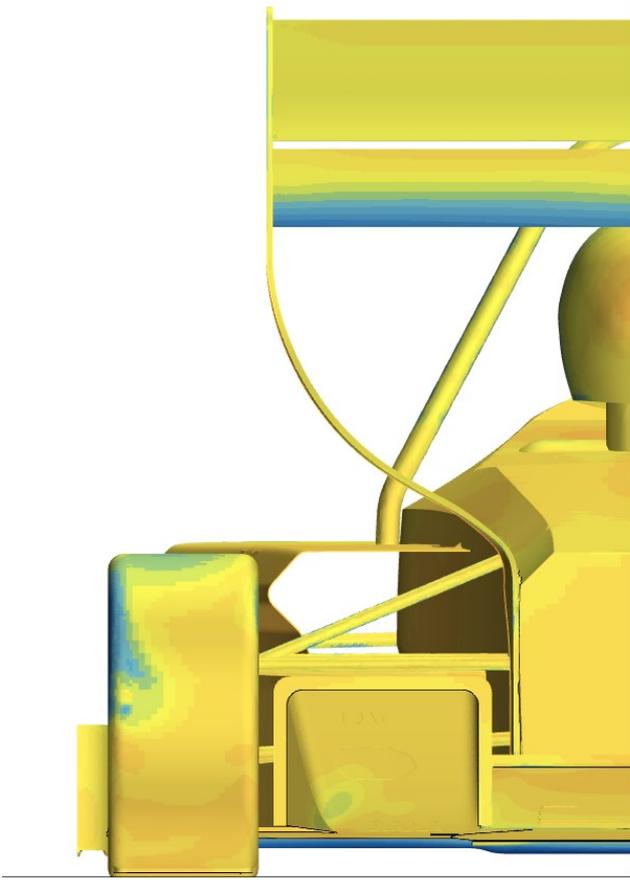
Nella configurazione di assetto standard i valori di efficienza registrati sono i seguenti:

- Ala anteriore: 6,8.
- Ala posteriore: 3,5.
- Fondo: 12,4.
- Auto: 2,36.

Si può notare come il fondo e l'ala anteriore siano quelli caratterizzati da un'efficienza più elevata poiché entrambi, lavorando ad una piccola distanza dall'asfalto, riescono a sfruttare l'effetto suolo di cui si è già parlato in precedenza. Inoltre, il fondo, essendo caratterizzato da un'area molto estesa, anche se caratterizzato da una piccola diminuzione di pressione, essa si potrebbe tradurre in una forza di deportanza abbastanza elevata.

Di seguito sono riportati gli andamenti del coefficiente di pressione sulle varie superfici della vettura (Figura 8.6).





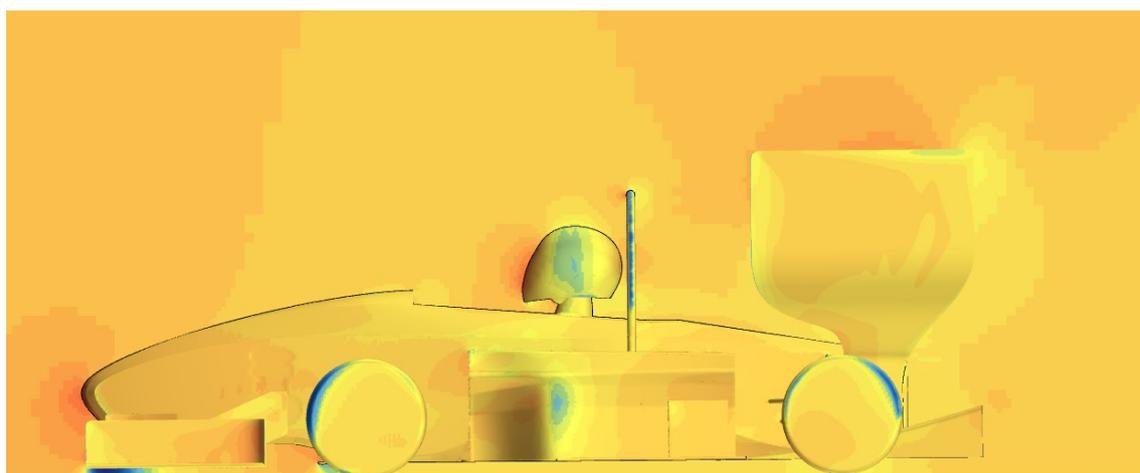
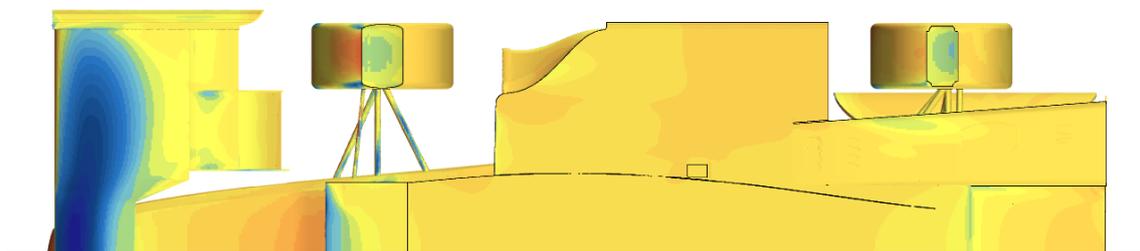


Figura 8.6: Andamenti coefficiente di pressione sulla superficie della vettura.

Da questo andamento, dalla vista frontale, si può notare come la ruota anteriore sia in grado di generare molta resistenza all'avanzamento a causa dell'elevata sezione frontale e del punto di ristagno che si genera su di essa. Sulla posteriore, invece, questo non accade

poiché il flusso in quella zona è disturbato e/o deviato dai dispositivi aerodinamici che la anticipano.

9. MODIFICA ANGOLI DI ROLLIO E BECCHEGGIO DELLA VETTURA

Le tre simulazioni per analizzare il comportamento della vettura in condizioni differenti da quelle dell'assetto standard sono le seguenti:

- Condizione di beccheggio massimo in frenata con una decelerazione di 2,1g, corrispondente ad un angolo di rotazione attorno all'asse di beccheggio pari a $1,30^\circ$ ($V_\infty=22\text{m/s}$).
- Condizione di beccheggio massimo in accelerazione con 0,8g, corrispondente ad un angolo di rotazione attorno all'asse di beccheggio pari a $0,52^\circ$ ($V_\infty=14\text{m/s}$).
- Condizione di rollio massimo nella prova di skid-pad con un'accelerazione massima laterale di 1,6g, corrispondente ad un angolo di rotazione attorno all'asse di rollio pari a $1,16^\circ$ ($V_\infty=12\text{m/s}$).

Questi dati sono stati forniti dal reparto di dinamica del veicolo dopo aver simulato il comportamento della vettura nelle varie prove dinamiche al computer.

Per modificare i parametri dell'assetto e di sterzata dell'auto è stato utilizzato direttamente l'ambiente di modellazione cad presente all'interno di STAR-CCM+, prendendo come riferimento, per trovare gli assi attorno ai quali imporre le varie rotazioni, il disegno cad dello schema sospensivo (Figura 9.1).

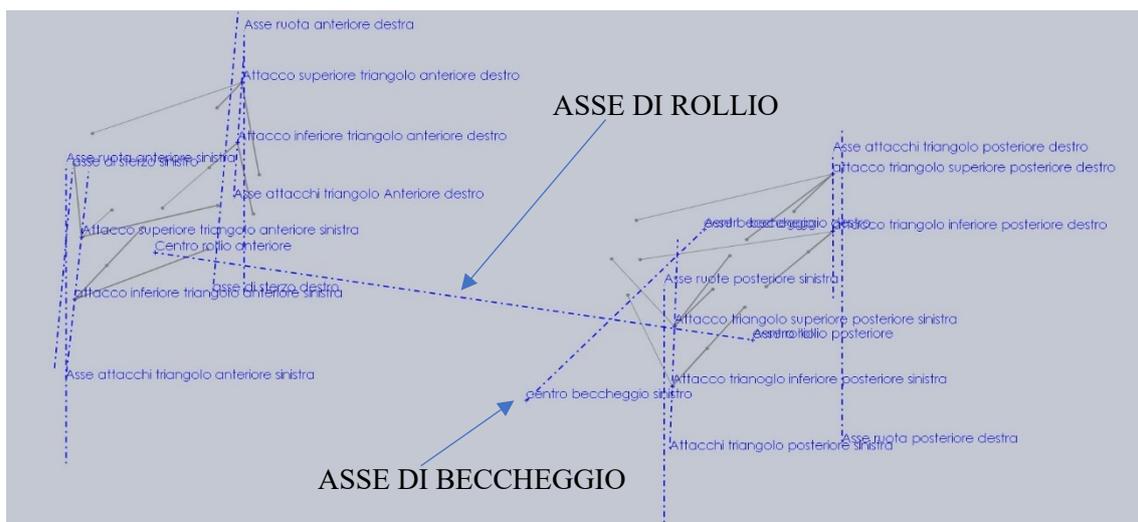


Figura 9.1: Schema sospensivo P4 Evoluzione.

