



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**  
**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**Studio sulla funzione aerodinamica delle sospensioni di una  
vettura di Formula Sae**

**Study of aerodynamic function from the suspension from the  
Formula Sae car**

Relatore: Chiar.mo/a

**Prof. Crivellini Andrea**

Tesi di Laurea di:

**Trisciani Alessio**

A.A. 2020 / 2021

## SOMMARIO

Questo lavoro si concentra sulle sospensioni della vettura del Polimarche Racing Team, in particolare sull'utilizzo di braccetti dotati di un profilo alare. Le fasi dello studio includono una prima progettazione e una seguente verifica del funzionamento.

L'inizio della tesi parla della storia del Team e della Formula Sae in generale, introducendo brevemente l'organizzazione delle gare.

In seguito, sono spiegate delle basi aerodinamiche e delle soluzioni oggi utilizzate non solo nella nostra auto, ma anche in moltissime auto da corsa.

Successivamente sono presenti delle basi dello studio Fluidodinamico, ossia CFD, analizzando il modello di equazioni e di turbolenza usato nella simulazione.

Infine, si è spiegato il lavoro della tesi, diviso nella progettazione, sia di fattibilità sia di realizzazione mediante CAD, e nella funzionalità, mediante una simulazione fluidodinamica.

# RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il Prof. Crivellini Andrea per aver reso possibile la realizzazione del mio lavoro e aver contribuito allo svolgimento della tesi.

Ringrazio tutti i docenti, assistenti e tecnici attualmente impegnati e coinvolti con il Polimarche Racing Team che permettono a questo progetto di proseguire.

Ringrazio tutti i membri presenti e passati del team, per avermi fatto innamorare ancor più di questo progetto e per aver creato un ambiente fantastico in cui lavorare, oltre che per imparare.

Ringrazio Sara, per essermi stata vicino e avermi sopportato e supportato in ogni esperienza che ho vissuto.

Ringrazio Daniele, Enrico e Giona per avermi imparato moltissime cose, oltre ad avermi fatto ridere in ogni momento della giornata.

Ringrazio i miei genitori per avermi dato la possibilità di raggiungere questo traguardo e per essermi stati vicino in ogni momento.

Ringrazio gli amici e i compagni di corso, con i quali posso dire di essermi divertito e di aver collaborato in esperienze universitarie e non.

# INDICE

<b>1</b>	<b>LA FORMULA STUDENT</b> .....	<b>1</b>
1.1	POLIMARCHE RACING TEAM .....	1
1.2	INTRODUZIONE ALLA FORMULA STUDENT.....	5
1.3	EVENTI STATICI .....	7
1.3.1	Business Plan Presentation Event.....	7
1.3.2	Cost and Manufacturing Event.....	7
1.3.3	Engineering Design Event.....	8
1.3.4	Punteggi Eventi Statici .....	9
1.4	EVENTI DINAMICI.....	9
1.4.1	Acceleration Event .....	9
1.4.2	Skidpad Event.....	10
1.4.3	Autocross Event.....	10
1.4.4	Endurance Event.....	11
1.4.5	Efficiency Event .....	12
1.4.6	Punteggi Eventi Dinamici.....	12
<b>2</b>	<b>AERODINAMICA</b> .....	<b>13</b>
2.1	CONCETTI DI AERODINAMICA.....	13
2.1.1	Streamline.....	13
2.1.2	Strato Limite.....	14
2.1.3	Proprietà dei Fluidi .....	16
2.1.4	Numero di Reynolds.....	16
2.1.5	Spessore dello Strato Limite.....	17
2.1.6	Equazione di Bernoulli .....	18
2.1.7	Distribuzione di Pressione e Coefficienti .....	20
2.1.8	Scia .....	21
2.1.9	Forze e Coefficienti .....	22
2.1.10	Effetto Suolo.....	24
2.2	PROFILI ALARI.....	26

2.2.1	Lift nei Profili .....	29
2.2.2	Coefficienti di Portanza .....	29
2.2.3	Drag nei Profili .....	31
2.2.4	Momenti nei Profili, Centro di Pressione e Centro Aerodinamico .....	32
2.2.5	Influenza del Numero di Reynolds .....	32
2.2.6	Differenza tra Profili.....	33
2.3	ALI FINITE.....	36
2.3.1	Aspect Ratio e Taper Ratio.....	36
2.3.2	Drag Indotto.....	38
2.3.3	Profili a Delta .....	39
2.3.4	Ali ad Alta Portanza .....	39
2.4	MIGLIORIE PER LA PRESTAZIONE DELL'ALA .....	42
2.4.1	Generatore di Vortici .....	42
2.4.2	Coda Ondulata .....	43
2.4.3	Superficie Scanalata .....	44
2.4.4	Gurney Flap .....	45
2.4.5	End Plates .....	46
2.5	INTERAZIONI DELLA SUPERFICIE DELLA PORTANZA.....	47
<b>3</b>	<b>RICHIAMI DI CFD .....</b>	<b>52</b>
3.1	FONDAMENTI DI CFD.....	52
3.2	EQUAZIONI CHE GOVERNANO LO STUDIO CFD .....	54
3.3	EQUAZIONI DIFFERENZIALI PARZIALI .....	54
3.4	METODO DEL VOLUME FINITO .....	56
3.5	TURBOLENZA .....	56
3.6	MODELLO REYNOLDS-AVERAGED NAVIER-STOKES .....	57
3.6.1	Modello Two-Equation .....	58
3.7	MODELLO TURBOLENZA USATO.....	58
3.7.1	Modello K-Epsilon .....	58
3.7.2	Modello K-Omega.....	58
3.7.3	Modello SST K-Omega.....	59
<b>4</b>	<b>INTRODUZIONE DEI PROFILI SUI BRACCETTI.....</b>	<b>60</b>
4.1	STUDIO .....	60
4.1.1	Profilo Utilizzato .....	60
4.1.2	Forma, Materiale e Dimensione .....	61
4.1.3	Fissaggio.....	62

4.1.4	Posizionamento.....	63
4.2	DISEGNO CAD DEI PROFILI .....	64
4.2.1	CAD per la Simulazione.....	64
4.2.2	CAD Reale.....	66
4.3	SIMULAZIONE .....	67
4.3.1	Impostazione Simulazione con i Profili.....	67
4.3.2	Dati Ottenuti .....	82
4.3.3	Dati Ottenuti dalla Simulazione Senza Profili.....	86
4.3.4	Confronto Dati Ottenuti.....	89
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONI E MIGLIORAMENTI FUTURI .....</b>	<b>91</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>93</b>
	<b>SITOGRAFIA.....</b>	<b>93</b>
	<b>SOFTWARE UTILIZZATI .....</b>	<b>93</b>

# 1 LA FORMULA STUDENT

## 1.1 POLIMARCHE RACING TEAM



*Figura 1.1: Polimarche Racing Team durante la competizione in Ungheria*

Nato nel 2013, il Polimarche Racing Team è il team di Formula Student dell'Università Politecnica delle Marche, grazie all'iniziativa del Prof. Dario Amodio in collaborazione con i vari dipartimenti dell'università, che tutt'ora indirizzano lo sviluppo del Team e permettono di proseguire il progetto.

Gli attivi nel campo sono circa 70 studenti (tra ingegneria meccanica, informatica, elettronica ed economia), che dedicano parte delle loro forze nella progettazione e assemblaggio della vettura.

La squadra è caratterizzata da un ordine gerarchico che ricorda una vera e propria struttura aziendale, che prevede Team Leader e Direttore Tecnico (le due figure di maggiore

rilevanza), oltre a un consiglio di amministrazione, composto dai vari capi reparto (Powertrain, Dinamica del veicolo, Aerodinamica, Telaio ed Elettronica), che permettono di coordinare il lavoro dell'intero team, oltre a quello dei singoli reparti.

Le auto fino ad ora prodotte, in ordine cronologico, sono:

- Peacock 1:



*Figura 1.2: Peacock 1*

- Peacock 2



*Figura 1.3: Peacock 2*

- Peacock 3





*Figura 1.4: Peacock 3*

- Peacock 3 EVO



*Figura 1.5: Peacock 3 Evo*

- Peacock 4



*Figura 1.6: Peacock 4*

- Peacock 4 Evoluzione



*Figura 1.7: Peacock 4 Evoluzione*

Lo sviluppo, in particolare Aerodinamico, è stato molto implementato rispetto all'inizio; infatti, si è partiti da un'auto con la sola presenza delle pance nel pacchetto, fino ad arrivare ad un vero e proprio reparto, che ha contribuito alla realizzazione della P4 Evoluzione. Il miglioramento è dato anche dall'utilizzo della galleria del vento, per cui è stato realizzato un modellino compatibile con le dimensioni della camera di quest'ultima.

## 1.2 INTRODUZIONE ALLA FORMULA STUDENT



*Figura 1.8: Foto panoramica di Formula Student East 2021*

La Formula Student, precedentemente nota come Formula SAE, è un campionato tra team degli atenei di tutto il mondo. L'obiettivo è di creare, partendo da zero, vetture in stile formula.

Venne fondato nel 1981 dalla *SAE (Society of Automobile Engineers)*, e le competizioni avvengono in tutto il mondo (Stati Uniti, Asia, Europa), oltre a svariati eventi non ufficiali.

L'idea è quella di far funzionare ogni gruppo proprio come una scuderia: ognuno deve creare, sviluppare, produrre e correre con la propria auto, vincolata da un regolamento tecnico. L'obiettivo delle gare è anche quello di formare gli studenti sia in ambito teorico, ossia dell'automotive, ma anche per lavoro in squadra, rispettando regolamenti, scadenze ed organizzazione.

Il funzionamento delle gare prevede una distinzione di eventi, in particolare eventi Tech, eventi Statici ed Eventi Dinamici.

La prova tech si divide in:

- *Pre-Inspection*: pre-ispezione dell'auto, dove vengono controllati i dispositivi come tute, caschi ed estintori, a cui segue l'egress test;
- *Mechanical Inspection*: i giudici verificano che la macchina sia in sicurezza per scendere in pista, controllando secondo una scaletta ogni parte di essa;
- *Tilt Test*: l'auto viene inclinata di 45° prima e di 60° poi evitare perdite di liquidi (simula il comportamento in curva);



*Figura 1.9: Tilt Test*

- *Brake Test*: l'idea è di simulare una frenata di emergenza, in cui l'auto deve fermarsi rimanendo dritta e bloccando tutte le ruote;
- *Egress Test*: il pilota deve uscire dall'auto, togliendo il volante dalla sede e slacciandosi le cinture, entro 5 secondi (per simulare l'uscita in caso di emergenza);

- *Noise Test*: si verifica che il rumore del motore (tramite fonometro) sia inferiore ai 103 dB a minimo regime e ai 110 dB per una velocità del pistone pari a 15,25 m/s;
- *Vehicle Weighting*: pesa del veicolo senza il pilota ma con carico di carburante.

## 1.3 EVENTI STATICI

Seguono poi eventi statici, che analizzano il progetto della vettura senza l'accensione o il movimento dell'auto.

### 1.3.1 Business Plan Presentation Event

Il *Business Plan Presentation Event* ha il fine di rappresentare la capacità di ogni team di esporre un business plan, basato sulla propria vettura come prodotto. Qui, infatti, i giudici vengono considerati come dei veri e propri investitori. In questo si parla solo dell'auto attuale senza parlare della performance.

### 1.3.2 Cost and Manufacturing Event

L'obiettivo del *Cost and Manufacturing Event* è quello di esporre la capacità di ogni team che concerne il processo produttivo e i relativi costi associati all'auto da corsa, tenendo conto anche delle scelte di compromessi, trattandosi di prototipo.





*Figura 1.10: Cost and Manufacturing Event*

### 1.3.3 Engineering Design Event

Nell'*Engineering Design Event* si espongono i processi di progettazione e di validazione seguente dei componenti dell'auto, motivandone le scelte fatte; si parla sia di pezzi prodotti dagli studenti, sia di quelli acquistati dal mercato.



*Figura 1.11: Engineering Design Event*

### 1.3.4 Punteggi Eventi Statici

- Business Plan Presentation: 75 pt.
- Cost and Manufacturing: 100 pt.
- Engineering Design: 150 pt.

## 1.4 EVENTI DINAMICI

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

### 1.4.1 Acceleration Event

La prova si svolge su un percorso di 75 metri di lunghezza e 5 di larghezza, in cui la macchina deve partire da ferma e compiere questo tratto nel minor tempo possibile. Il totale è di 4 run per team, divisi in due per ogni pilota.

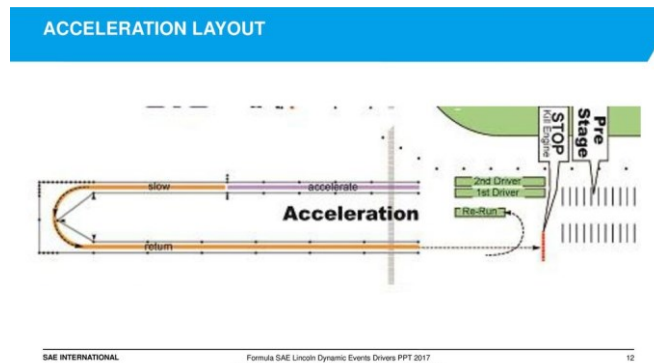


Figura 1.12: Layout Acceleration Event

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

Dove  $T_{team}$  è il miglior tempo del team incluso di penalità mentre  $T_{max}$  è 1,5 volte il miglior tempo tra tutti i team.

## 1.4.2 Skidpad Event

La macchina percorre una pista a forma di 8, in cui deve affrontare prima due curve a destra, di cui solo la seconda è cronometrata, e di seguito due a sinistra (vale lo stesso anche qui). Il diametro interno è di 15,25 m e la distanza tra i due centri è di 18,25 m. Vale la stessa regola dell'Acceleration per il numero di tentativi.

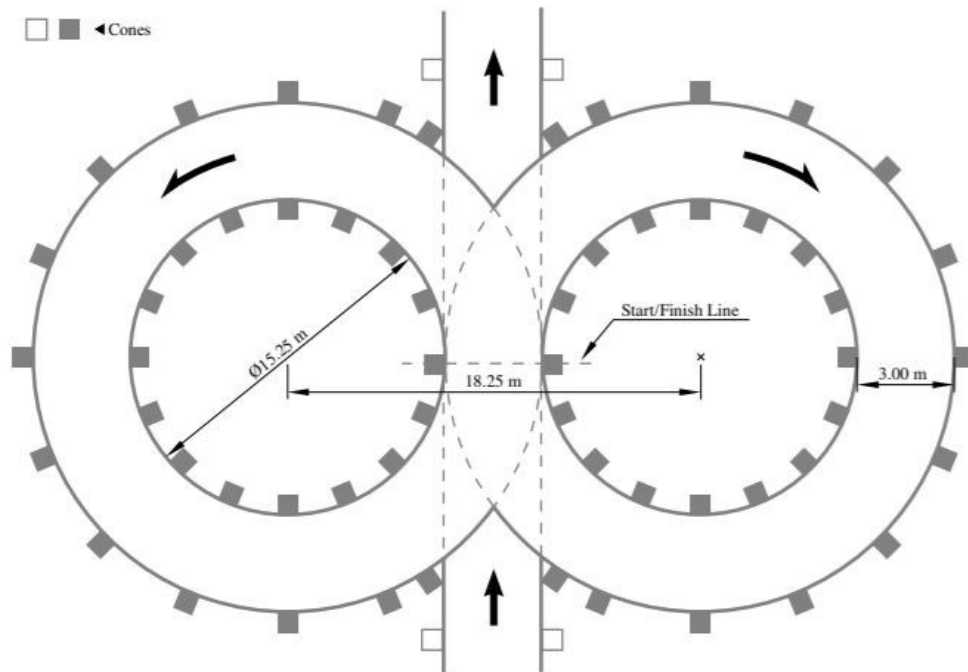


Figura 1.13: Layout Skidpad Event

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

Lo stesso vale  $T_{team}$  mentre  $T_{max}$  è 1,25 volte il tempo migliore della competizione.