L'angolo di beccheggio è stato modificato nel seguente modo con la funzione "Rotate bodies" (Figura 9.2):

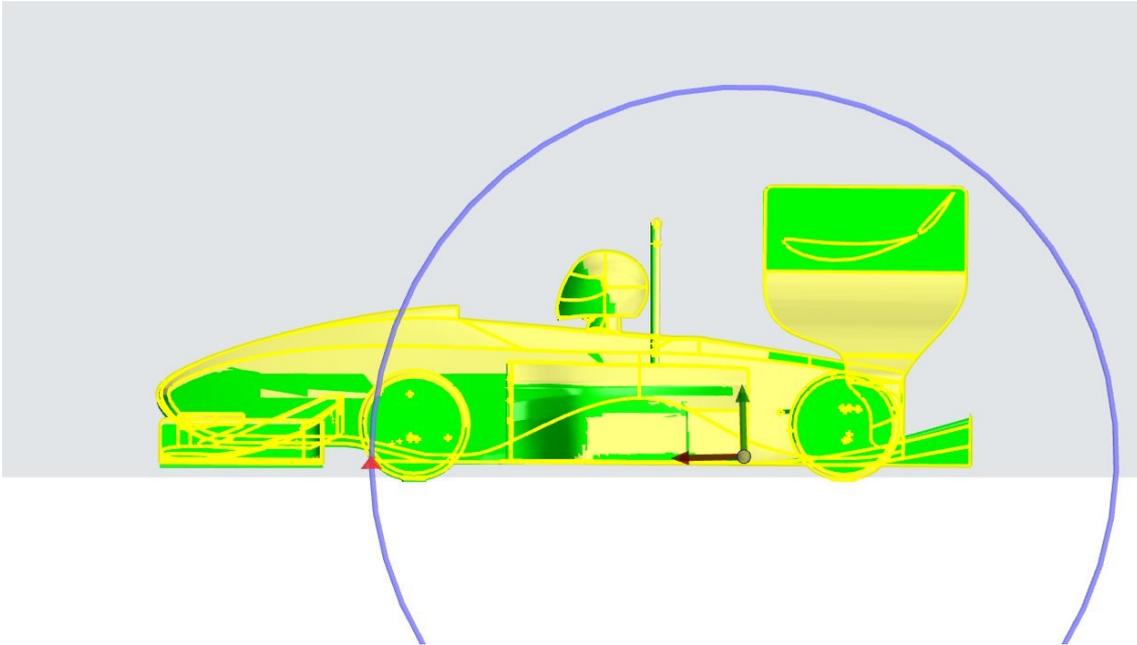
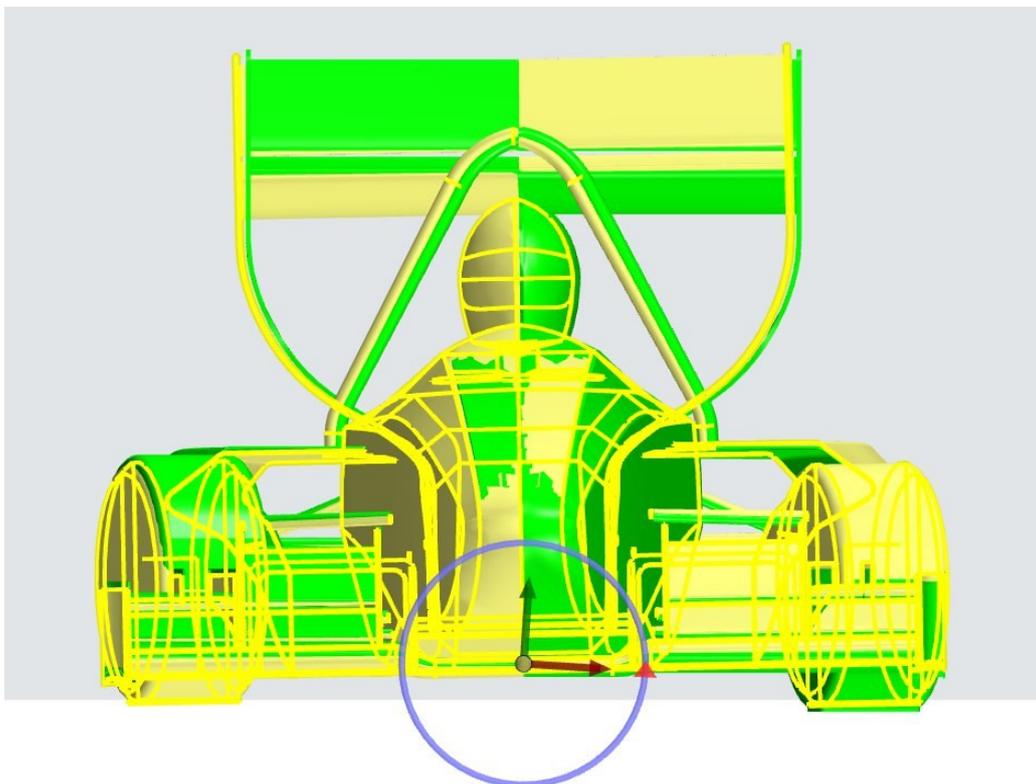


Figura 9.2: Modifica angolo di beccheggio su STAR-CCM+.

Per quanto riguarda l'angolo di sterzo da dare agli pneumatici e l'angolo di rollio è stata utilizzata la stessa funzione nel seguente modo (Figura 9.3):



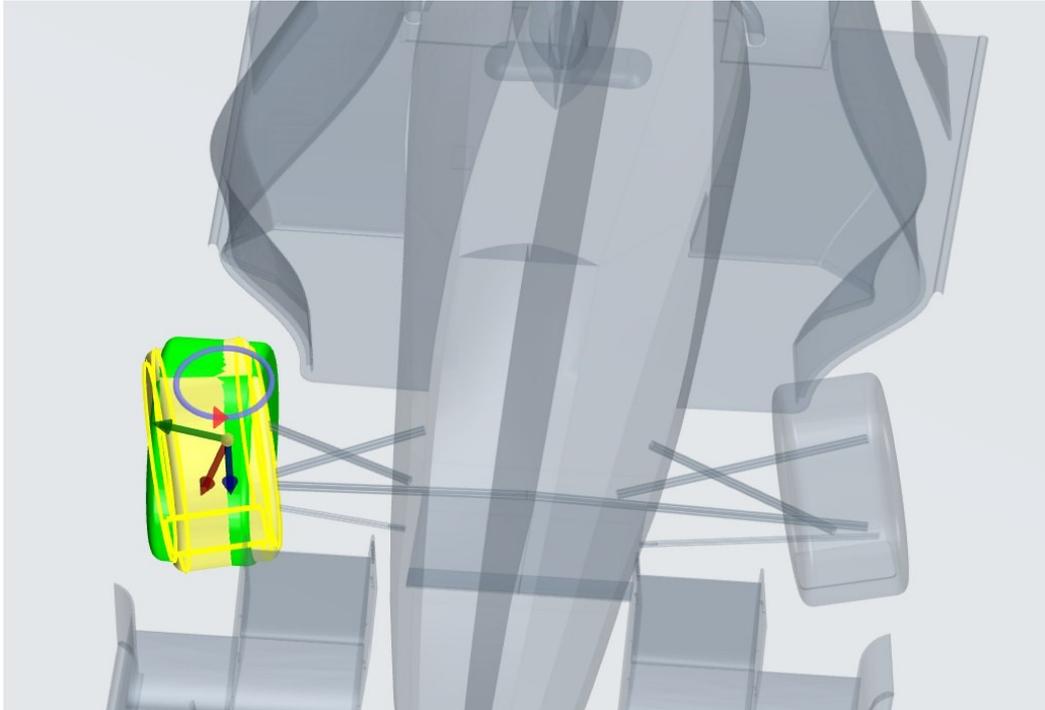


Figura 9.3: Modifica angolo di rollio e sterzata su STAR-CCM+.

Inoltre, dopo aver posizionato l'auto con i vari angoli caratteristici di ogni prova è stato necessario anche spostare gli pneumatici per mantenere il contatto tra quest'ultimo e l'asfalto.

9.1 RISULTATI SIMULAZIONE ACCELERAZIONE

Per i singoli componenti della vettura la simulazione in condizioni di accelerazione con $0,52^\circ$ di beccheggio ha prodotto i seguenti risultati (Tabella 9.1).

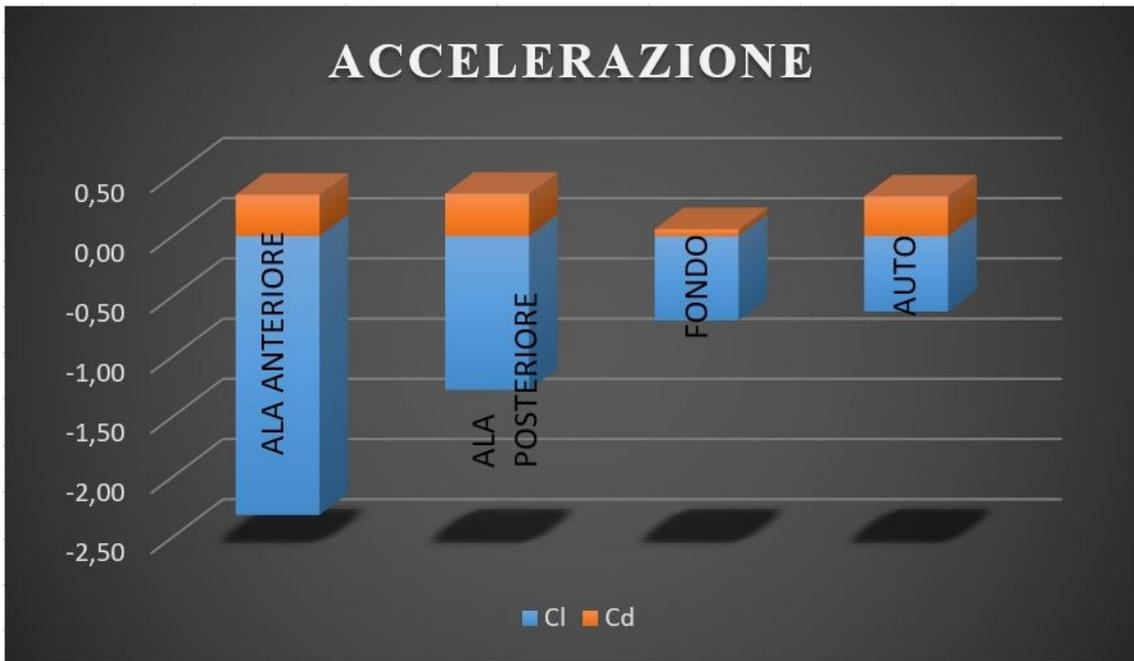


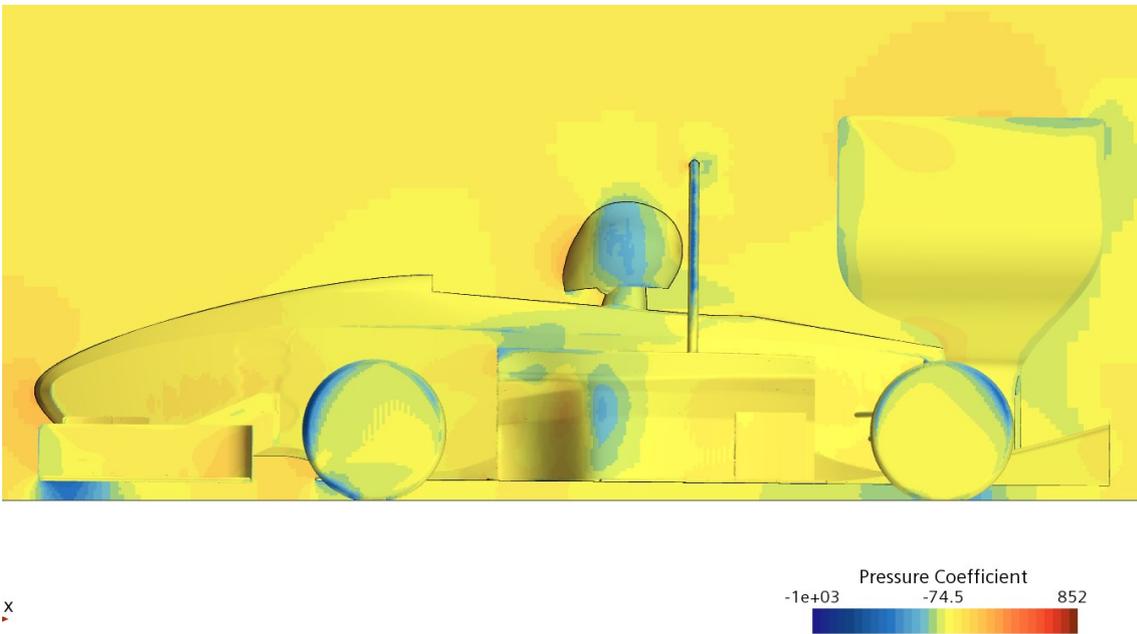
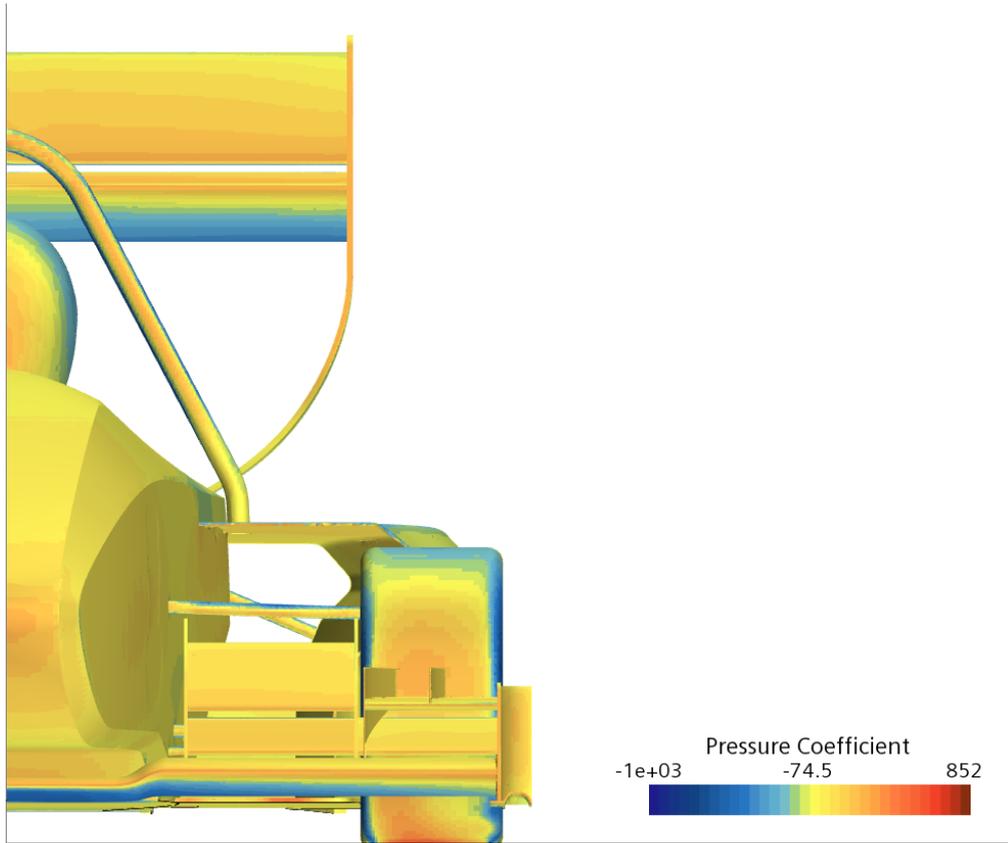
Tabella 9.1: Suddivisione dei valori dei coefficienti tra le componenti dell'auto.

In questa configurazione i valori di efficienza registrati sono:

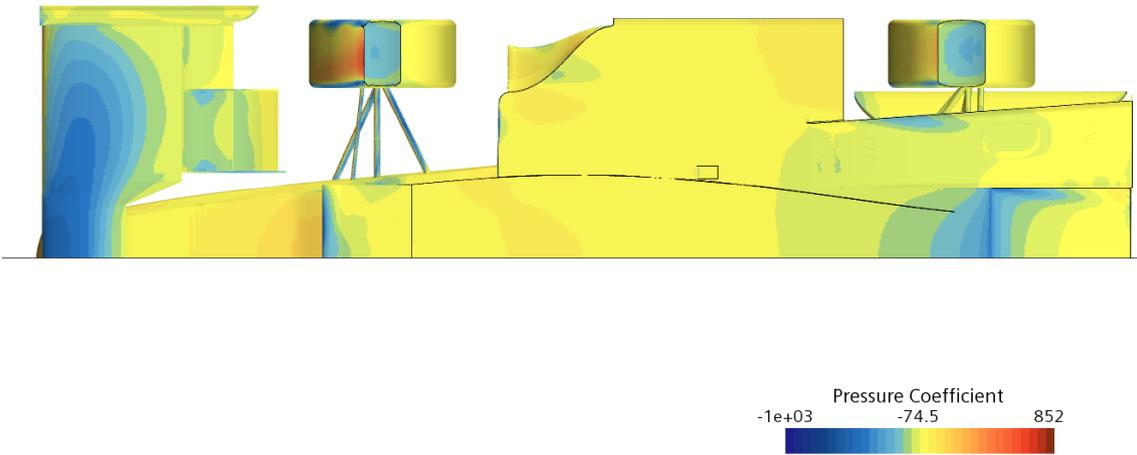
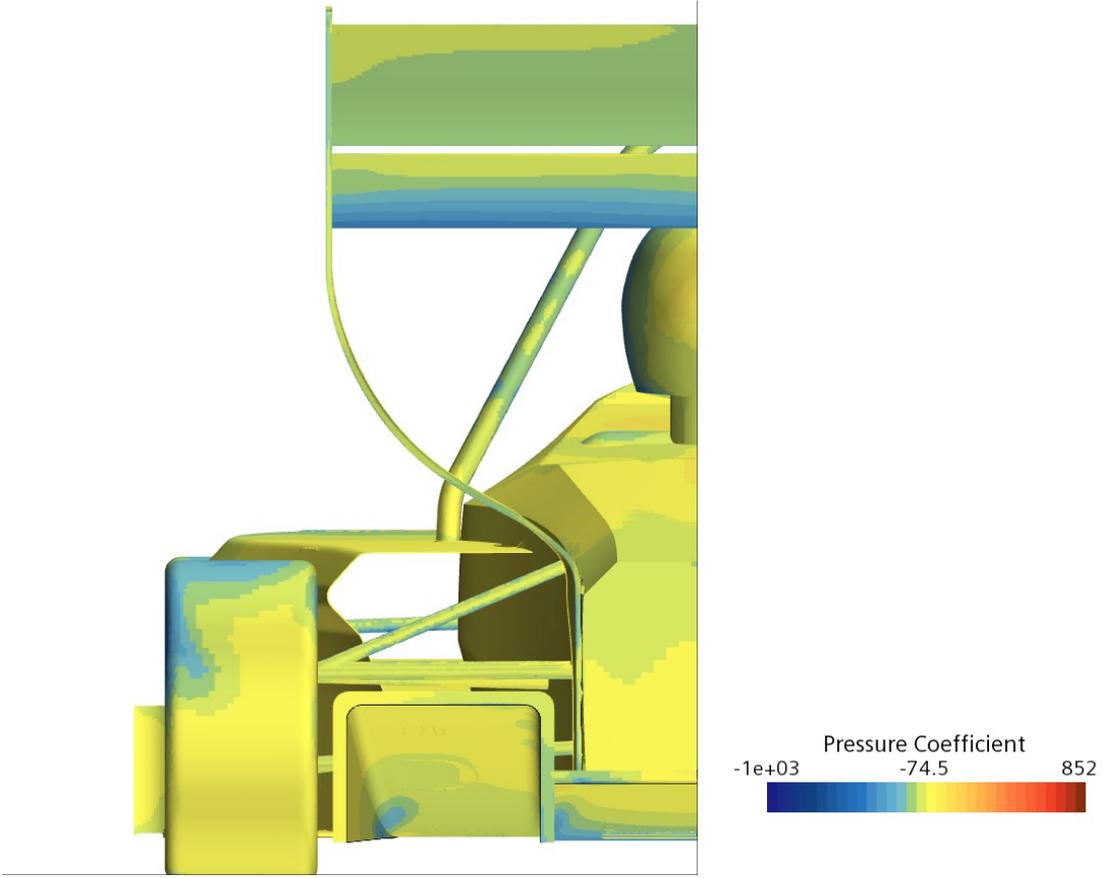
- Ala anteriore: 6,7.
- Ala posteriore: 3,6.
- Fondo: 12,6.
- Auto: 1,9.