## 1.4.3 Autocross Event

Mantenendo l'ordine di 2 tentativi a pilota, per due piloti diversi, l'obiettivo è di completare un layout di pista non comunicato precedentemente nel minor tempo possibile; i margini della pista sono caratterizzati da conetti, e la collisione con uno di questi (o addirittura il passaggio esterno alla carreggiata compresa tra i due bordi) comporta una



penalità in tempo. L'unica possibilità di conoscere il layout per il pilota è attraverso un *trackwalk*.

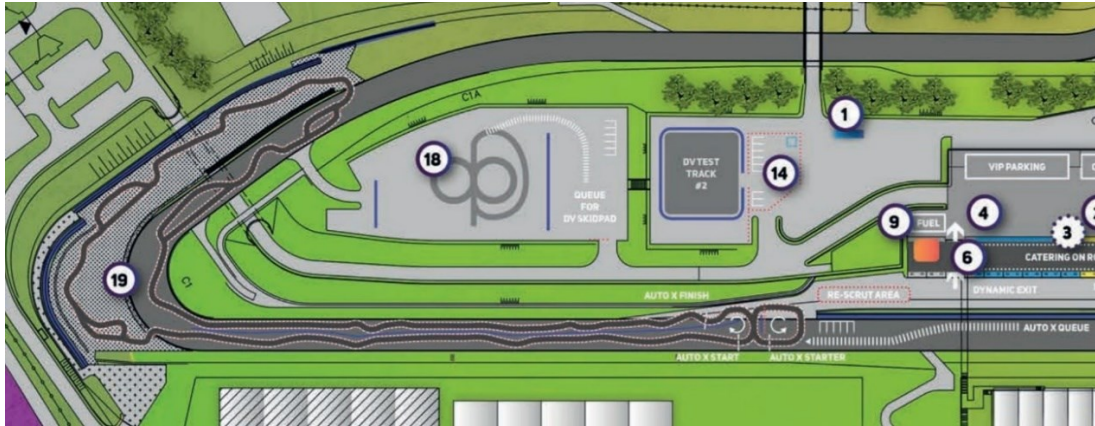


Figura 1.14: Layout Autocross Event in Formula Student East 2021

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

Qui  $T_{team}$  e  $T_{max}$  hanno lo stesso significato dello skidpad.

#### 1.4.4 Endurance Event

Il layout del tracciato è circa lo stesso dell'*Autocross*, ma questa volta si devono compiere ben 22 km, contando il cambio pilota dopo 11 km; infatti, i piloti che dovranno affrontare quest'evento sono due. Le regole con le penalità sono le stesse dell'autocross, ma l'obiettivo è quello di portare a termine l'evento nel minor tempo possibile. L'ordine di esecuzione dell'evento è dato dalla classifica dell'evento precedente. Solo per il raggiungimento dei 22 km si prendono 25 punti, a prescindere dal tempo di completamento.

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

Qui  $T_{team}$  ha sempre lo stesso significato, mentre  $T_{max}$  è il miglior tempo moltiplicato per 1,333.

### 1.4.5 Efficiency Event

Valido solo per coloro che terminano l'*Endurance Event*, questo tiene conto dell'efficienza dei consumi della vettura. Si calcola prima un *Efficiency Factor* (coefficiente che indica l'efficienza della vettura, in funzione del tempo di completamento e del volume di serbatoio), da cui il vero e proprio punteggio.

$$EFFICIENCY\ FACTOR = \frac{T_{min} \cdot V_{min}}{T_{team} \cdot V_{team}}$$

Dove  $T_{team}$  è il tempo della squadra;  $T_{min}$  il miglior tempo tra tutti i team;  $V_{team}$  il volume consumato dalla squadra e  $V_{min}$  il volume minimo consumato tra tutti i team.

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

Dove  $E_{team}$  è l'efficiency factor del team;  $E_{min}$  è il peggior efficiency factor tra tutti i team e  $E_{max}$  l'efficiency factor del miglior team che ha concluso l'endurance.

### 1.4.6 Punteggi Eventi Dinamici

- Acceleration: 75 pt.
- Skidpad: 75 pt.
- Autocross: 100 pt.
- Endurance: 325 pt.
- Efficiency: 100 pt.

## 2 AERODINAMICA

### 2.1 CONCETTI DI AERODINAMICA

L'obiettivo dell'aerodinamica nelle auto da corsa è quello di avere una minore Resistenza all'avanzamento possibile, accompagnata dalla massima forza di Deportanza. La prima è la forza che ha verso opposto a quello di avanzamento, mentre la seconda tende a spingere contro il terreno la vettura. Per le vetture questa forza deve essere massimizzata così da migliorare l'aderenza che le gomme, e quindi la vettura, hanno con l'asfalto, così da riuscire a portare la massima velocità in curva senza scivolare.

Al contrario, per gli aerei la forza di deportanza deve essere sostituita con quella di Portanza, che spinge il veicolo verso l'alto.

#### 2.1.1 Streamline

Per introdurre i concetti di aerodinamica, bisogna innanzitutto parlare delle *Streamline* (linea aerodinamica), che ci permette di visualizzare l'andamento del flusso. Si ottengono semplicemente iniettando del fumo colorato (della stessa densità del fluido) in più punti davanti al corpo.

Queste linee descrivono il movimento del fluido che attraversa un corpo, inoltre sono parallele alla velocità locale dell'aria.

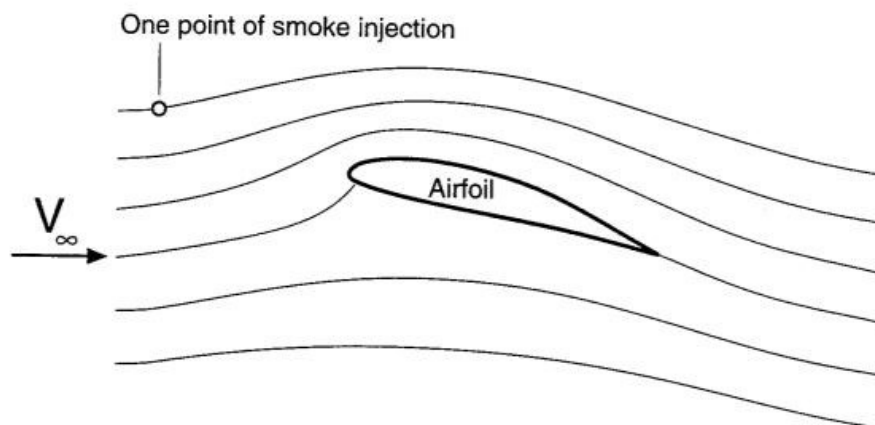


Figura 2.1: Streamline

Andando ad osservare le streamline possiamo notare come l'aria segue il corpo in movimento: se le linee sono vicine alla forma del corpo il flusso si dice Attaccato, altrimenti se non segue la geometria è detto Separato, da cui si ottiene un flusso debole e instabile, che si sistemerà solo a grandi distanze dal corpo.

L'obiettivo è quindi quello di avere più flusso possibile attaccato, sia per incrementare la deportanza (*Downforce*) e di minimizzare la resistenza all'avanzamento (*Drag*).

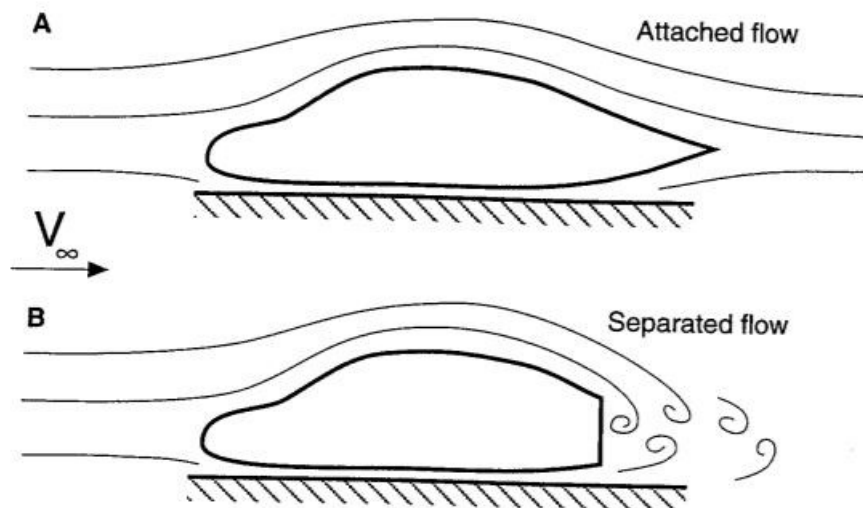


Figura 2.2: Differenza tra flusso attaccato (A) e staccato (B)

I software oggi giorno permettono la ricreazione delle streamline anche nelle simulazioni CFD (*Computational Fluid Design*), che analizzeremo meglio più avanti.

## 2.1.2 Strato Limite

Un altro concetto è quello di Strato Limite (*Boundary Layer*), che (per definizione) utilizziamo per esprimere la distribuzione di velocità in funzione della distanza da una lamina piana. Infatti, nella parte a contatto con questa, a causa dell'attrito, l'aria ha una velocità nulla, che va aumentando al crescere della distanza dalla faccia fino a tornare al valore di velocità indisturbata. Da questo si può anche introdurre un profilo di velocità.

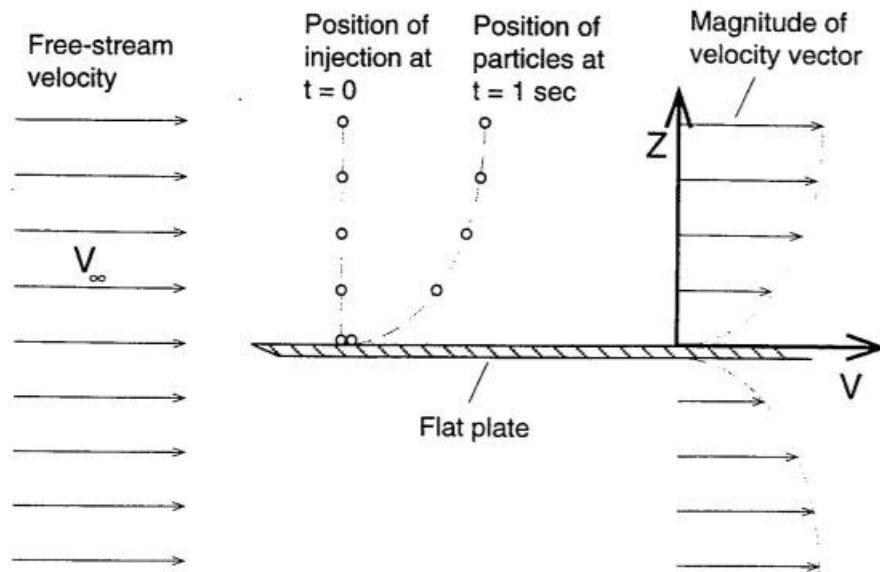


Figura 2.3: Andamento velocità nello strato limite

Torniamo ora al flusso indisturbato ad una certa velocità di attraversamento: se le streamline che vediamo sono tutte parallele possiamo dire che il flusso è Laminare, mentre se si muovono momentaneamente in altre direzioni (cioè con un po' di disordine) il flusso è Turbolento (nonostante la velocità media dell'aria possa essere la stessa).

È estremamente importante sapere che tipo di flusso abbiamo in ogni parte dell'auto, poiché aspetti come la separazione del flusso, ma anche le forze che si generano, variano moltissimo tra queste due tipologie di flusso appunto. Di solito se una macchina si trova in ambiente indisturbato la condizione prevalente è quella laminare, mentre con fattori come vento, presenza di natura, costruzioni o altre auto davanti il flusso diventa turbolento.

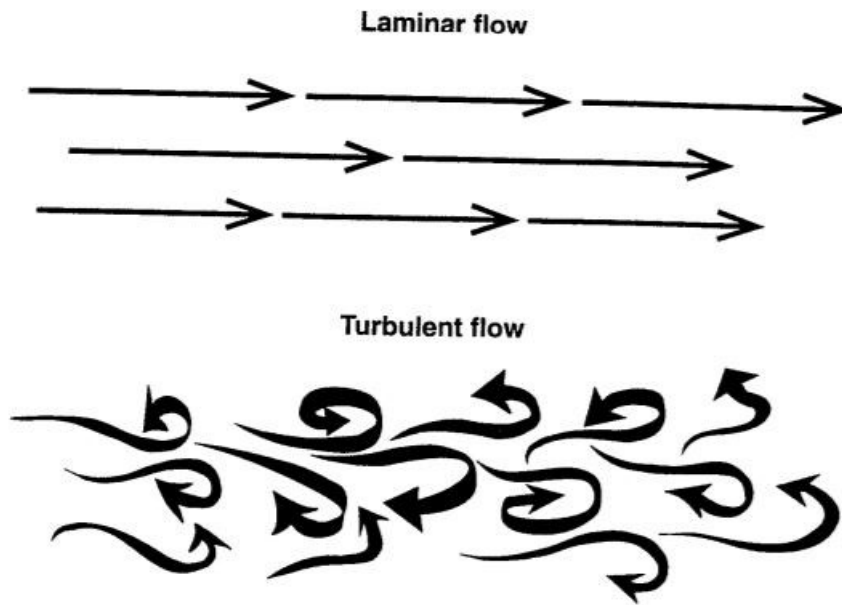


Figura 2.4: Differenza tra flusso laminare (A) e turbolento (B)

### 2.1.3 Proprietà dei Fluidi

È molto importante conoscere le proprietà del fluido, così da avere la possibilità di calcolare le forze che agiscono sull'auto: i principali sono la Densità (indicata dal simbolo  $\rho$ ), che indica la massa per unità di volume, e la Viscosità (indicata da  $\mu$ ), rappresentabile come una resistenza al moto del fluido.

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

	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [Nsec/m <sup>2</sup> ]
Air	1.22	$1.8 \times 10^{-5}$
Water	1000	$1.0 \times 10^{-3}$

Tabella 2.1: Valori  $\rho$  e  $\mu$  di aria e acqua

### 2.1.4 Numero di Reynolds

A questo punto possiamo definire il numero adimensionale più usato, ovvero il *Numero di Reynolds* (Re): indica il rapporto tra le forze d'inerzia e le forze viscosive. Viene usato

per quantificare il prodotto della velocità in funzione del tempo. Diventa molto importante per confrontare differenti modelli in scala o diverse velocità. Inoltre, avere il valore del numero di Reynolds, significa sapere se il flusso è più Laminare o Turbolento.

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

Maggiore è la velocità e maggiore sarà il numero di Reynolds, oltre al flusso più turbolento.

Un altro aspetto interessante è dato dal fatto che due tipi di flussi differenti possono essere considerati simili se hanno lo stesso numero di Reynolds. Per sfruttare questo principio, infatti, si può creare un modello più piccolo da inserire nella galleria del vento oppure si possono usare modelli che lavorano per flussi meno veloci.

## 2.1.5 Spessore dello Strato Limite

Facciamo ora un discorso più approfondito sullo strato limite: la zona frontale solitamente vanta di uno spessore minore (qualche mm) rispetto a quella posteriore del corpo (un ordine di grandezza maggiore). Questo spessore si indica con il simbolo  $\delta$  ed indica la distanza dalla superficie quando la velocità del fluido riprende gli stessi valori di quella indisturbata ( $V_0 = V_\infty$ ).

All'inizio di solito è laminare, ma con l'aumentare della lunghezza percorsa (indicata dalla  $L$  presente nel numero di  $Re$ ) questo diventa turbolento: la regione in cui avviene il passaggio è detta *Zona di Transizione*. Inoltre, conseguentemente allo strato limite più spesso, si ha un attrito maggiore e di conseguenza maggiore Drag.

Possiamo quindi definire un *coefficiente di attrito*, direttamente proporzionale alla forza di attrito tra superficie e aria: questo coefficiente è adimensionale e vale:

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

dove  $\tau$  indica la forza.

Si nota che, in termini di effetti della velocità sull'attrito, lo spessore dello strato limite diminuisce all'aumentare della velocità del flusso. Questo effetto è dato dalla maggior quantità di moto del fluido indisturbato rispetto a quella persa a causa della viscosità vicino alla superficie.

Inoltre, per un certo range di valori di  $Re$  sono possibili entrambi i tipi di moto, con la differenza però che quello laminare ha minore attrito.