Di seguito vengono riportati anche gli andamenti del coefficiente di pressione sulla vettura (Figura 9.4).

In questa condizione si può notare come le prestazioni delle appendici aerodinamiche più vicine al suolo, che infatti saranno quelle più influenzate dai movimenti caratteristici dell'auto poiché risentiranno molto dell'interazione con l'asfalto data la loro vicinanza ad esso, come fondo ed ala anteriore non si discostano molto dalla loro condizione standard di funzionamento, infatti, saranno caratterizzati dagli stessi valori di efficienza circa di quest'ultima. Tuttavia, si può notare come nella zona di uscita del fondo ci sia un recupero di depressione, dovuto alla vicinanza maggiore al suolo, poiché in fase di accelerazione la macchina tenderà a sedersi sul posteriore, che crea una diminuzione della sezione utile causando a sua volta un aumento della velocità e quindi una diminuzione della pressione.



x



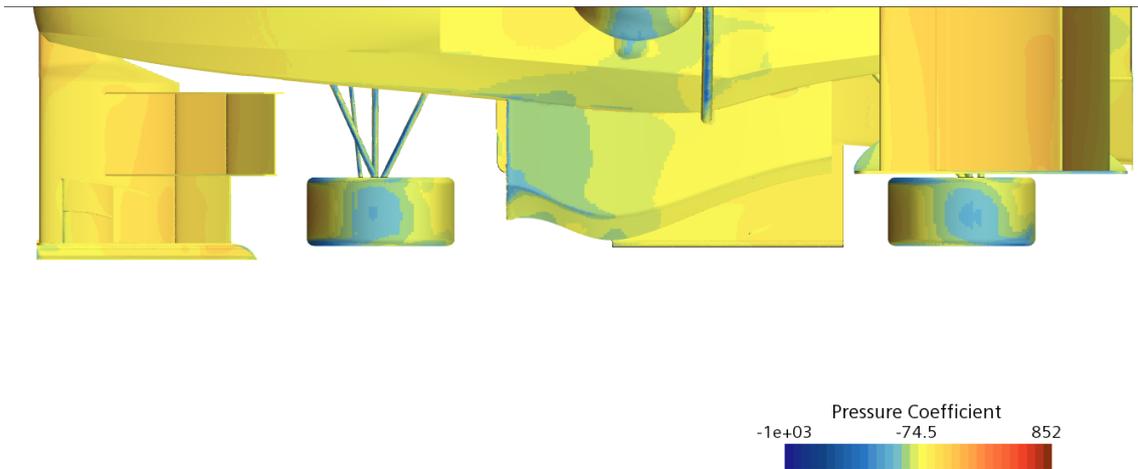


Figura 9.4: Andamenti coefficiente di pressione sulla superficie della vettura.

9.2 RISULTATI SIMULAZIONE FRENATA

Per i singoli componenti della vettura la simulazione in condizioni di frenata con $1,30^\circ$ di beccheggio ha prodotto i seguenti risultati (Tabella 9.2).

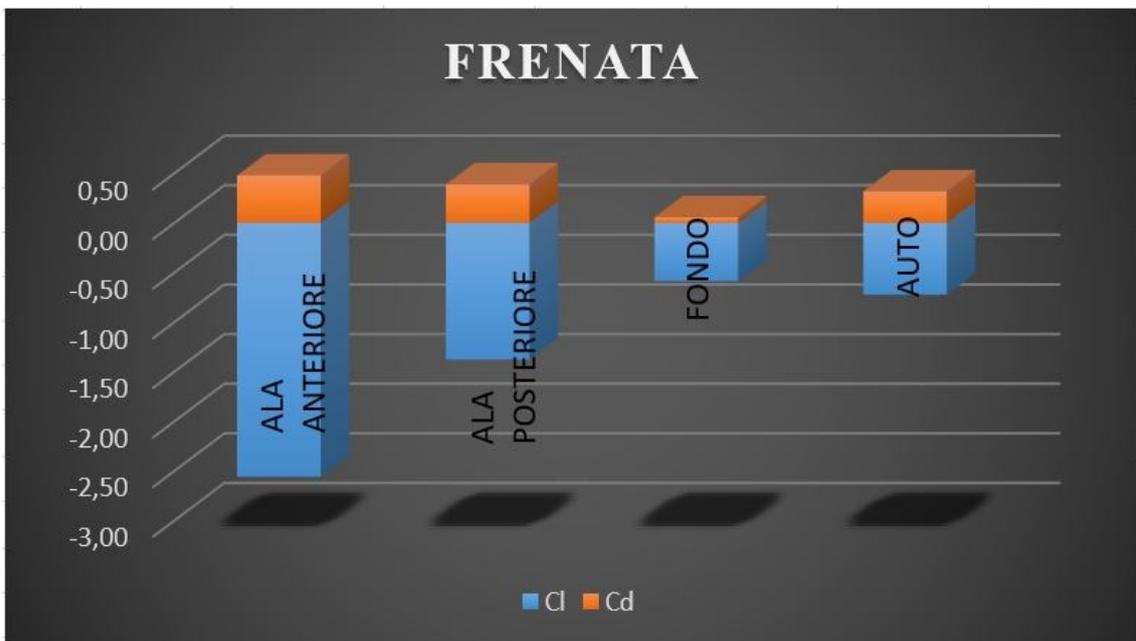
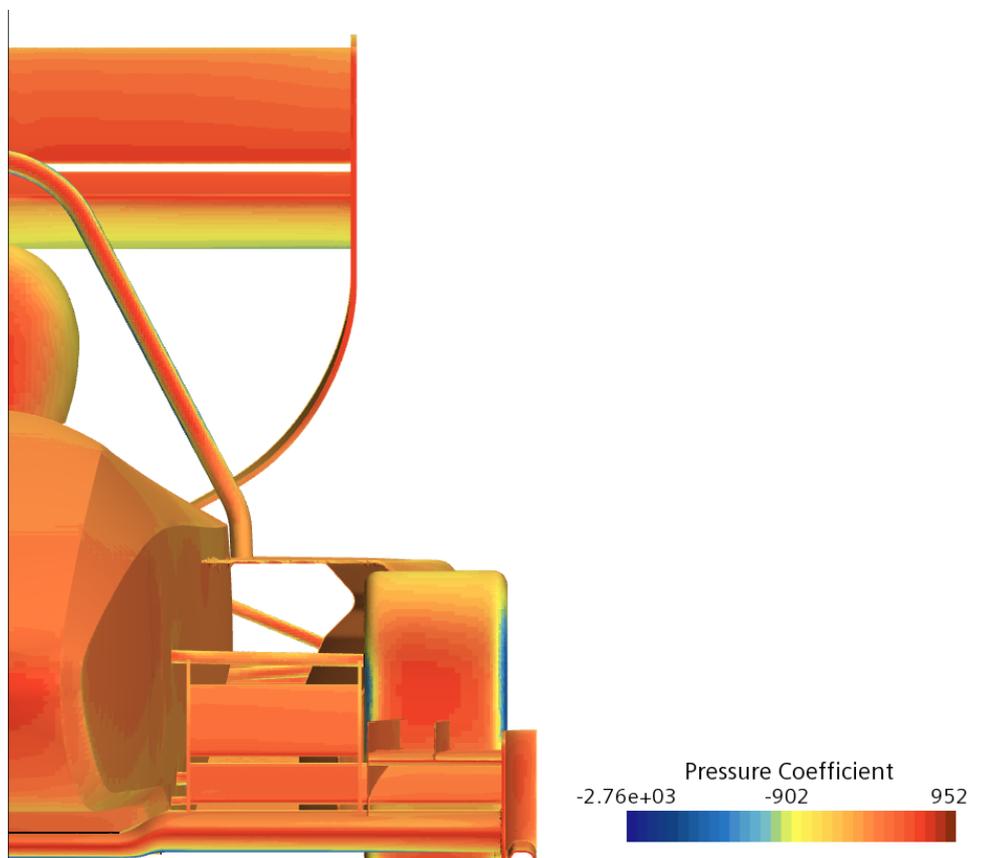


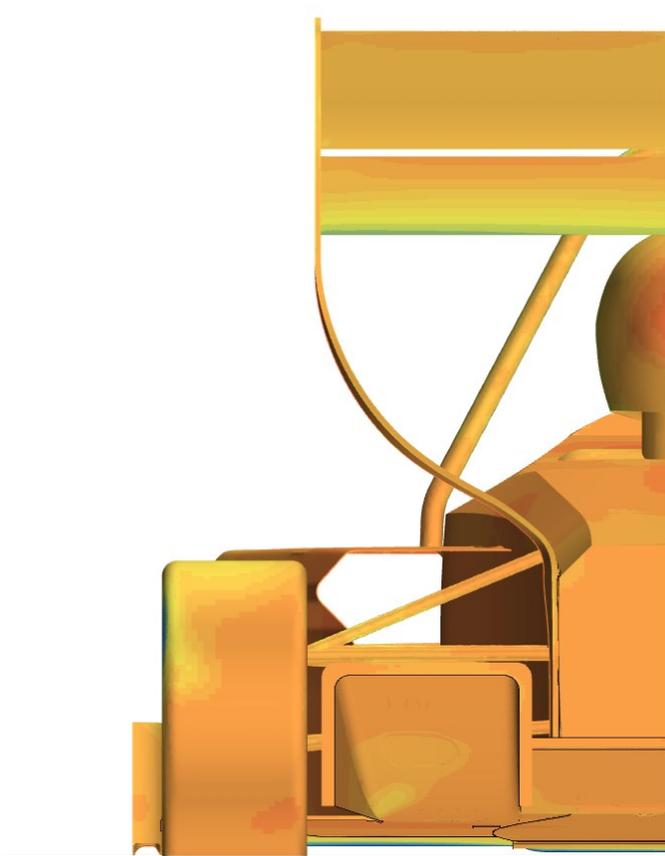
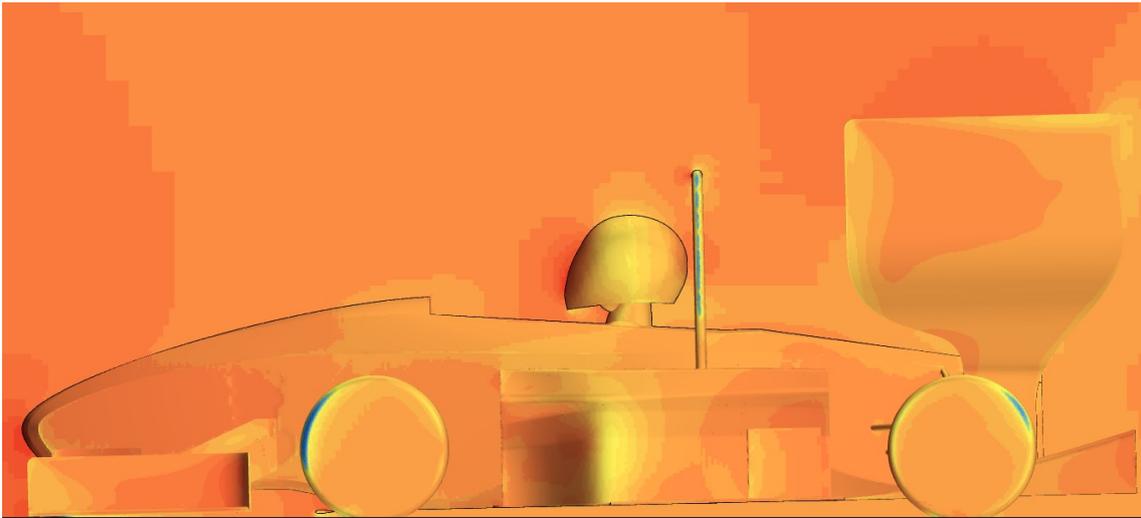
Tabella 9.2: Suddivisione dei valori dei coefficienti tra le componenti dell'auto.

In questa configurazione i valori di efficienza registrati sono:

- Ala anteriore: 5,3.
- Ala posteriore: 3,5.
- Fondo: 10,4.
- Auto: 2,2.

Di seguito vengono riportati anche gli andamenti del coefficiente di pressione sulla vettura (Figura 9.5).





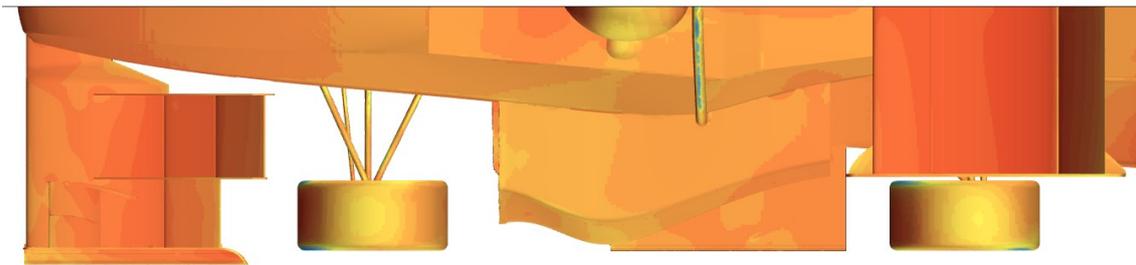
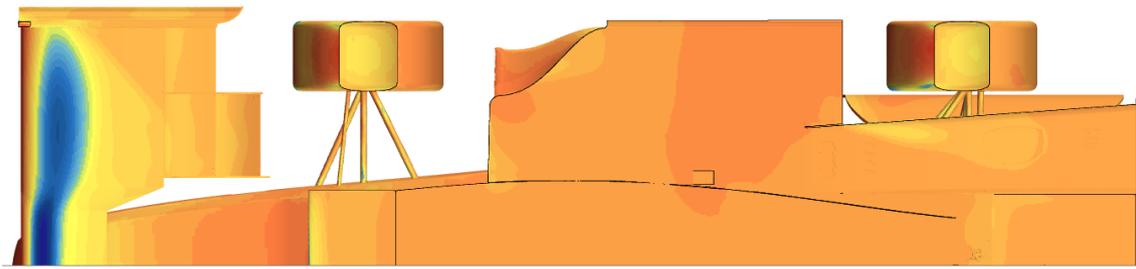


Figura 9.5: Andamenti coefficiente di pressione sulla superficie della vettura.

Nella condizione di frenata si può notare come, essendo molto vicina al suolo ed avendo un angolo d'attacco maggiore dovuto al beccheggio, l'ala anteriore vada ad ostacolare il passaggio del flusso al di sotto di essa, diminuendo la sua efficienza. Inoltre, come conseguenza ha anche quella di far arrivare meno aria al fondo; infatti, come si può notare anche la sua efficienza crolla passando da circa 12 in condizioni normali a circa 10.

9.3 RISULTATI SIMULAZIONE SKID-PAD

Per i singoli componenti della vettura la simulazione nelle condizioni della prova di skid-pad con $1,16^\circ$ di rollio ha prodotto i seguenti risultati (Tabella 9.3).

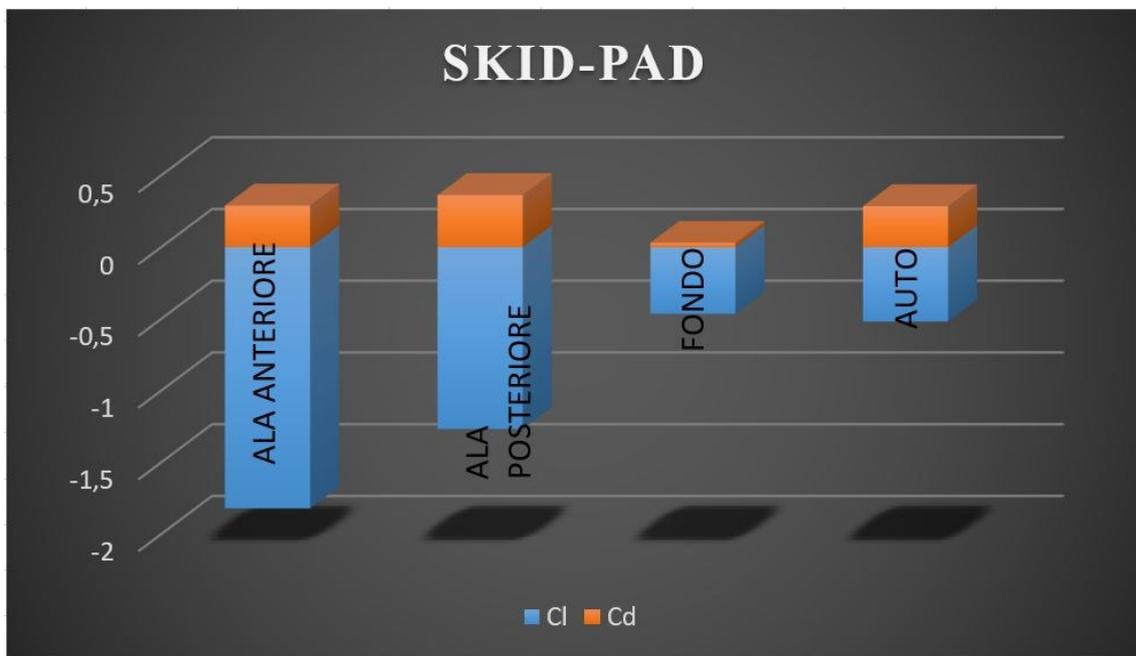
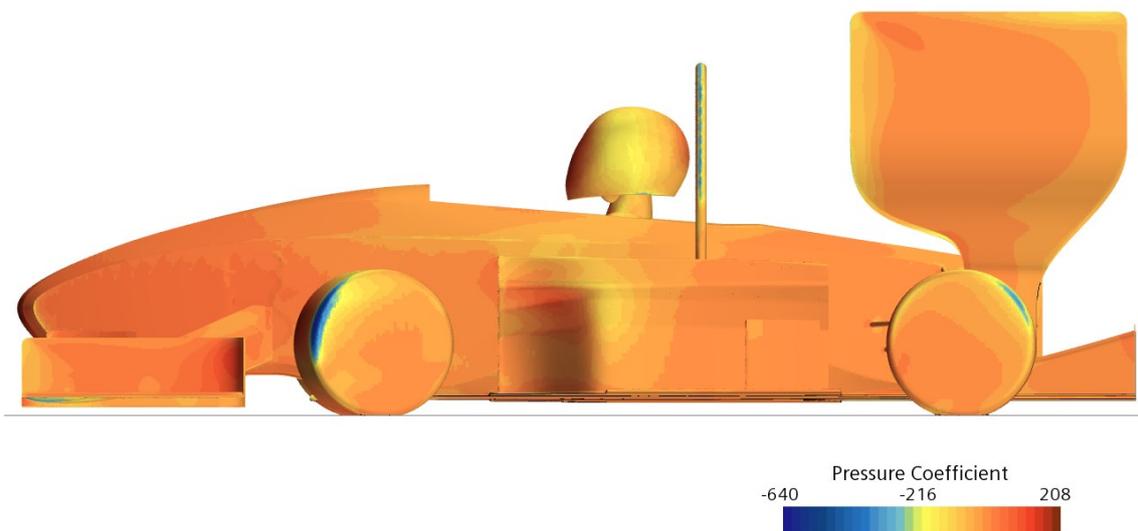
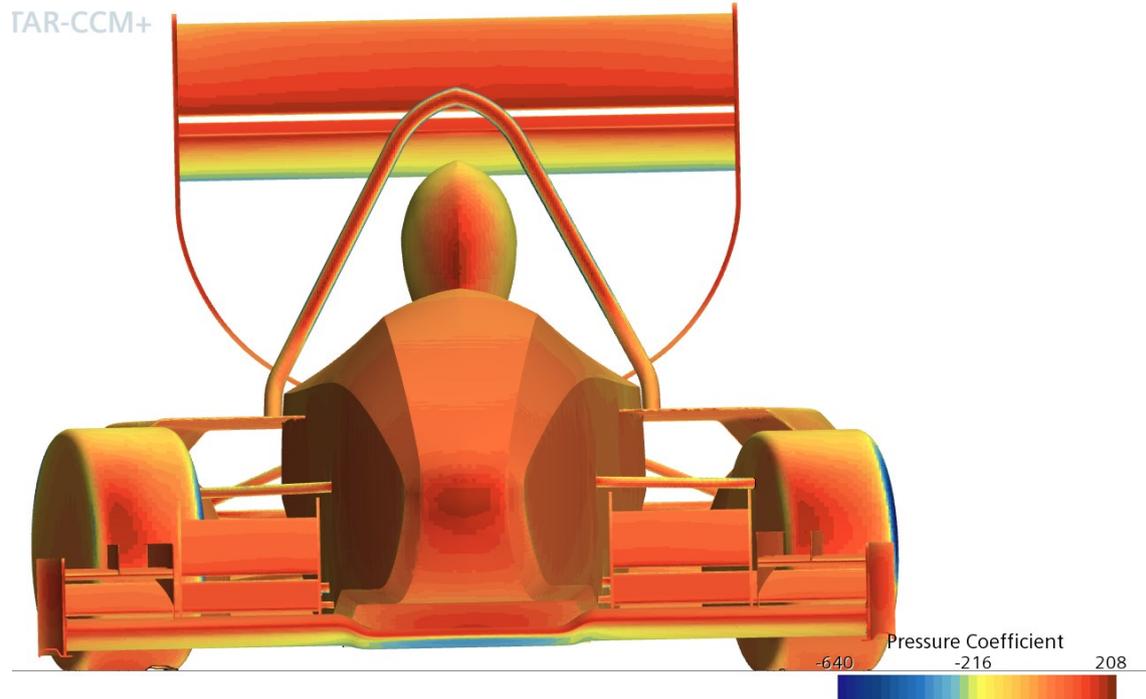