Perciò la presenza di moto laminare è preferita, poiché ci permette maggiori prestazioni. Bisogna però tenere conto dell'effetto del *Laminar Bubble*, che viene utilizzato per ottimizzare i flussi in caso di elevate curvature della superficie (che implicherebbe uno staccamento del flusso); vedremo meglio poi questo aspetto. L'obiettivo è quello di far separare il flusso che arriva indisturbato (*Laminar Separation*) per poi riattaccarsi a causa del passaggio dello strato limite in turbolento: questo causa un maggiore trasferimento di quantità di moto, che permetterà al flusso di staccarsi più tardi (o mai). Le streamline che si trovano a ridosso della separazione laminare sono dette Bolle Laminari (*Laminar Bubble*). I vantaggi di questa soluzione sono:

- Il flusso potrebbe staccarsi senza riattaccarsi poi, in assenza di questa regione;
- Appaiono per un basso range di  $Re$  (tra  $10^4$  e  $0,2 \cdot 10^6$ ), per poi sparire all'aumentare della velocità;
- È possibile forzare la transizione da laminare a turbolento disturbando il flusso entro lo strato limite. Consiste nella generazione di piccoli vortici o posizionando una striscia di carta abrasiva nella linea di transizione.

## 2.1.6 Equazione di Bernoulli

Nel moto di un veicolo si contraddistinguono due principali tipi di forze: *Forza di Taglio*, a causa della viscosità, che agisce tangenzialmente alla superficie; e *Pressione*, che agisce in direzione normale alla superficie e contribuisce ad ottenere Lift e Drag.

La pressione in particolare è data differenza della velocità con  $V_0$ , che sarebbe quella all'esterno dello strato limite.



Introduciamo l'Equazione di Bernoulli, che mette in relazione la pressione con la velocità (in realtà anche con l'altezza, ma nel campo automobilistico questa componente è sempre trascurabile).

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

Vuole quindi dire che al diminuire della pressione la velocità aumenta in maniera quadratica; nel nostro caso si deve tener conto della velocità intorno al veicolo.

Un'importante conclusione di questa equazione è che per generare deportanza bisogna avere una velocità superiore nella superficie inferiore del corpo, così da creare una depressione e quindi una forza che spinge l'auto verso il basso. Questo è di fatto il funzionamento delle ali (sia per le auto, sia per gli aerei).

Sfruttano questa equazione due dispositivi, ovvero il Tubo di Pitot e il Tubo Venturi (usati per misurare la velocità del fluido in un punto).

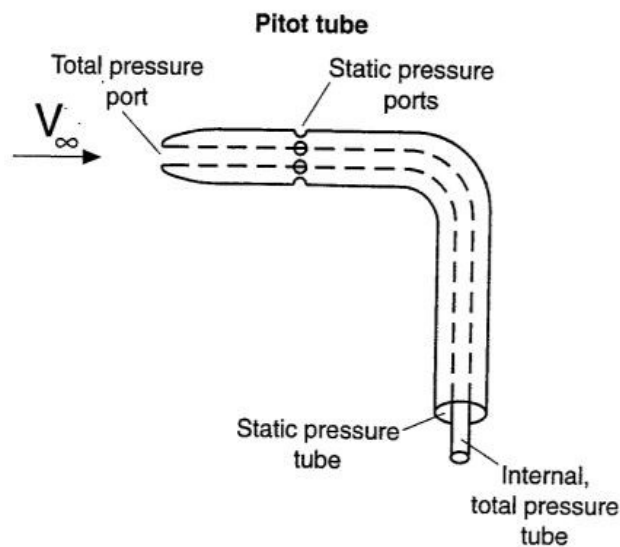


Figura 2.5: Tubo di Pitot

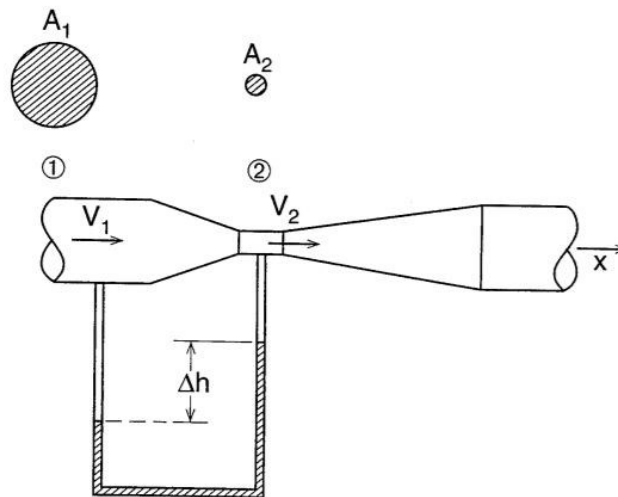


Figura 2.6: Tubo Venturi

### 2.1.7 Distribuzione di Pressione e Coefficienti

Per conoscere i carichi aerodinamici a cui sono soggette le vetture bisogna sapere la distribuzione di pressione a cui è soggetto il veicolo. Inoltre, la misurazione della pressione risulta più semplice rispetto a quella della velocità, poiché basterebbe solo fare un foro sulla superficie del veicolo.

In queste situazioni si utilizza un coefficiente di pressione adimensionale:

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

Bisogna dire che la misura di  $C_p$  è una misurazione locale, oltre ad essere indipendente dalla velocità del veicolo.

Nel *punto di ristagno* si nota che  $C_p$  è pari ad 1, e continua a diminuire fino ad arrivare negativo per punti in cui la pressione tende a  $p_\infty$  (ovvero quella indisturbata) o inferiore (solitamente  $C_p$  arriva fino a -8).

Andiamo ad applicare questi concetti ad una semicirconferenza: considerando con  $\theta$  la posizione angolare del corpo, noteremo che all'inizio avremo un punto di ristagno (per  $\theta = 0^\circ$ ); a seguire ci sarà un aumento della velocità e una diminuzione di  $C_p$  fino ad arrivare

al punto di massimo (e minimo) in corrispondenza di  $90^\circ$  (ossia alla massima altezza del corpo), per tornare a diminuire al punto finale del corpo. Si nota che essendo simmetrico, anche l'andamento di  $V/V_\infty$  e di  $C_p$  lo sarà; infatti, a  $180^\circ$  si avrà un altro punto di ristagno.

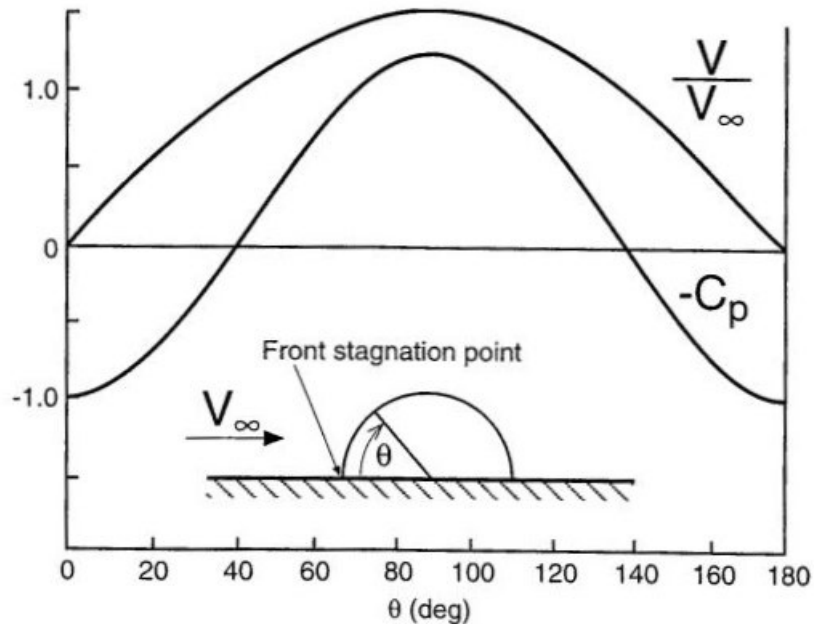


Figura 2.7: Andamento  $C_p$  e Velocità per un corpo a forma di semicirconferenza

Ci sono poi due tipi di distribuzione di pressione:

- *Favorevole*, in cui la pressione diminuisce lungo la streamline;
- *Sfavorevole*, dove la pressione aumenta (ad esempio nella parte posteriore di una macchina, o nel punto di ristagno anteriore)

Nella prima tipologia il flusso rimane più attaccato, oltre che in moto laminare. È quindi una condizione migliore.

### 2.1.8 Scia

Un altro aspetto da considerare è la *scia*: questa consiste nella perdita di quantità di moto (e quindi minore Drag) del flusso d'aria che si trova dietro il veicolo: infatti andando a misurare la velocità del flusso prima e dopo dell'auto avremo delle distribuzioni differenti. È dato infatti dalla separazione dell'aria a causa di una geometria brusca. È

importante sapere che la scia ha una natura periodica, ciò vuol dire che il rilascio dei vortici avviene in uno schema alternato, e la direzione è data dallo strato di separazione (vedremo meglio questo aspetto nell'analisi delle turbolenze).

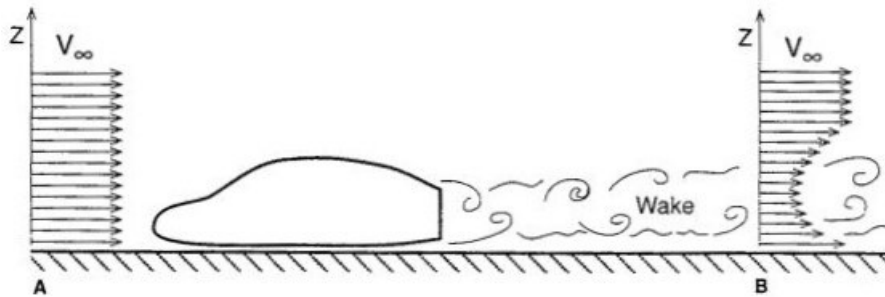


Figura 2.8: Effetto della scia

Un altro tipo di scia è quello che caratterizza i profili, in particolare a causa della differenza di pressione tra intradosso ed estradosso, che si vede molto bene ad esempio con gli aerei. Questo fenomeno è detto *Treccia di Berenice*.

## 2.1.9 Forze e Coefficienti

Tornando alle tipologie di forze aerodinamiche, abbiamo che sono causate da pressione e attrito. La risultante può essere divisa lungo le varie componenti, ma le più importanti sono le due che già abbiamo citato, ovvero Lift e Drag. Solo in caso di forte vento laterale si può tener conto della Forza Laterale (*Side Force*), anche se per la progettazione delle auto moderne questa componente è sempre trascurabile.

Anche per queste forze si definiscono coefficienti adimensionali, che non dipendono dalla velocità ma solo dalla forma dell'auto (e quindi anche dall'area frontale).

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

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

$$C_Y = \frac{Y}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 A}$$

Questi sono i valori per geometrie generiche, come lastre, quadrati e profili alari (per un cerchio,  $C_d$  vale 0.47).


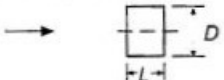
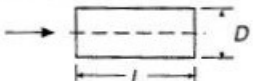



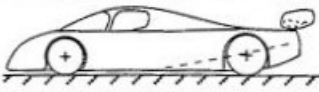
			$C_L$	$C_D$
1	Circular plate		0	1.17
2	Circular cylinder $L/D < 1$		0	1.15
3	Circular cylinder $L/D > 2$		0	0.82
4	Low drag body of revolution		0	0.04
5	Low drag vehicle near the ground		0.18	0.15
6	Generic automobile		0.32	0.43
7	Prototype race car		-3.00	0.75

Tabella 2.2: Valori  $C_l$  e  $C_d$  di varie forme

Una conclusione che si può trarre da questa tabella (osservando in particolare la differenza tra il corpo 4 e il 5) è che la presenza del suolo può generare portanza.

## 2.1.10 Effetto Suolo

Andando a studiare due profili particolari notiamo una differenza:

- Con un profilo simmetrico andandolo ad avvicinare al suolo si ha un'accelerazione del flusso nella parte inferiore del corpo così che, per Bernoulli, si genera deportanza, a discapito del Drag che aumenta dovuto dalla separazione del fluido nella parte posteriore del corpo;
- Con un profilo a forma di Semi-ellisse al contrario il flusso viene bloccato sotto il corpo, a causa dei bordi taglienti del profilo, generando quindi portanza.

Si nota però che il valore di Drag per un corpo semi-ellittico è inferiore rispetto a quello simmetrico.

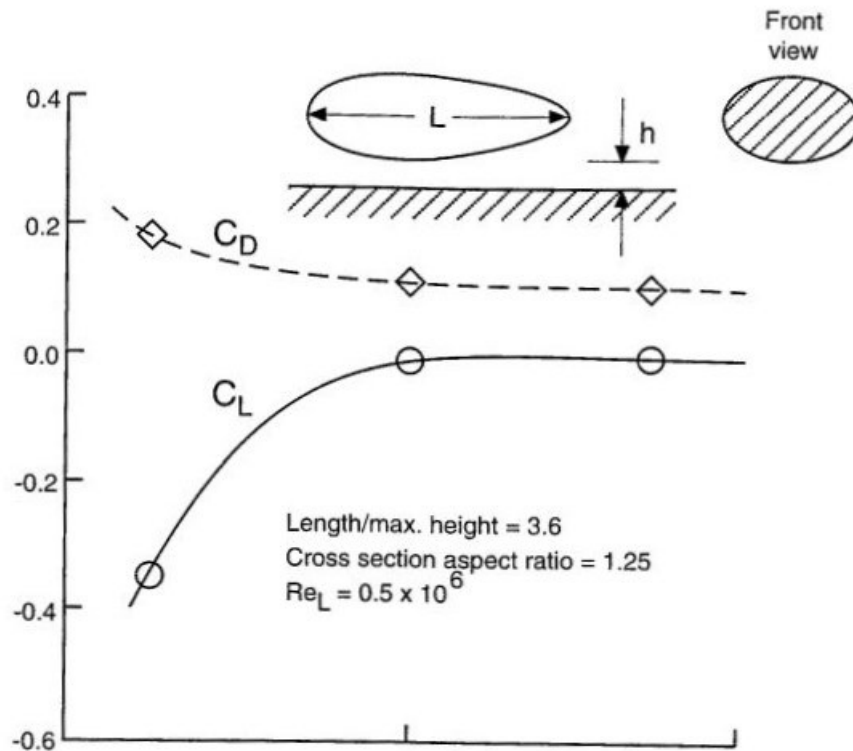


Figura 2.9:  $C_l$  e  $C_a$  per un profilo ellittico con la presenza del suolo

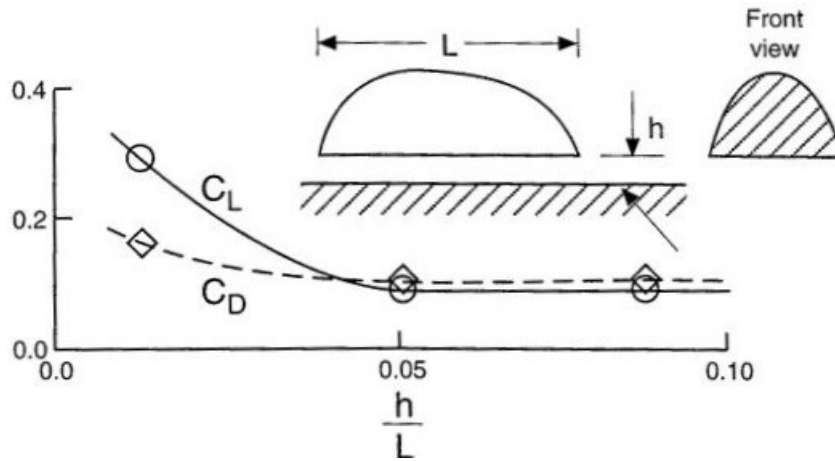


Figura 2.10:  $C_L$  e  $C_D$  per un profilo semi-ellittico con la presenza del suolo

Dalle seguenti tabelle abbiamo quanto ogni fattore influisce sui coefficienti di Drag e di Lift:

Location	$\Delta C_D$
1. Skin friction	0.04-0.05
2. Cooling drag	0.00-0.06
3. Internal flow, ventilation	0.00-0.05
4. Form drag (flow separations)	0.00-0.45
5. Lift-induced drag	0.00-0.60

Tabella 2.3: Dipendenza del singolo effetto per il valore di  $C_D$

Location	$\Delta C_L$
1. Vehicle body	0.35 to (-0.10)
2. Wings	0.00 to (-2.00)
3. Wing/body interaction	0.00 to (-2.00)