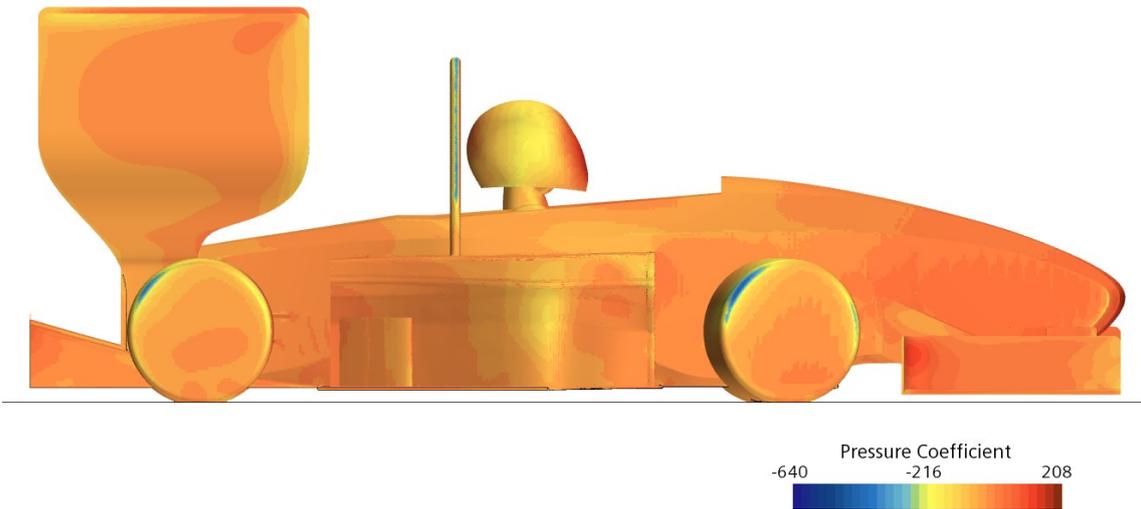
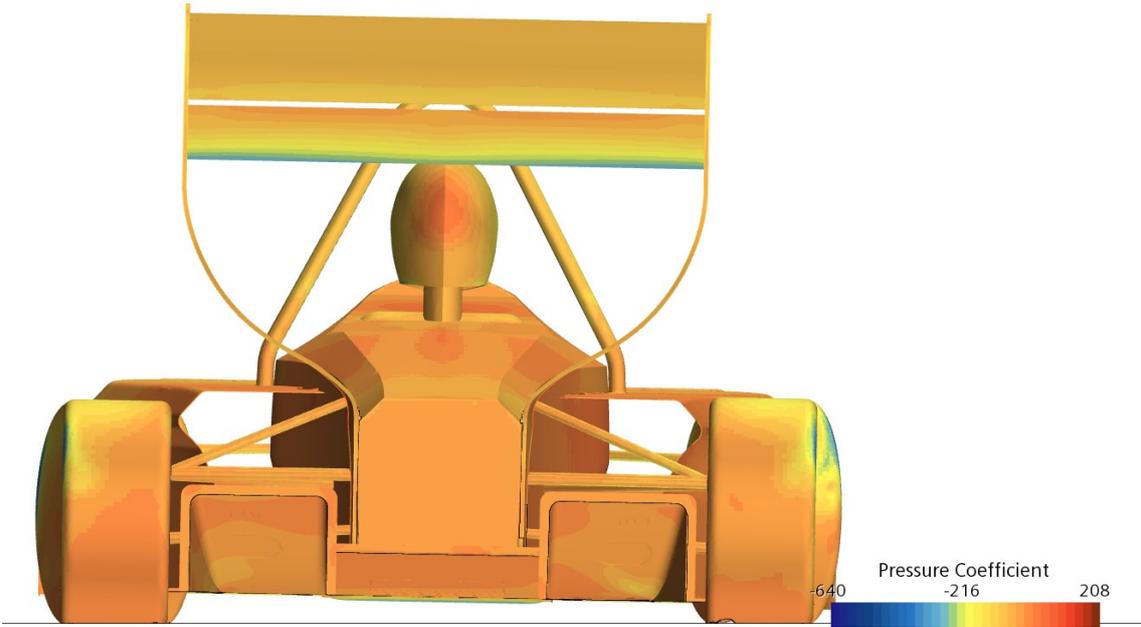
Tabella 9.3: Suddivisione dei valori dei coefficienti tra le componenti dell'auto.

In questa configurazione i valori di efficienza registrati sono:

- Ala anteriore: 6,2.
- Ala posteriore: 3,4.
- Fondo: 15,2.
- Auto: 1,8.

Di seguito vengono riportati anche gli andamenti del coefficiente di pressione sulla vettura (Figura 9.6).





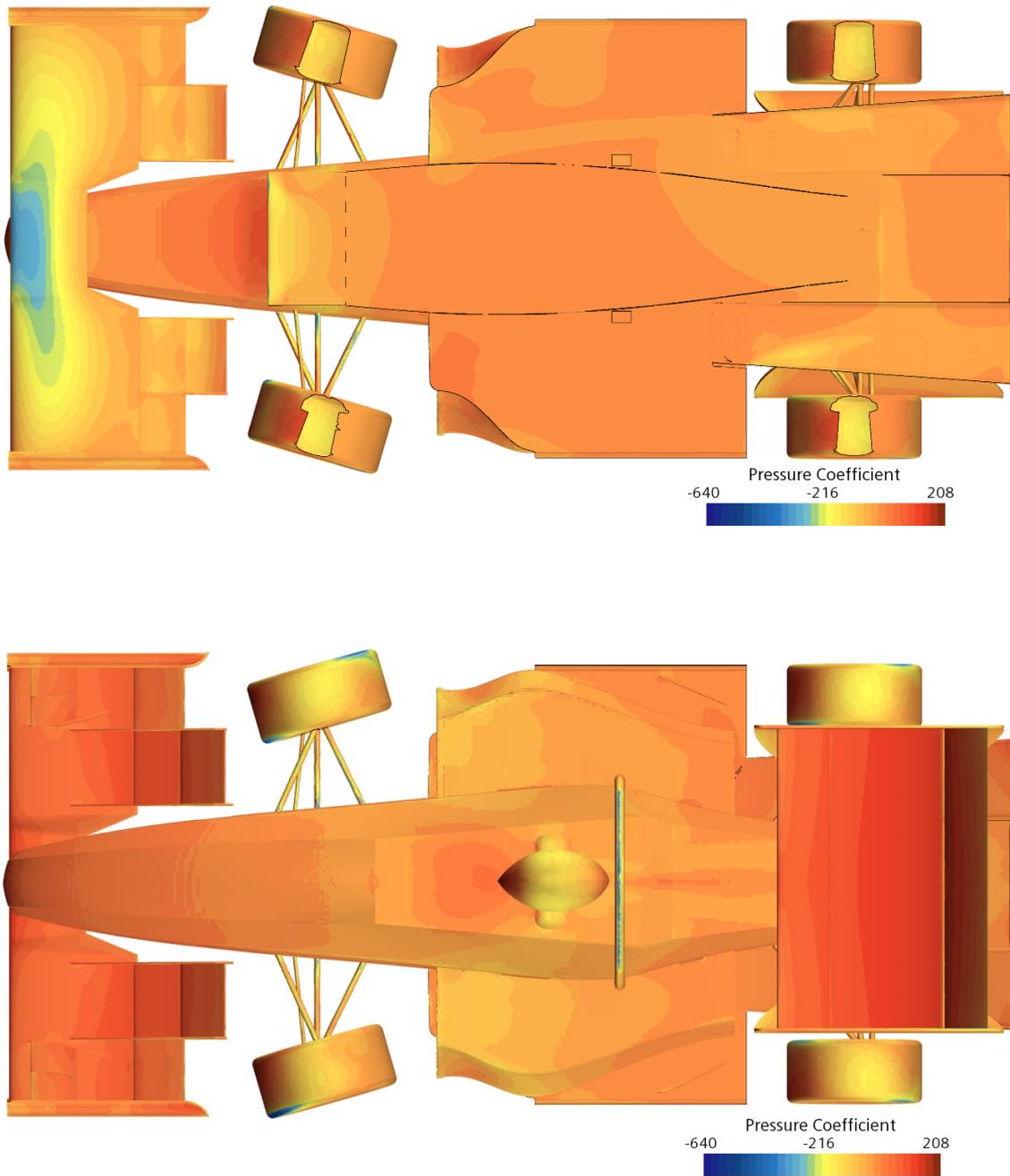


Figura 9.6: Andamenti coefficiente di pressione sulla superficie della vettura.