Tabella 2.4: Dipendenza del singolo effetto per il valore di  $C_L$

## 2.2 PROFILI ALARI

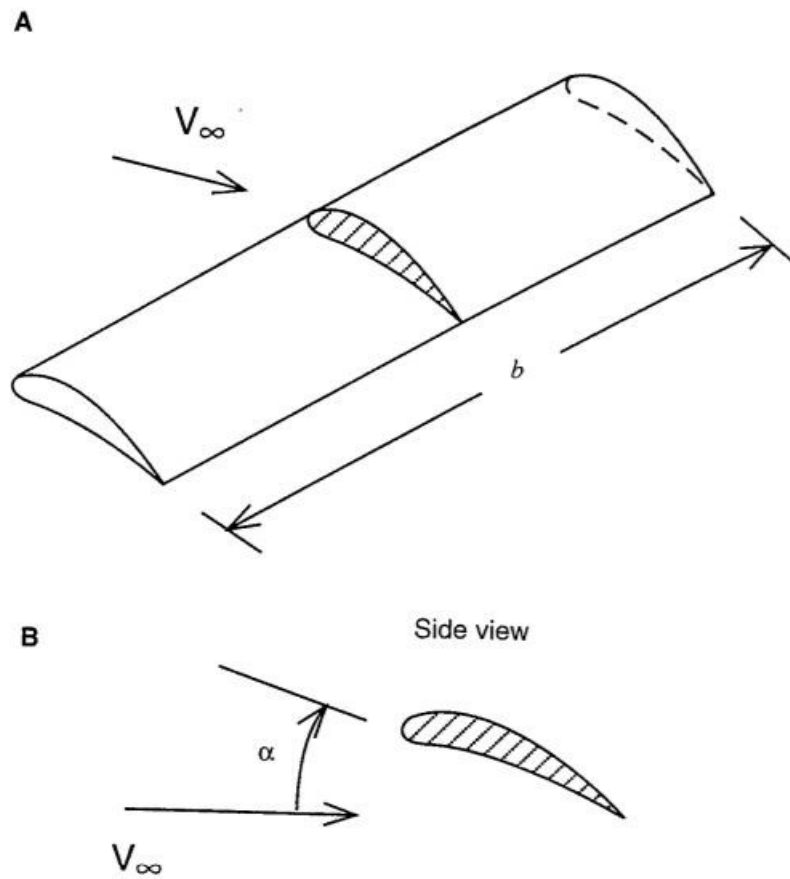
Un profilo alare è una sezione bidimensionale di un'ala tridimensionale. Ogni profilo è caratterizzato da:

- *Angolo di attacco*  $\alpha$  (relativo al flusso d'aria);
- *Lunghezza di corda*  $c$ ;
- *Larghezza del profilo*  $b$ ;
- *Massimo spessore*  $t$ ;
- Un naso (che sarebbe la parte che impatta con l'aria) tondeggiante;
- Una coda puntiforme.

I profili possono essere di due tipi: simmetrici o con una linea di *camber*. Approfondiremo meglio dopo le differenze tra queste due tipologie.

Riconosciamo anche un punto di ristagno (ossia della streamline che si interrompe sul naso del profilo, figura 2.12).





*Figura 2.11: Profilo Alare (A) con la vista laterale in sezione (B)*

In questa tipologia di profilo abbiamo generazione di portanza.

Inoltre, appena sopra il punto di ristagno abbiamo il flusso che tende subito a curvare intorno al naso (nella parte dell'estradosso), risultando in una zona di bassa pressione. Si nota infatti un avvicinarsi delle linee al di sopra della superficie superiore del profilo.

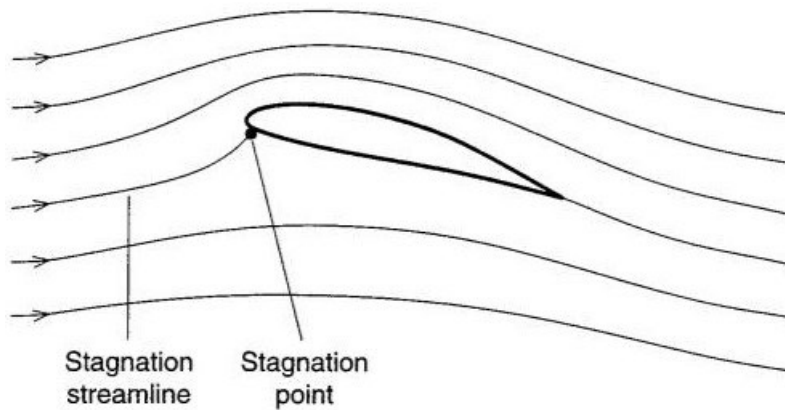


Figura 2.12: Andamento Streamline sopra, sotto e sul naso del profilo

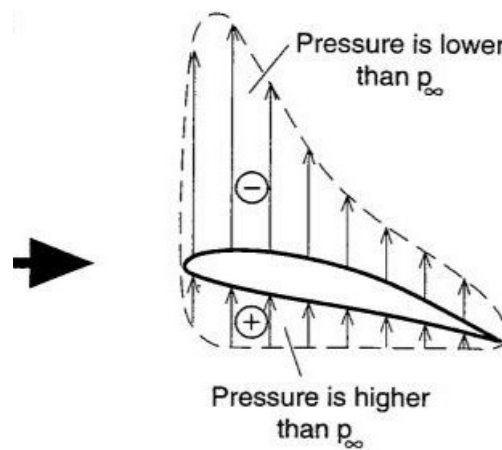


Figura 2.13: Distribuzione di pressione sopra e sotto un profilo

Le frecce verticali indicano la direzione e il verso della forza di pressione che agisce sulla superficie.

Consideriamo l'influenza della geometria: a sinistra abbiamo il caso di un biconvesso simmetrico ad un certo angolo di attacco, mentre in mezzo un profilo ad arco di circonferenza con  $0^\circ$  di angolo di attacco. La combinazione di questi due genera il terzo profilo (che risulta quindi "camberato").

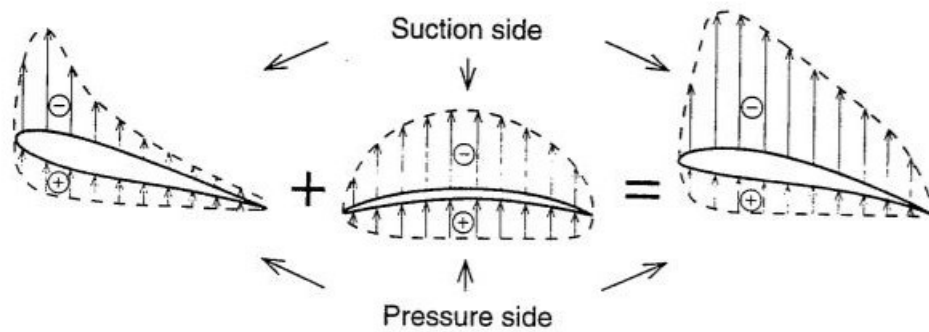


Figura 2.14: Distribuzione in un: profilo simmetrico e angolato (sinistra); profilo sottile semicilindrico o camberato (centro); profilo angolato e camberato (destra)

In conclusione, abbiamo che la generazione di Lift è data dall'angolo di attacco  $\alpha$  e dalla geometria del camber (ossia il profilo centrale).

### 2.2.1 Lift nei Profili

La dipendenza della forza di Lift con l'angolo di attacco è lineare, con la costante di proporzionalità che vale  $2\pi$ . Così vale per profili simmetrici, mentre quelli con camber vengono visti con un angolo di attacco che vale " $\alpha + \alpha_0$ " (sommato dunque di un angolo aggiuntivo dipendente dal camber del profilo).

Il risultato è che per  $\alpha = 0$  in un profilo simmetrico la forza di Lift è nulla, mentre in uno camberato no. Solitamente l'angolo aggiuntivo  $\alpha_0$  vale qualche grado, ma risulta complicato determinarlo esattamente.

### 2.2.2 Coefficienti di Portanza

Come per gli oggetti, anche i profili hanno un coefficiente di portanza adimensionale (e non dipendente dalla dimensione normale alla sezione del profilo) che vale, per entrambe le tipologie di profili:

$$C_l = \frac{l}{\left(\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 c\right)}$$

$$C_l = 2\pi\alpha$$

$$C_l = 2\pi(\alpha + \alpha_{L0})$$

In particolare, le prime due per profili simmetrici mentre la terza per uno camberato.

Un secondo aspetto è nella coda del profilo, infatti l'influenza maggiore per la forza di Lift avviene in quella zona. Per andare a ottenere una maggiore forza, dunque, l'idea è di andare a variare la geometria della linea di camber, agendo sul profilo oppure inserendo *flap* aggiuntivi, come per gli aerei o per le auto formula.

Bisogna notare però che queste considerazioni valgono solo nel caso di flusso attaccato: infatti si può notare che per angoli di attacco troppo elevati si arriva al fenomeno dello *Stallo*, in cui il flusso sull'estradosso non riesce a seguire la geometria del profilo. Di conseguenza la forza di Lift diminuisce, mentre quella di Drag aumenta. Ci sono due tipologie di stallo: una brusca, dovuta a profili troppo sottili o a nasi troppo appuntiti, e una graduale, che interessa profili più spessi e con maggiore camber.

Nella prima tipologia si sviluppa uno stallo che parte fin dal naso del profilo, mentre nella seconda il distacco del fluido interessa solo la coda (o la parte posteriore).

L'influenza dello spessore nella portanza (in particolare nel  $C_L$ ) è positiva, ossia che maggiore è lo spessore e maggiore è il valore di  $C_L$  che si riesce ad ottenere a parità di angolo di attacco (oltre che riuscire ad avere uno stallo posticipato). Questa tendenza però varia quando il profilo raggiunge il 12% di spessore; infatti, il grafico di  $C_L$  torna a diminuire.

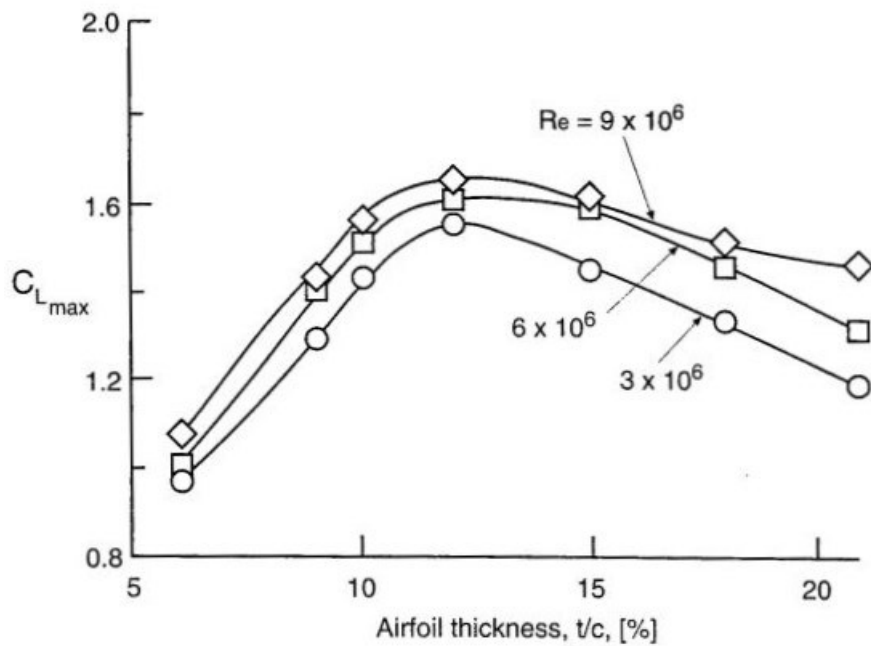


Figura 2.15: Andamento  $C_l$  in funzione dello spessore del profilo

### 2.2.3 Drag nei Profili

La forza di Drag come visto precedentemente consiste nell'attrito viscoso dell'aria con il profilo. Maggiore, infatti, è lo spessore dello strato limite e maggiore è la la Drag. Analizzando anche con la tipologia di moto, la Drag sarà minore per un flusso laminare.

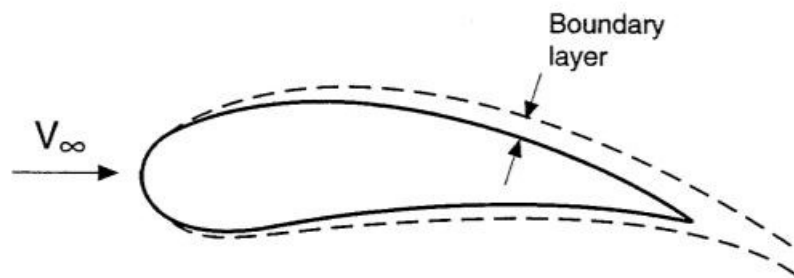


Figura 2.16: Strato limite in un profilo

In realtà nella parte iniziale lo strato limite sarà infatti laminare, ma con l'attraversamento del profilo si avrà una transizione a turbolento, a causa di un aumento della velocità. Influisce anche la rugosità della superficie: maggiore è questa e prima si avrà questa transizione. Se il flusso invece è parzialmente separato l'effetto negativo del Drag è dato

sia dalla presenza di flusso separato appunto, ma anche perché viene a mancare l'aspirazione nella parte anteriore del profilo, che ne compensa l'attrito viscoso dell'aria e quindi ne migliora il drag.

Si può anche dedurre che all'aumentare di  $\alpha$  il Drag aumenta.

## 2.2.4 Momenti nei Profili, Centro di Pressione e Centro Aerodinamico

Fino ad ora abbiamo visto direzione e verso delle forze di Lift e Drag. Entrambe sono ottenute integrando la distribuzione di pressione sulla superficie del profilo. Manca ancora da vedere dove queste sono applicate (in particolare per quella di Lift).

Si nota che l'applicazione della forza di Lift viene fatta nel *Centro di Pressione*  $x_{CP}$ , che nei profili simmetrici e con  $\alpha=0$  si trova a  $\frac{1}{4}$  della corda; alcune evidenze sperimentali, inoltre, hanno visto che all'aumentare dell'angolo di attacco il centro di pressione si sposta dietro. Infatti, andando a vedere il Momento sviluppato nel centro di pressione, questo sarà nullo.

Definiamo inoltre il *Centro Aerodinamico*, ossia il punto in cui il momento di beccheggio del profilo è indipendente dall'angolo di attacco e vale, per la maggior parte di profili,  $c/4$  (ossia a  $\frac{1}{4}$  della corda).

Nella progettazione di auto o veicoli è più importante conoscere il centro di pressione rispetto a quello aerodinamico.

Nei profili camberati invece l'angolo di attacco influenza il centro di pressione, mentre quello aerodinamico rimane sempre alla stessa altezza.

## 2.2.5 Influenza del Numero di Reynolds

Abbiamo visto che all'aumentare dei Reynolds lo strato limite ha spessore minore; ciò si traduce in minore drag. Inoltre, avendo il flusso una maggiore quantità di moto, questo fenomeno favorisce il ritardo del distacco della vena fluida. Di conseguenza l'angolo di attacco massimo possibile aumenta.

Contrariamente però un numero di Reynolds maggiore comporta, all'aumentare dell'angolo di attacco, uno stallo più brusco.

Un altro fenomeno che si genera è quello della transizione in bolla laminare, ossia di un primo distacco della vena fluida seguito da un riattaccamento, creando in mezzo una bolla con del flusso che ricircola. Si verifica soprattutto per profili camerati o per profili con elevato angolo di attacco.

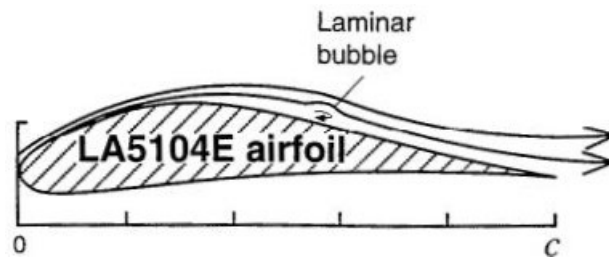


Figura 2.17: Effetti Laminar Bubble

Possiamo ora trarre delle conclusioni intermedie:

- Attrito e quindi Drag sono minori per uno strato limite laminare;
- Con un gradiente di pressione vantaggioso un flusso indisturbato rimane laminare per maggiori distanze lungo il profilo, ovvero diventa turbolento dopo;
- Con uno strato limite turbolento il flusso si separa dopo;
- Un gradiente di pressione favorevole posticipa la separazione.

Si deduce quindi che per ottenere un minore Drag il flusso deve essere mantenuto laminare il più possibile; è anche vero che per ottenere coefficienti di Lift migliori il flusso deve anche essere turbolento. In pratica si usano superfici scabrose (o generatori di vortici) nel punto di transizione dello strato limite per migliorare il massimo  $C_L$ .

Per questo motivo si usano due tipologie di profili nelle competizioni: una che ha minore drag e un'altra che permette maggiori valori di Lift.

## 2.2.6 Differenza tra Profili

La differenza principale tra queste due tipologie di superficie risiede nel naso e nello spessore: infatti, per profili con minore drag si vuole uno strato limite laminare. Si nota

dalla figura sotto che andando ad utilizzare un profilo con uno spessore maggiore (posizionato ad una distanza maggiore dall'inizio del profilo), con un naso più appuntito e con una linea di camber differente (sempre nella parte anteriore) si ha un punto di transizione posticipato, rispetto a quello tratteggiato.

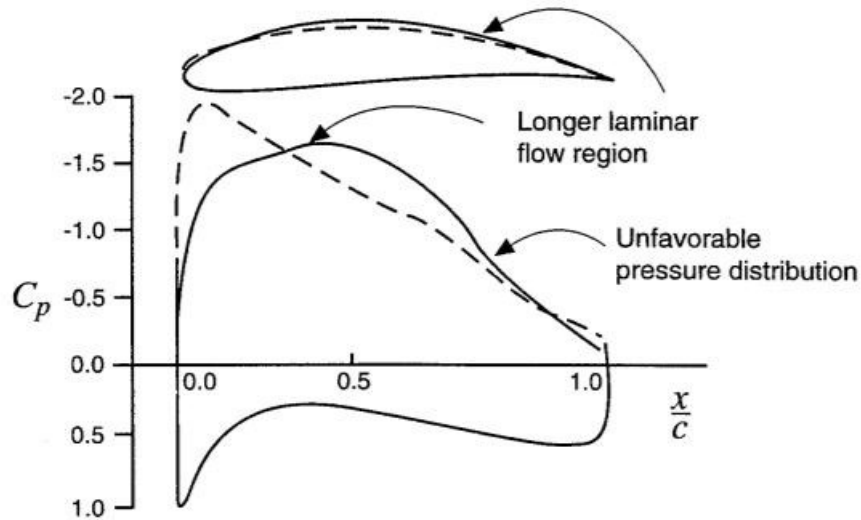


Figura 2.18: Differenza  $C_p$  tra un profilo con maggiore lift (tratteggiato) e uno con minore drag (continuo)

In particolare, a parità di angolo di attacco (e quindi di  $C_L$ ), il  $C_D$  è molto minore per un range di valori. Questa è la differenza tra due profili *NACA 2415* e *NACA64<sub>2</sub>-415*. Ovviamente il secondo profilo risulta essere migliore in Drag per valori di  $C_L$  intermedi, ma negli altri range dei valori di angolo di attacco la situazione peggiora.



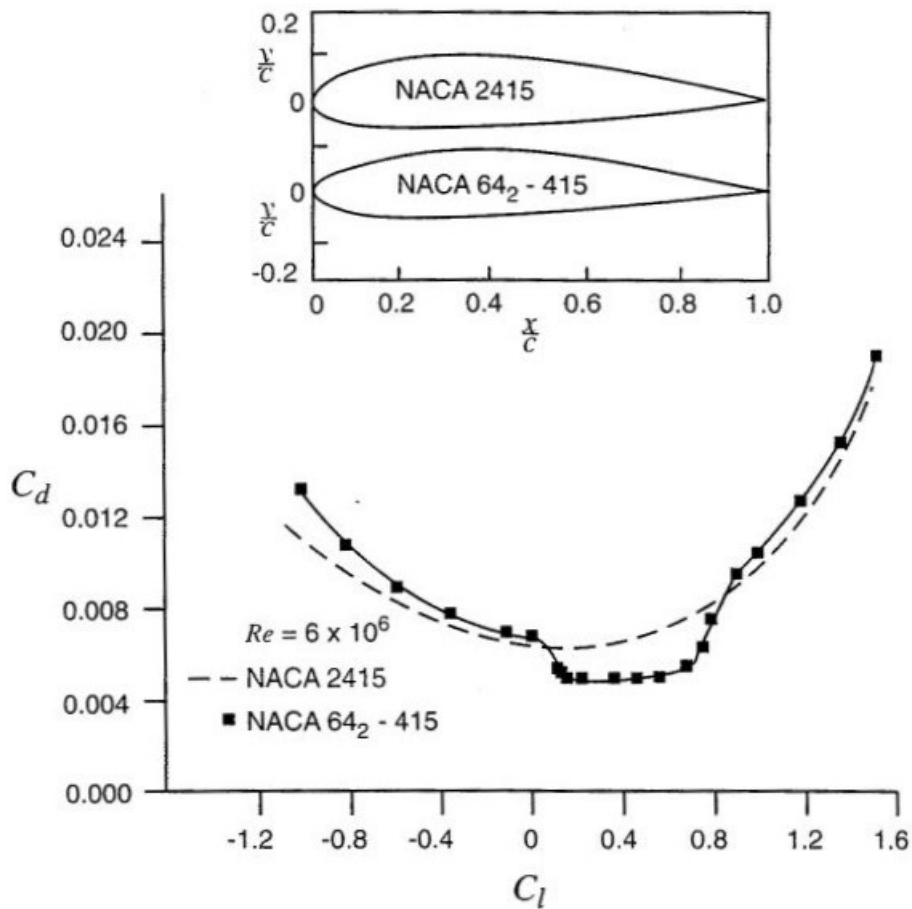


Figura 2.19: Andamento  $C_d$  in funzione di  $C_l$  o dell'angolo di attacco

Si può inoltre dire che usare un profilo con un naso più appuntito (se non deve essere variata l'incidenza), proprio come visto sopra, permette di avere un rapporto Lift su Drag migliore. Questo è dato anche dal fatto che il punto di ristagno si trova più vicino al naso del profilo, poiché il flusso viene aspirato nella parte superiore con meno forza, garantendo uno spessore dello strato limite minore. Proprio per questo nelle auto da corsa si utilizza questa soluzione, mentre per aerei (ad esempio) il profilo ha un naso più ingombrante.

In conclusione, per avere un profilo con maggiore lift, è necessario che sia più spesso e più camberato, mentre per una migliore drag questo deve essere l'opposto.

## 2.3 ALI FINITE

Fino ad ora ci siamo concentrati solo sulla geometria della sezione. Ora andiamo anche a vedere gli aspetti della direzione normale a questo piano.

### 2.3.1 Aspect Ratio e Taper Ratio

Definiamo innanzitutto

- L'*Aspect Ratio* (A.R.): indica la larghezza alla seconda sull'area occupata dall'ala vista dall'alto;

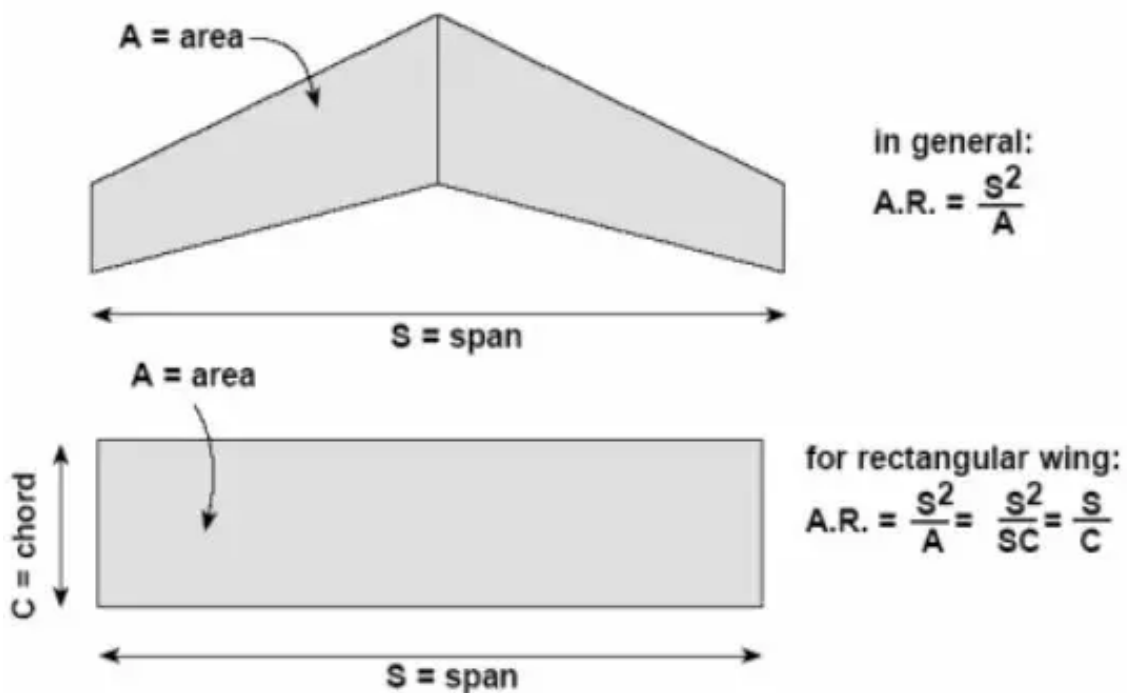


Figura 2.20: Aspect Ratio

- Il *Taper Ratio* ( $\lambda$ ): esprime il rapporto tra la corda del profilo nella fine della larghezza e la corda nel mezzo della larghezza.

$$\lambda = \frac{c_t}{c_0}$$

Questi sono i principali tipi di profili usati:

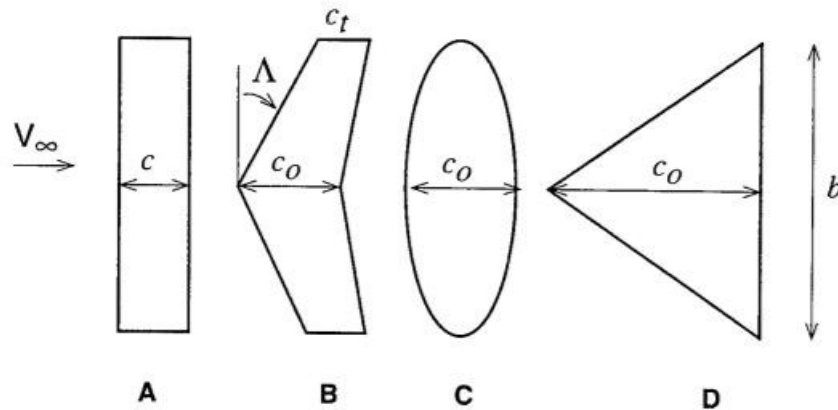


Figura 2.21: Profili maggiormente utilizzati

Si nota che la differenza di pressione tra intradosso ed estradosso è notevolmente minore nei bordi dell'ala; infatti, si formano le sopra citate Trecce di Berenice, che riducono la potenza portante dell'ala. Questo fenomeno è più incisivo per ali con basso A.R., ossia per profili non estesi in larghezza.

Possiamo ottenere il coefficiente di portanza anche per ali tridimensionali, in cui non uso il coefficiente di  $2\pi$  ma un coefficiente  $C_{L\alpha}$  che è inferiore a  $2\pi$ . Da alcuni studi risulta che maggiore è l'aspect ratio dell'ala e maggiore è la pendenza del coefficiente di Portanza ( $C_{L\alpha}$ ).

$$C_L = \frac{\text{lift}}{\left(\frac{1}{2}\right)\rho V_\infty^2 A}$$

$$C_L = C_{L\alpha} (\alpha + \alpha_{L_0})$$

In cui:

$$C_{L\alpha} = \frac{2\pi}{1 + 2/(\mathcal{AR})}$$

Anche il taper ratio influenza la portanza delle ali: al diminuire di  $\lambda$  il valore di  $C_L$  in prossimità del bordo aumenta. Per valori di  $\lambda$  troppo piccoli l'effetto conseguente è lo stallo, che viene corretto con una distorsione del profilo.

### 2.3.2 Drag Indotto

Inserendo nel discorso anche l'effetto suolo abbiamo che in generale si ha un aumento di Portanza, in particolare per ali con un basso aspect ratio.

Andiamo a considerare anche un tipo di ala a diedro (tipo B della figura 2.21), il cui l'angolo è prima positivo e poi negativo: il lift nel primo caso diminuisce, mentre nel secondo aumenta. A causa quindi dei vortici che si formano ai lati del profilo si ha che l'angolo di attacco varia appena, derivando in un *Drag indotto*. Questo fenomeno è accentuato per i profili con basso aspect ratio.

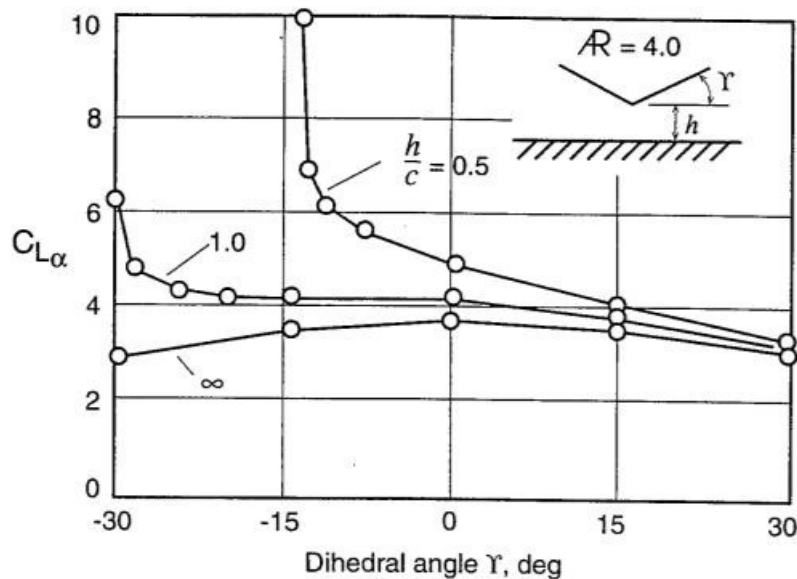


Figura 2.22: Andamento  $C_{L\alpha}$  in funzione dell'angolo di diedro

In pratica si ha che la portanza di un'ala con la presenza dell'effetto suolo genera un drag indotto, che vale (stimato per ali ellittiche):

$$C_{D_i} = \left( \frac{1}{\pi AR} \right) C_L^2$$

$$C_D = C_{D_i} + C_{D_0}$$

Risulta quindi che il drag totale è dato dalla somma tra quello indotto e quello viscoso, che a sua volta è la combinazione della componente di attrito con quella di stallo.

### 2.3.3 Profili a Delta

I profili visti fino ad ora parlano di capacità di generare lift solo con flusso attaccato. Esistono però altre ali in cui il flusso deve staccarsi, come per esempio un profilo a forma di triangolo (*o delta*, tipo D figura 2.21). In questa tipologia l'angolo di attacco deve essere elevato per poter generare vortici nella parte superiore dell'ala. Questi moti vorticosi, inoltre, sono ad elevata velocità, quindi (da Bernoulli) a bassa pressione; possono essere visti come i vortici d'estremità nelle ali rettangolari. Le formule seguenti sono valide per ali sottili (come quella a delta), in particolare la prima per bassi aspect ratio mentre la seconda per alti valori di angoli di attacco. Solitamente però questi profili hanno maggiore Drag (espresso dalla terza formula).

$$C_L = \left(\frac{\pi}{2}\right) AR \cdot \sin \alpha$$

$$C_D = C_L \tan \alpha$$

In entrambe le ali per angoli di attacco troppo elevati è presente lo stallo. Nel caso dei profili è dovuto alla separazione del flusso; per la tipologia di ali a delta invece è dato dalla distruzione dei vortici.

In pratica si predilige l'uso della prima tipologia, poiché presenta meno Drag ed è più funzionale.