Inoltre, per questa simulazione, dove il fondo lavora in maniera asimmetrica tra parte destra e sinistra, risulta interessante andare a visualizzare l'andamento delle linee di corrente (Figura 9.7).

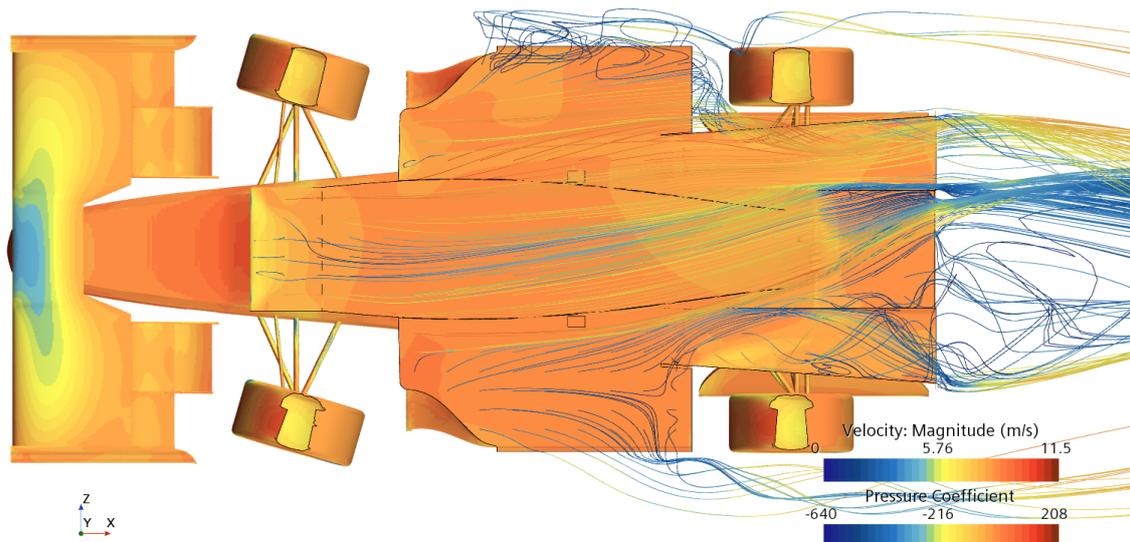


Figura 9.7: Andamento linee di corrente sul fondo per la simulazione di skid-pad.

Come si può notare da questo andamento, il fluido tende ad accelerare verso la zona del fondo che tende a staccarsi di più da terra (parte superiore della figura), mentre la parte che si avvicina al suolo tende ad ostacolare l'ingresso di aria, lavorando in condizioni non propriamente ottimali. Tuttavia, si può notare una distribuzione di depressione asimmetrica sulla superficie dell'ala anteriore, più spostata verso la zona più vicina al suolo. Il fondo, in questa situazione di funzionamento, dovrebbe garantire un maggior carico sul lato della vettura interno alla curva, ovvero il più scarico a causa del trasferimento di carico, permettendo una migliore tenuta.

10. CONFRONTO RISULTATI

Per avere una migliore leggibilità dei risultati, è utile andare a visualizzare l'andamento del comportamento delle varie parti dell'auto nelle diverse prove dinamiche a confronto.

Ala anteriore (Figura 10.1, Figura 10.2):



Figura 10.1: Andamento dei coefficienti aerodinamici nelle situazioni limite delle prove dinamiche.

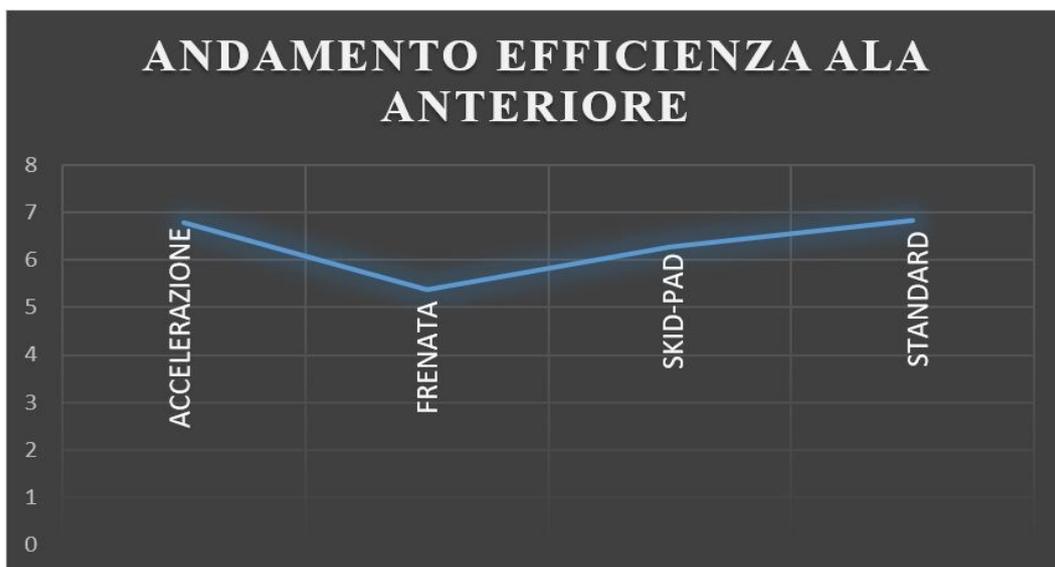


Figura 10.2: Andamento dell'efficienza nelle situazioni limite delle prove dinamiche.

Ala posteriore (Figura 10.3, Figura 10.4):



Figura 10.3: Andamento dei coefficienti aerodinamici nelle situazioni limite delle prove dinamiche.

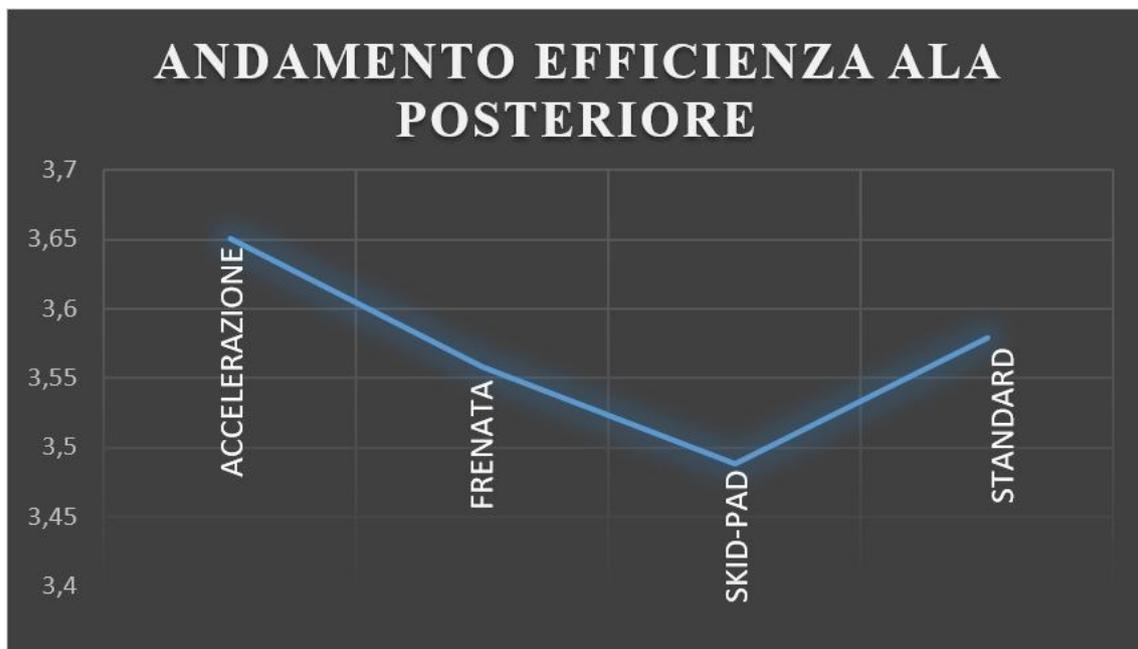


Figura 10.4: Andamento dell'efficienza nelle situazioni limite delle prove dinamiche.

Fondo (Figura 10.5, Figura 10.6):



Figura 10.5: Andamento dei coefficienti aerodinamici nelle situazioni limite delle prove dinamiche.