### 2.3.4 Ali ad Alta Portanza

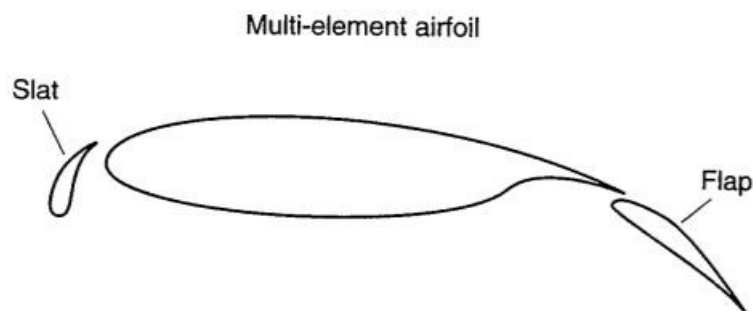
In alcune situazioni l'ala richiesta deve dare il maggior valore possibile di portanza. Le tecniche usate sono:

- Un'area aumentata;
- Un camber aumentato;
- Usando Flap aggiuntivi o un profilo *soffiante*.

La più comune è l'ultima, in particolare con un'ala dotata di più profili. Quella soffiante invece viene usata per jet, ed è capace di generare elevatissimi valori di portanza. Nelle auto da corsa però è più soggetta ad instabilità, causando frenate improvvise che si traducono in perdita di Lift.

Tornando all'ala con più profili, i vantaggi di tale soluzione sono dati dalla possibilità di aumentare il camber maggiormente rispetto a un solo profilo; dare maggiore energia al flusso; interazione favorevole tra i vari profili.

Bisogna notare che in precedenza era stato detto che la coda del profilo è la parte in cui variando il camber si ottiene grande vantaggio in termini di lift. In pratica con l'utilizzo di più flap si va ad applicare questo aspetto.



*Figura 2.23: Ala ad alta portanza con profilo in più anteriore e posteriore*

Sempre combinato a questo aspetto, a causa dell'incremento di lift seguito da una maggiore aspirazione, si usa un profilo più a punta, così da prevenire il distacco del flusso (senza effetti sulla Lift).

Si nota che aggiungendo un profilo davanti a quello principale il range di angolo di attacco senza che l'ala stalli diventa più elevato.

Nelle competizioni, poiché il regolamento impone dimensioni massime, le ali delle auto non hanno un elevato aspect ratio, mentre quelle degli aerei vengono costruite con tale presupposto. Si dimostra tale differenza tra questi due grafici, in cui il primo è quello

caratterizzato dall'elevato aspect ratio ma con un modello bidimensionale, mentre il secondo aspect ratio è minore e il modello è tridimensionale. La differenza tra i due è aumentata anche perché nel primo il modello è in due dimensioni, ciò vuol dire con valori di portanza maggiori.

Solitamente nel caso tridimensionale con bassi valori di aspect ratio inferiori a 6 è pari a  $C_{Lmax}=1,2 \text{ A.R.}$

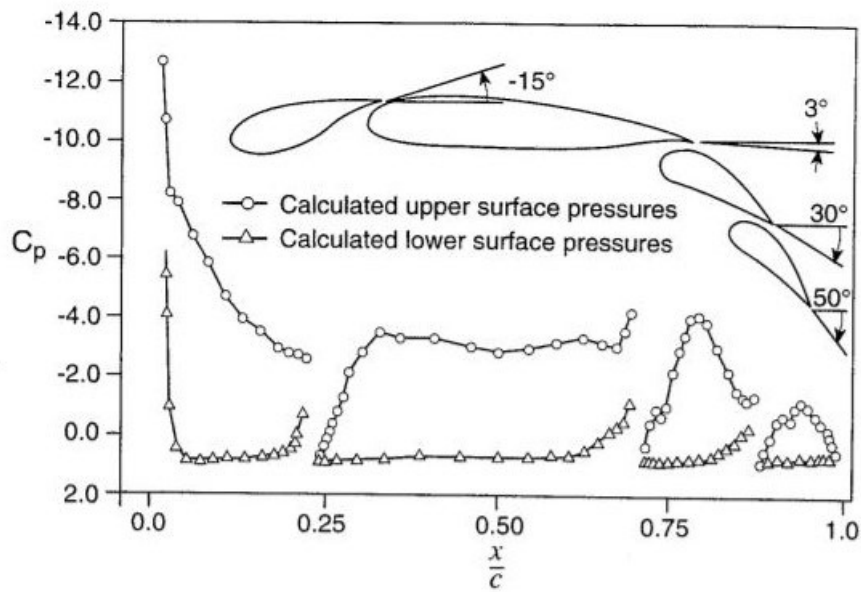


Figura 2.24: Modello tridimensionale

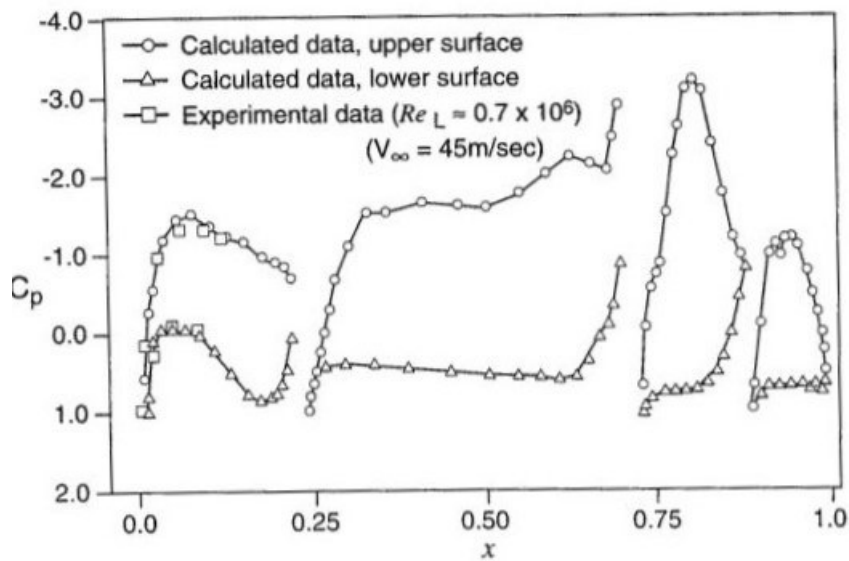


Figura 2.25: Modello bidimensionale

## 2.4 MIGLIORIE PER LA PRESTAZIONE DELL'ALA

Possono essere sia attive (jet, iniezione polimerica, ecc.) che passive (dispositivi permanenti), ma nelle competizioni solo quelle passive sono possibili.

### 2.4.1 Generatore di Vortici

Uno dei più noti è il *generatore di vortici*: questo è un dispositivo poco più alto dello spessore dello strato limite locale, ma viene posto nel punto in cui il flusso si stacca. Così facendo si riesce a dare più quantità di moto e lo stacco del fluido viene posticipato. Si riesce ad avere maggiori valori di Lift e di Drag per elevati coefficienti di portanza (poiché il drag dovuto dallo stallo viene annullato), mentre per bassi valori dei coefficienti la Drag aumenta inevitabilmente.



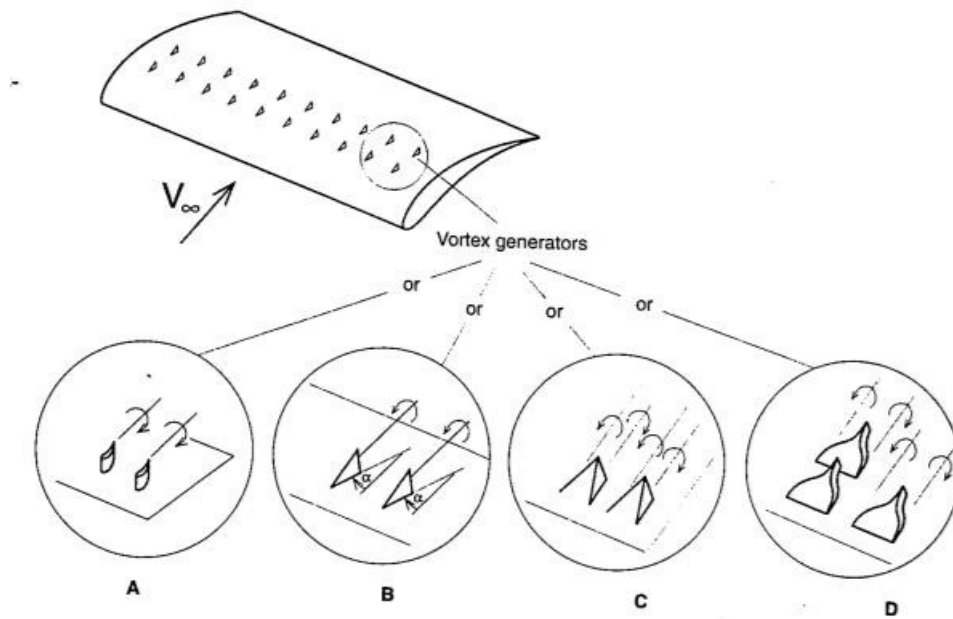


Figura 2.26: Soluzioni per generatori di vortici

## 2.4.2 Coda Ondulata

In alternativa si può usare una coda ondulata, così da mischiare i flussi con diversa pressione provenienti da sopra e da sotto il profilo. Così si riduce la separazione in prossimità della fine del profilo, oltre a garantire una massima portanza più elevata.

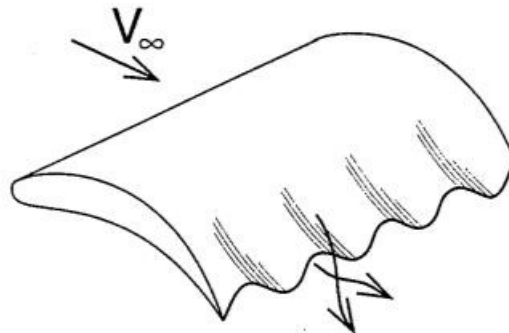


Figura 2.27: Superficie ondulata

### 2.4.3 Superficie Scanalata

Se al contrario dovessimo migliorare il Drag si potrebbe usare un profilo con una superficie scanalata, i cui solchi sono paralleli alla direzione del flusso. Analizzando il funzionamento di un normale profilo si ha che sulle pareti la velocità è nulla, così si creano vortici; in particolare un filamento di vortici, che a causa dell'instabilità tende ad alzarsi dalla superficie, fino a rompersi e a disporsi longitudinalmente. Di seguito il flusso assume un moto turbolento. Con questa soluzione si evita tale rottura, infatti il filo del vortice rimane ordinato, laminare in particolare, impedendo la conversione del flusso in moto turbolento. Si riesce così a migliorare il Drag.

L'unico aspetto importante per un suo utilizzo è dato dalla necessità di conoscere la direzione del flusso, poiché queste devono essere rigorosamente parallele.

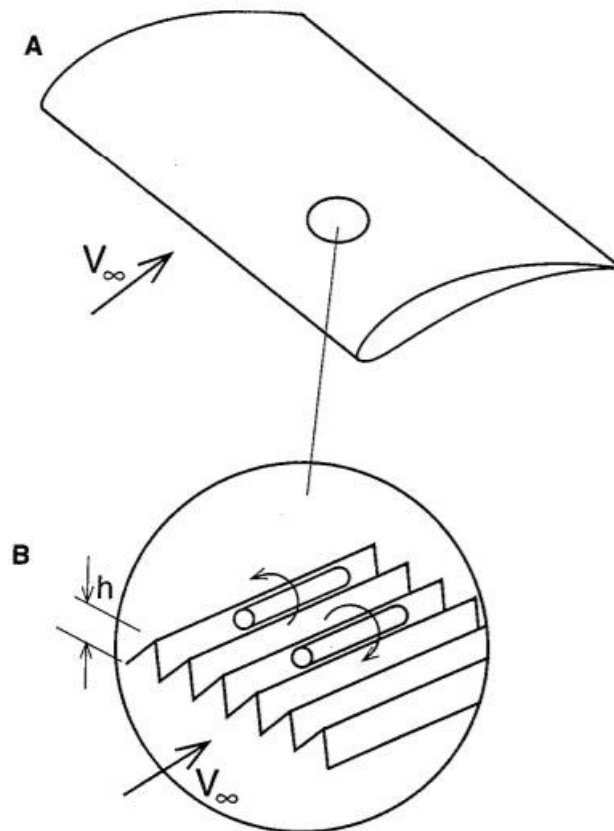


Figura 2.28: Superficie Scanalata

## 2.4.4 Gurney Flap

Un dispositivo utilizzato soprattutto nelle auto da corsa è il *Gurney Flap*: è una lastra montata con un angolo di circa  $90^\circ$  sulla coda del profilo dalla parte incava dello stesso. Riesce di fatto a far curvare maggiormente il flusso nella parte finale, permettendo uno strato limite più sottile. Si traduce quindi in maggiore Lift.

Il vantaggio principale di questa soluzione è la semplicità, poiché si cambia solo la geometria del flap invece di aggiungerne altri; per bassi valori di coefficienti di portanza però il drag aumenta e quindi il rapporto Lift/Drag diminuisce.

Un'altra soluzione è quella di usare un flap sulla coda degli *end plates*, poiché dati sperimentali indicano un aumento della deportanza. In questa maniera si riesce a dare un camber anche agli end plates, che generano depressione all'altezza dell'estradosso dell'ala, dando maggiore downforce.

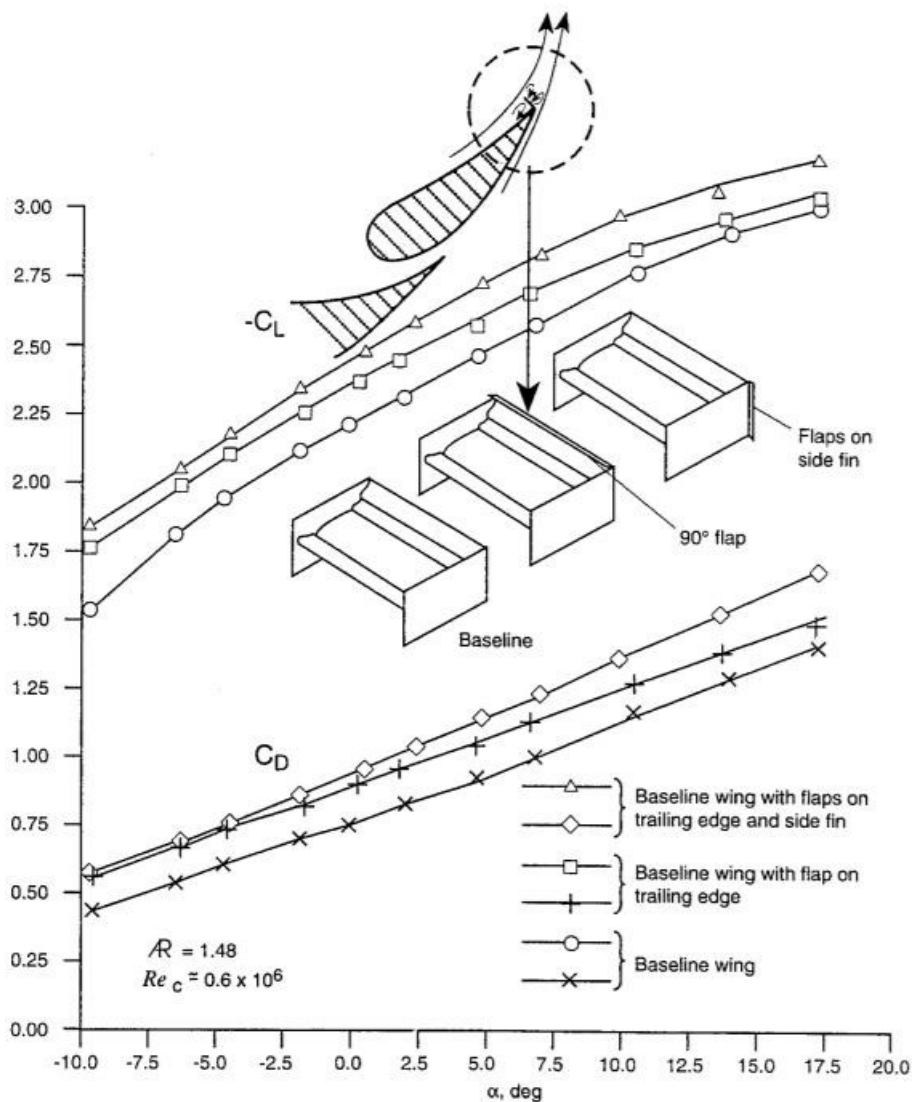


Figura 2.29: Influenza gurney flap sull'ultimo flap e sull'end plates

## 2.4.5 End Plates

Torniamo indietro e vediamo il perché si usano gli end plates sulle ali: si era arrivati alla conclusione che, a causa dei vortici d'estremità, ai lati dell'ala c'è meno portanza rispetto al centro. L'obiettivo è quello quindi di mantenere una differenza di pressione tra le due facce del profilo, mettendo una superficie piana ai lati dell'ala. Per questo tipo di dispositivo vale la regola del "più grande è e meglio è", da come si vede nella formula seguente, tale da migliorare il rapporto Lift/Drag e diminuire il Drag indotto.