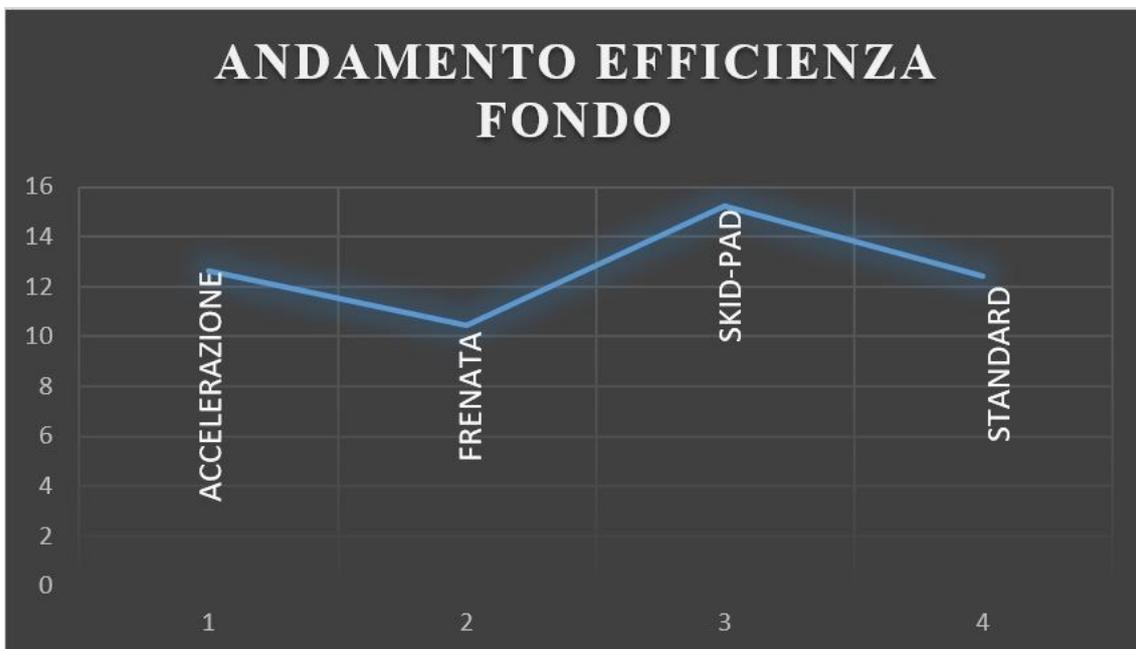


Figura 10.6: Andamento dell'efficienza nelle situazioni limite delle prove dinamiche.

11. CONCLUSIONI

Con il lavoro effettuato per questa tesi, effettuato a ridosso della gara di Formula SAE in Italia, a Varano de' Melegari, si è cercato di portare in gara una prova della maggior comunicazione del reparto di aerodinamica con il reparto di dinamica per la progettazione del corpo vettura e delle appendici aerodinamiche tenendo conto dei movimenti caratteristici dell'auto in condizioni dinamiche.

Queste simulazioni dovrebbero rappresentare solamente un punto di partenza dal quale partire per studiare l'aerodinamica della prossima macchina, incrementando la connessione con il reparto di dinamica, simulando il comportamento dinamico della macchina in tutte le situazioni possibili creando un vero e proprio "Aero-mapping", in modo da riuscire a prevedere il comportamento dell'auto in ogni situazione sui tracciati in base ai carichi aerodinamici che sviluppa.

In questo caso è stata svolta l'analisi dell'aerodinamica nelle sole condizioni limite, poiché questa mancanza ci è stata fatta notare, come team, nell'ultima gara in Ungheria ad inizio Agosto 2021 ed avevamo bisogno delle simulazioni per la gara in Italia ad inizio Ottobre 2021; quindi, è stato deciso di vedere comunque il comportamento del pacchetto anche se in maniera meno approfondita per mancanza di tempo.

Per gli sviluppi futuri, per i prossimi progetti, sarebbe opportuno inoltre portare a termine sia delle validazioni in galleria del vento, sia valutando i carichi aerodinamici sviluppati, con delle celle di carico, e confrontandoli con la telemetria delle sospensioni registrata su un circuito di prova.

BIBLIOGRAFIA

1. CD-Adapco, STAR-CCM+ User guide.
2. © 2021 SAE International. 2021 Formula SAE Rules
3. Katz, J. (1995). Race car aerodynamics: designing for speed. Robert Bentley.
4. Capire la Formula 1. Mauro Forghieri.

SITOGRAFIA

1. Close-up Engineering. <https://vehiclecue.it/aerodynamics-wings-caratteristiche-parametri-e-progettazione/11645/>
2. Autotecnica. <https://www.autotecnica.org/aerodinamica-dei-veicoli-terrestri-terza-parte/>
3. Vehiclecue. <https://vehiclecue.it/aerodinamica-del-sottoscocca-leffetto-suolo-e-il-diffusore/12048/>
4. Formula 1 analisi tecnica. https://www.funooanalisiitecnica.com/2019/08/imbardata-beccheggio-e-rollio.html?refresh_ce=9466.6669921875
5. Wikipedia. <https://it.wikipedia.org/wiki/>

RINGRAZIAMENTI

Eccomi giunto alla fine di questa tesi e di questi tre anni fatti di gioie e dolori, ma che mi hanno insegnato ad affrontare gli ostacoli che la vita ti mette davanti senza abbattersi o demoralizzarsi. È stata vitale la presenza di alcune persone in questo percorso, senza le quali non sarei riuscito a smorzare i momenti più duri.

Doveroso da parte mia è un ringraziamento al Professor Crivellini, nonché relatore, che mi ha permesso lo sviluppo di questa tesi dandomi la Sua piena fiducia mostrandosi sempre disponibile e tempestivo nelle risposte. Gli devo questa tesi poiché mi sono appassionato al corso di fluidodinamica tenuto da Lui al secondo anno di ingegneria.

Una scelta che, senza dubbio, rifarei è quella di diventare un membro del Polimarche Racing Team, che sarebbe più giusto definire come una grande famiglia all'interno della quale i sogni diventano realtà. Un particolare grazie va: ai leader Alessia e Marco che sono riusciti ad imporre la loro figura autoritaria sin dal primo giorno al reclutamento, ma si sono sempre dimostrati disponibili e comprensivi in qualsiasi situazione, determinati a portare avanti il team in ogni occasione; Lorenzo ed Alessandro che hanno ricoperto la figura rispettivamente di ex ed attuale capo-reparto; tutti i ragazzi e ragazze della divisione di aerodinamica: Michele, Alessandro, Corinne, Lorenzo, Luca, Marco, Robert, Roberta, Antonio, Leonardo. Mi sento anche di ringraziare le persone degli altri reparti con le quali ho stretto un rapporto più forte in questa avventura e che sono state in grado di donarmi tanto: Luca, Amos, Edoardo e Paolo di telaio per le ore passate da HP tra disperazione e paura per i sacchi bucati; Gianluca, Diego, Lorenzo, Chiara, Daniele, Massimiliano e Francesco di power-train per il motore “spacca timpani” che in gara ci distingue tra tutti gli altri team; Giacomo e Antonio di elettronica ed al loro fidato partner “Maurizio”; Gioele di veicolo elettrico e la sua testardaggine per far funzionare il DRS; Sergio, Daniele e Pierluigi di dinamica ed il loro adorato CEMB. Tutte le ore di sonno perso e di lavoro sono state sempre ripagate da emozioni e soddisfazioni indescrivibili che porterò nel cuore per tutta la vita.

Grazie di cuore a tutti i compagni di studio e di serate, senza i quali sarebbe stato praticamente impossibile affrontare gli esami, soprattutto durante il periodo del “lockdown” dove ci siamo spronati a vicenda per andare avanti in riunione su teams a fare esercizi su esercizi, (tranne quello di Scienza del 6 agosto, quello è stato impossibile

a prescindere): Federico, Pierluigi, Alessio, Daniele, Simone, Chiara, Alessia. Sempre pronti a dare una mano nel momento del bisogno e per le serate organizzate, a PDP sulla scalinata, all'ultimo ma sempre riuscite alla grande. Grazie a voi questi tre anni sono stati un divertimento e sono riuscito ad affrontarli con una leggerezza non indifferente, vi auguro il meglio e magari, perché no, ritrovarci un giorno come colleghi di lavoro.

Antonio con il quale ho iniziato il mio percorso alle scuole superiori e Francesco che conosco sin dalle elementari sono stati fedeli compagni di "viaggio", con i quali spero vivamente di continuare fino alla fine anche tutto il percorso della magistrale, posso considerarli come fratelli acquisiti ormai, visto tutto quello che ho condiviso con loro, e vorrei ringraziarli per tutti i momenti passati insieme a Via Bezzecca 2 e per questi incredibili tre anni. Un cammino iniziato insieme e finito insieme lo stesso giorno, grazie anche al fatto di esserci fatti forza a vicenda anche quando tutto sembrava andare solo in salita, tendendo una mano sempre a chi, tra di noi, si trovava ad affrontare un ostacolo apparentemente invalicabile. Grazie di cuore ragazzi, perché consapevole del vostro supporto, se dovessi tornare indietro nel tempo, rifarei la scelta di questo percorso altre mille volte ad occhi chiusi perché siete riusciti a darmi la tenacia di non mollare mai davanti ai problemi, siete stati una chiave importante di questo traguardo. Grazie anche a Stefano con il quale abbiamo condiviso, anche se non la stessa casa, il primo anno ed è il quarto coinquilino che avremmo sempre desiderato.

Grazie agli amici di "giù" che nonostante la distanza ci sono sempre stati, so di poter contare su di loro in qualsiasi caso, e ognuno di essi ha contribuito a modo suo: Ismael, Daniele, Lorenzo, Michele, Stefano, Pablo, Lorenzo. Ogni momento passato con loro mi ha dato la carica per affrontare nuove sfide.

Infine, ma non in ordine di importanza, vorrei ringraziare tutti i miei famigliari. Mio padre Franco, mia madre Tania e mia sorella Alessandra che mi hanno insegnato che per avere un buon raccolto bisogna aver seminato bene, che so che nonostante tutto hanno sempre creduto in me dal giorno in cui decisi di buttarmi in questa avventura, assecondandomi per qualsiasi cosa di cui avessi bisogno, cercando di agevolare il mio percorso in ogni modo, sostenendomi sia economicamente che moralmente in ogni occasione, dandomi l'opportunità di concentrarmi a pieno sul mio obiettivo senza distrazioni secondarie. Questo risultato senza il loro supporto sarebbe stato solamente un sogno lontano. La zia Daniela e mia cugina Giovanna per avermi sempre motivato in ogni occasione facendomi

sviluppare un grande autostima, con la quale sono riuscito ad attraversare i periodi più difficili del percorso. Grazie ai miei nonni Assunta, Luciana, Gino che hanno rappresentato un “porto sicuro” nei momenti di “tempesta”, sono riusciti sempre a trovare parole di conforto nei miei confronti, leggendo orgoglio nei loro occhi per ogni mio successo dandomi la spinta a raggiungere la meta tanto desiderata.