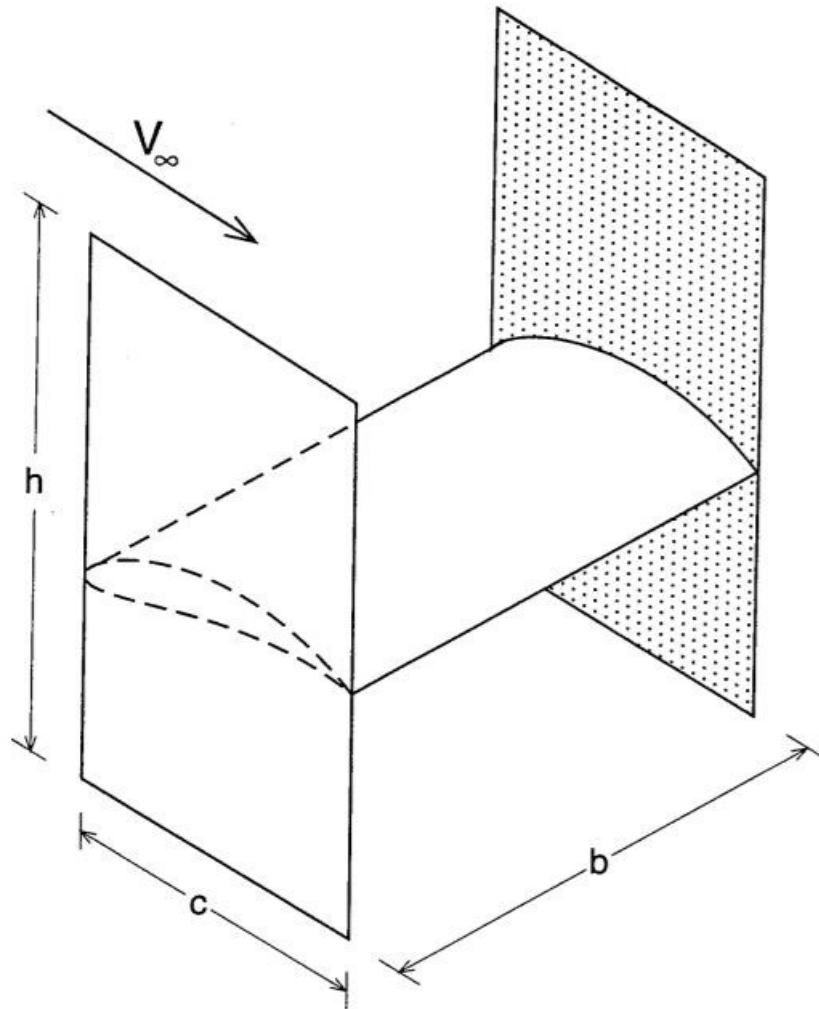


Figura 2.30: End plates

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_{actual} \left( 1 + 1.9 \frac{h}{b} \right)$$

In cui  $\mathcal{A.R.}_{actual}$  indica l'aspect ratio di un'ala rettangolare.

## 2.5 INTERAZIONI DELLA SUPERFICIE DELLA PORTANZA

Fino ad ora abbiamo visto solo ali isolate, ma nella realtà le ali sono sempre vicino ad altri oggetti. Prendiamo questo modello:

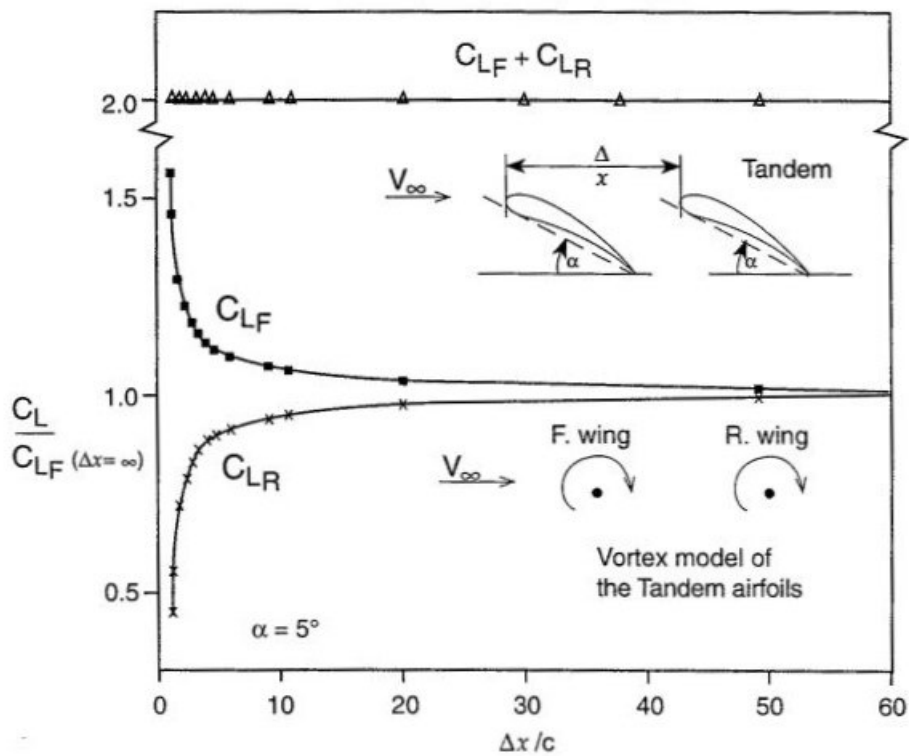


Figura 2.31: Interazione tra due profili posti sulla linea orizzontale

Posizioniamo due profili quindi posti ad una distanza  $x$  tra di loro: ogni profilo può essere visto come un vortice (come nella parte inferiore della figura). Andando a diminuire la distanza  $x$  si ha un effetto in cui la portanza dell'ala davanti viene aumentata dal vortice posteriore, mentre quella dell'ala dietro viene ridotta a causa del vortice anteriore. Nonostante l'influenza di questo effetto al variare della distanza per i singoli profili, nel globale la somma delle portanze non varia.

Nel caso in cui i profili sono posti lungo il piano verticale, l'interazione riduce la portanza di entrambi i profili, così da ridurre anche quello globale.

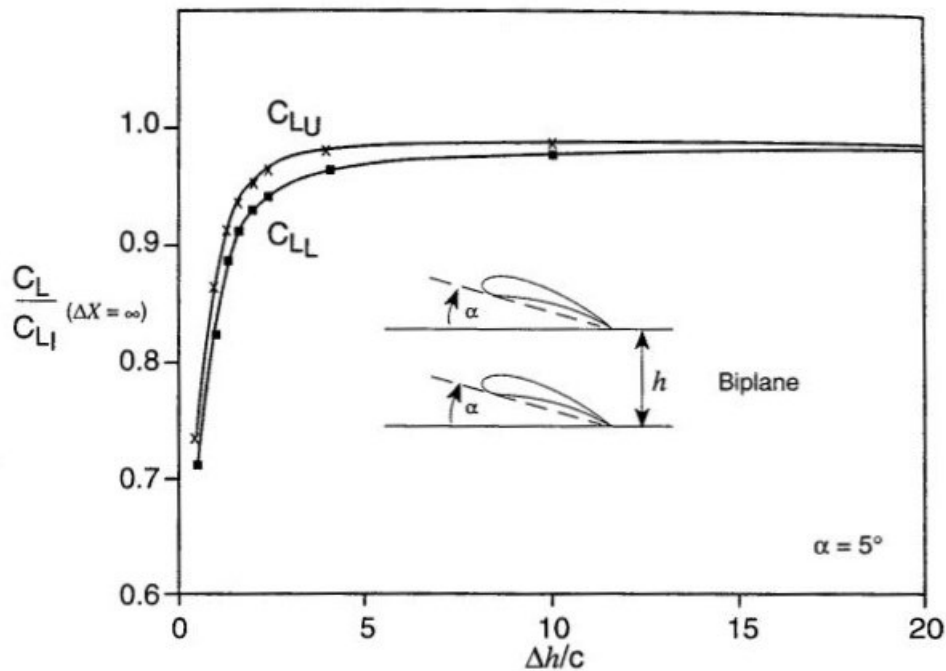


Figura 2.32: Interazione tra due profili posti sulla linea orizzontale

Nonostante ciò, questa soluzione viene usata nelle auto da corsa, soprattutto perché si riesce a sfruttare con l'ala inferiore il flusso proveniente dal fondo, mentre con quella superiore l'effetto dell'aria pulita.

Un'alternativa è quella di compensare la separazione verticale con una orizzontale, come in figura. Vale lo stesso effetto che il vortice posteriore migliora il lift dell'ala anteriore nel caso quello avanti sia posto sopra; al contrario se posto sotto l'effetto è opposto. Al contrario vale per il profilo posteriore, cioè per una distanza  $x$  positiva il lift è aumentato.

L'influenza del Lift globale non è data molto dalla distanza  $x$  a meno che non siano posti esattamente in verticale.

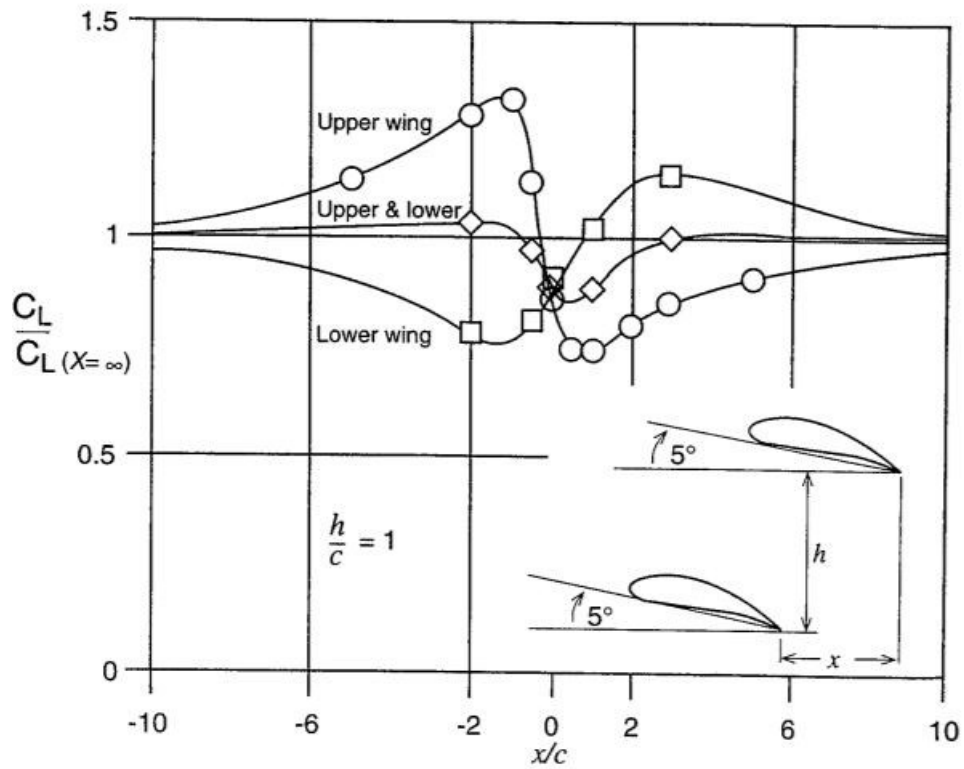


Figura 2.33: Interazione tra due profili sfasati su orizzontale e verticale

L'ultimo tipo di interazione è dato da un profilo specchiato. La linea di simmetria può essere vista come un piano; inoltre, questa interazione descrive l'effetto suolo. In questo caso si ha la situazione opposta dei profili posti uno sopra l'altro, ossia un aumento di entrambi i profili che si traduce in maggiore lift globale. L'effetto inizia a non essere trascurabile se la distanza è minore di mezza corda.



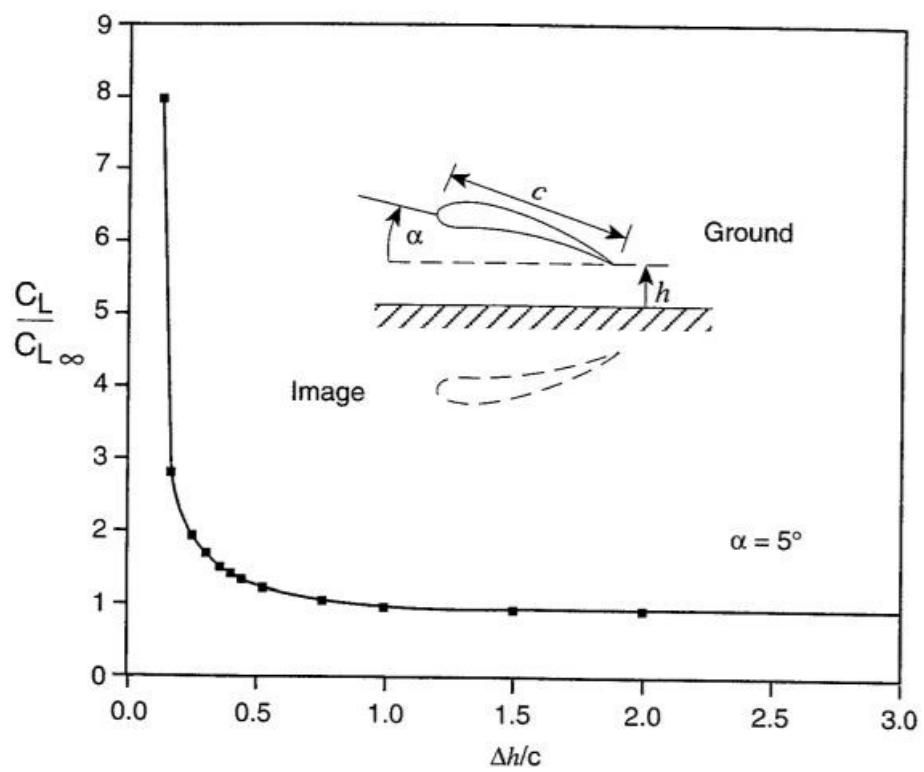


Figura 2.34: Interazione tra due profili specchiati rispetto al piano orizzontale

### 3 RICHIAMI DI CFD

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

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

Dal punto di vista fisico, le equazioni utilizzate riguardano;

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

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

#### 3.1 FONDAMENTI DI CFD

Partiamo dal considerare un fluido continuo, che sia caratterizzato da volumi elementari (infinitesimali rispetto al totale ma maggiore rispetto alla distanza tra le molecole).

In particolare, la legge di conservazione deve essere soddisfatta per ogni tipo di fluido. I procedimenti matematici possono essere di due tipi: *lagrangiani* (equazioni di una parte del volume elementare espresse in termini di proprietà del fluido in moto) o *euleriani* (equazioni riformulate in termini di proprietà distribuite). La più usata è la seconda strada.

In seguito possiamo definire la derivata di un punto: considerando la velocità  $V(x,y,z,t)$  del fluido con densità  $\rho(x,y,z,t)$ . Il vettore posizione  $R$  varia nel tempo:

$R(t) = (x(t),y(t),z(t))$ . La derivata della densità rispetto al tempo dà la velocità della variazione della densità entro l'elemento.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{dx(t)}{dt} + \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{dy(t)}{dt} + \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{dz(t)}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z},$$

Sono state identificate le componenti del vettore posizione come quelle della velocità locale  $V$ .

Il secondo membro dell'equazione indica la derivata totale della densità. Ovviamente questo ragionamento può essere esteso ad altre proprietà.

La velocità può essere scomposta in due:

- La variazione della proprietà durante il tempo;
- Movimento dell'elemento in un campo variabile della proprietà.

Un ultimo concetto importante è dato dalla differenza tra (ad esempio) massa e volume, poiché la prima si conserva mentre la seconda varia costantemente.

Prendendo un elemento di dimensioni  $dx$  e  $L$  e con flusso di velocità monodimensionale  $V = u$ , ma dipendente dalla  $x$ :  $u = u(x)$ . Dopo un intervallo  $dt$  avremo che il volume sarà aumentato della quantità  $Ldx \cdot u(x+dx) \cdot dt$  e diminuito di  $Ldx \cdot u(x) \cdot dt$ .

$$\begin{aligned} \frac{1}{\delta V} \frac{d(\delta V)}{dt} &= \frac{1}{Ldx} \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{Lu(x + dx)dt - Lu(x)dt}{dt} \\ &= \frac{(Lu(x + dx) - Lu(x))}{Ldx} = \frac{u(x + dx) - u(x)}{dx}. \end{aligned}$$

Nel caso generale di velocità nelle tre dimensioni la formula diventa la seguente.

$$\frac{1}{\delta V} \frac{d(\delta V)}{dt} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \nabla \cdot \mathbf{V}.$$

## 3.2 EQUAZIONI CHE GOVERNANO LO STUDIO CFD

Vediamo ora le relazioni che regolano il movimento del fluido:

- Conservazione della massa
- Conservazione della specie chimica
- Conservazione del momento
- Conservazione dell'energia

Così da poter scrivere l'equazione di stato, che a sua volta possono essere scritte:

- In forma integrale
- In forma conservativa
- In forma vettoriale

Vanno poi impostate le condizioni al contorno:

- Parete rigida (per fluidi viscosi e inviscidi);
- Ingresso e uscita (se il dominio è aperto);
- Altre condizioni al contorno (per esempio la periodicità).

## 3.3 EQUAZIONI DIFFERENZIALI PARZIALI

È importante dire che le equazioni utilizzate sono dette *Equazioni Differenziali Parziali* (PDE); inoltre, bisogna tenere conto delle proprietà prima di risolvere queste equazioni, poiché la loro variazione influisce profondamente sull'esito finale.

Definiamo le equazioni modello:

- Calore;
- Onde;
- Convezione;
- Laplace (versione di equazione del calore);
- Poisson (per note funzioni in coordinate spaziali);
- Burgers (per le turbolenze in un modello monodimensionale);

- Trasporto Generico.

Bisogna inoltre definire il dominio della soluzione, il bordo e le condizioni iniziali. In particolare, il *dominio*  $\Omega$  deve essere spaziale e definito per un intervallo da  $t_0$  a  $t_{\text{end}}$ , in cui  $t_{\text{end}}$  può essere finito o infinito.

Riguardo alle condizioni al contorno (o al bordo), queste vanno settate non solo per l'effetto fisico ma anche da un punto di vista matematico: questi criteri sono di *Dirichlet*, *Neumann*, *Robin* e di *Periodicità*.

Per le condizioni iniziali invece in cui vale  $t = t_0$ , sono necessarie una o due tipologie di equazioni, ovvero quando è nota la soluzione o la derivata prima.

Per lo studio delle PDE esistono tre metodi numerici, differenti tra di loro nelle caratteristiche e delle condizioni di esistenza. Infatti, tipi diversi di metodi numerici devono essere usati per differenti equazioni. Queste sono:

- *Iperboliche*;
- *Paraboliche*;
- *Ellittiche*.

Inoltre, poiché la soluzione non può essere usata, è necessario discretizzare il problema, ossia di rimpiazzare la soluzione esatta in insieme di equazioni approssimate valide in un dominio continuo applicate ad uno discretizzato. Queste discretizzazioni sono:

- Differenza finita, in cui la soluzione viene discretizzata e approssimata in punti della griglia computazionale;
- Elementi finiti, simile al metodo spettrale, ma con la decomposizione fatta per ogni elemento in cui è diviso il dominio;
- Metodo spettrale, ossia equazioni lineari indipendenti e ortogonali da cui bisogna determinare i coefficienti.

### 3.4 METODO DEL VOLUME FINITO

Lo schema di discretizzazione usato nella simulazione è quello dei *volumi finiti*. I vantaggi principali sono due, ovvero l'utilizzo di griglie non strutturate e la proprietà di conservazione globale.

Questo differisce dagli altri metodi nel modo in cui è derivato; infatti, le equazioni integrali sono applicate direttamente ad un piccolo volume di controllo. Potremmo considerarlo come una tecnica di differenza finita generale.

Il volume di controllo  $\Omega$  è diviso in piccole celle distinte, in cui viene applicata l'equazione integrale di bilancio per ognuna. Di seguito le equazioni integrali sono sostituite da equazioni algebriche di discretizzazione.

### 3.5 TURBOLENZA

Un flusso turbolento viene definito da una componente di velocità media “ $|u|$ ” e da una fluttuazione:

$$u' = u - |u|$$

Tale relazione evidenzia l'irregolarità, la dipendenza e la tridimensionalità del flusso.

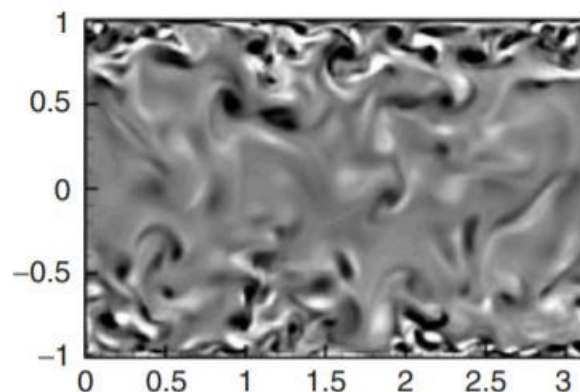


Figura 3.1: Immagine bidimensionale di moti turbolenti

Si nota che il flusso turbolento è quindi caotico; nonostante ciò, la soluzione non contiene termini probabilistici o stocastici, poiché le perturbazioni casuali sono enfatizzate esponenzialmente nel tempo. Infatti, le analisi CFD definiscono il flusso turbolento come costantemente instabile, trattando le fluttuazioni in maniera caotica.

Un flusso turbolento, quindi, tende ad occupare un intervallo ampio nel tempo di lunghezza, poiché i vortici che si formano tendono a rompersi in altri ancora più piccoli. In pratica, l'energia cinetica si trasforma sempre più da movimenti su larga scala ad altri di piccola scala, fino a trasformarsi in calore.

Vista la natura del moto, per questo flusso si ha maggiore forza nel meccanismo di miscelamento (riguardo quantità di moto ed energia interna ad esempio) in particolare per particelle con differenti proprietà.

Una delle ultime scoperte dice che la struttura del moto turbolento è composto da più strutture coerenti, cioè forme ben definite e ripetutamente generate per un lungo intervallo. Possono formarsi sia per alte velocità sia per basse, ma è importante dire che giocano un ruolo importante nel miscelamento.

Bisogna notare però che, nonostante la presenza di queste strutture, il flusso turbolento è definito sempre e comunque caotico.

### 3.6 MODELLO REYNOLDS-AVERAGED NAVIER-STOKES

Vediamo ora il modello di equazioni utilizzato nello studio: queste sono le equazioni *RANS* (*Reynolds-average Navier-Stokes*).

Nonostante sia il metodo più vecchio per l'analisi CFD, è uno dei più usati, infatti i suoi vantaggi sono dati da semplicità, basso costo, ampia gamma di codici utilizzabili ed elevata esperienza nelle varie tipologie di flusso turbolento.

Gli svantaggi invece sono associati alla scarsa descrizione della tipologia di flusso (che non permette studi più mirati), un richiesto perfezionamento di funzioni specifiche e ad un errore maggiore di modellazione.

### 3.6.1 Modello Two-Equation

In questo modello si determinano mediante due equazioni parzialmente differenziali la velocità e la scala di lunghezza della turbolenza. Il vantaggio è che non è necessario prima conoscere la *lunghezza di miscelazione di Prandtl* " $l_m$ ". Inoltre, può essere applicata ad ogni configurazione, poiché i valori di velocità e di lunghezza sono in funzione dello spazio e del tempo, basato sullo stato del flusso locale.

Tra i più noti ci sono il modello k- $\epsilon$  e il modello k- $\omega$ , che vedremo di seguito.

## 3.7 MODELLO TURBOLENZA USATO

### 3.7.1 Modello K-Epsilon

Il modello k- $\epsilon$  è contenuto nei modelli a due equazioni. In questo k indica *l'energia cinetica turbolenta* mentre  $\epsilon$  la *velocità di dissipazione viscosa*.

Questo modello si concentra sui meccanismi che influiscono sull'energia cinetica turbolenta, mentre l'ipotesi è che quest'ultima sia isotropa.

Prevede quindi due PDE risolte con le equazioni della quantità di moto e della conservazione della massa.

### 3.7.2 Modello K-Omega

Il modello di turbolenza K-Omega è un secondo modello a due equazioni. In questo si tenta di prevedere il flusso turbolento secondo due equazioni differenziali nelle due variabili: *l'energia cinetica turbolenta* (k) e la *velocità di dissipazione* ( $\omega$ ), in cui la dissipazione è da k in energia interna termica.

Il modello Standard utilizza la "eddy viscosity" ( $\nu_T$ ), ossia una soluzione che ignora il moto dei vortici su piccola scala mentre calcola quelli su larga scala con una viscosità effettiva (che sarebbe appunto il  $\nu_T$ ).



### 3.7.3 Modello SST K-Omega

Veniamo ora al modello SST k-omega: questo è la fusione tra due modelli, ossia il k-omega e il k-epsilon. È regolata quindi da due equazioni “eddy-viscosity” e il funzionamento combinato tra i due modelli è tale da:

- K-omega per simulare il sottostrato viscoso;
- K-epsilon per prevedere il comportamento del fluido lontano dal muro.

Le due equazioni regolano sempre l'energia cinetica turbolenta e il valore di dissipazione:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\nu + \sigma_k \nu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\nu + \sigma_\omega \nu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}$$

## 4 INTRODUZIONE DEI PROFILI SUI BRACCETTI

Lo studio di questo lavoro è indirizzato sulla funzione aerodinamica dei braccetti della vettura del Polimarche Racing Team.

### 4.1 STUDIO

Gli obiettivi possono essere molteplici, ma quello scelto per l'inizio di uno studio interessa soprattutto la riduzione del drag. In seguito, si sono posti i seguenti problemi:

- Che profilo utilizzare?
- Come posizionarli?
- Che forma dargli?
- Come fissarli ai braccetti?
- Di che materiale produrli?
- Che dimensioni usare?

Tutti questi aspetti concorrono alla principale: L'utilizzo di braccetti a forma di profili alari è vantaggioso per il globale?

#### 4.1.1 Profilo Utilizzato

La scelta del profilo, visto l'obiettivo della riduzione di Drag, si è concentrata particolarmente su profili biconvessi simmetrici, poiché, visti anche gli ingombri dei triangoli e delle geometrie della dinamica, si era costretti a usare un profilo particolarmente spesso.

Inoltre, non essendo stato fatto uno studio dettagliato sul tipo di flusso presente in quella zona (intuitivamente molto disordinato), sarebbe stato rischioso scegliere direttamente un profilo mirato per uno studio iniziale.

Si è quindi pensato a una lista di NACA simmetrici (0012, 0020, ecc.) però considerando il diametro del braccetto di 18 mm, si sarebbe arrivati ad avere una lunghezza di corda pari a 150 mm (per il NACA 0012), quindi troppo lungo per gli ingombri presenti.

Si è costretti ad usare quindi un profilo più tozzo, in particolare la scelta è ricaduta in un NACA 0030, che presenta quindi il massimo di corda al 30% della lunghezza, mentre lo spessore vale il 30% della lunghezza della corda.

In pratica la lunghezza di corda finale, senza considerare le ipotesi di spessore, vale 60 mm.

#### 4.1.2 Forma, Materiale e Dimensione

Essendo uno studio iniziale, che quindi concerne solo lo studio del funzionamento aerodinamico per la progettazione, non sono state variate le dimensioni dei braccetti già presenti; perciò, si è pensato all'utilizzo di una cover, che quindi ricoprisse il braccetto.

La scelta finale, considerando la semplicità, la difficoltà, il costo, la funzionalità e il tempo necessario per la produzione è ricaduta sulla produzione mediante stampante 3D, in particolare prodotti in *petg*. Ciò ovviamente implicherà l'utilizzo di resine per dare al pezzo una superficie esterna più liscia, dopo essere stato carteggiato.

Visto il materiale scelto, lo spessore ovviamente ne risente negativamente rispetto al carbonio (ad esempio). Si è pensato inizialmente a uno spessore di almeno 4 mm, che poi è stato ridotto a 2,5 mm per il disegno finale. Le conseguenze di questo spessore sono state una lunghezza di 87 mm inizialmente, ridotta poi a 77 mm.

Riguardo al montaggio del profilo, l'idea iniziale era quella di infilarli, infatti il primo CAD è stato fatto con una cavità interna che non tiene conto della geometria del braccetto (solo della dimensione, per appunto poter far entrare un cilindro con diametro 18 mm). Quest'idea è diventata poi di un accoppiamento "perfetto" con il braccetto; infatti, la forma della cavità interna è diventata di forma cilindrica, con il diametro del braccetto.

A seguire è stata abbandonata anche l'idea di fare per ogni profilo un pezzo unico ma caratterizzarlo in due semi-gusci, così da poter essere rimuovibile senza dover scollegare

il braccetto dal telaio, oltre che per poterlo carteggiare internamente e per facilitare il montaggio appunto.

Riguardo alla zona in prossimità della ruota, dove i braccetti sono più vicini, si è utilizzato una parte per raccordare le due zone: qui l'influenza aerodinamica della forma non è stata considerata, poiché è una zona estremamente disturbata vista la presenza della ruota. È stata scelta quindi una sezione rettangolare raccordata sia davanti che dietro, così da facilitare la progettazione per una zona geometricamente parlando molto complessa.

Considerando il costo, di materiale siamo circa sui 3€ per ogni fase di stampaggio. Essendone state fatte 6 siamo circa sui 18€ (esclusa la manodopera), a valore della scelta del materiale usato.

### 4.1.3 Fissaggio

Riguardo al fissaggio, in fase di progettazione si è tenuto conto di vari aspetti, come accoppiamenti con tasselli, ad esempio, tra il semi-guscio superiore e inferiore, ma anche tra il profilo e il raccordo tra i due braccetti, per evitare il moto e la rotazione relativa tra parte superiore e inferiore, o tra pezzi differenti.

Vista la complessità geometrica però alla fine è stato pensato di semplificarlo, poiché, essendo la scelta ricaduta sui semi-gusci, si sarebbe dovuto usare qualche accorgimento come colla o scotch (che a sua volta avrebbe evitato il movimento relativo).

L'unico aspetto carente per l'assenza di questi denti è dato dalla precisione dell'accoppiamento, vale a dire di una posizione diversa da quella progettata tra i due semi-gusci. Allo stesso tempo, essendo stata adottata una filosofia di accoppiamento "perfetto" in fase di progettazione, il moto di scorrimento lungo l'asse del braccetto è stato negato. Infatti, il raccordo non può muoversi a causa delle cavità semicilindriche non parallele. Di conseguenza incollando il raccordo con il profilo anche quest'ultimo non si sarebbe mosso.

Anche nel verso di movimento opposto, oltre sempre alla forma e alla battuta del raccordo, è stata pensata anche una battuta nella zona finale del braccetto verso il telaio, così da migliorare la precisione del montaggio (oltre che un vincolo maggiore per il moto,

appunto). In questa battuta si è tenuto conto del dado presente in mezzo, tra uniball e inserto del braccetto, così per permettere lo smontaggio dello stesso.

L'ultima parte del profilo, presente solo nel disegno finale, comprende dei "sacchetti" usati per unire la fine del profilo con il telaio, dando quindi un miglioramento soprattutto estetico. Inoltre, un vantaggio nell'uso dei sacchetti comprende anche la possibilità di dare maggiore ostacolo al movimento, come alla separazione dei due semi-gusci. Questi pezzi sono stati prodotti invece in *tpu*, per facilitarne il montaggio, risultando particolarmente elastici.

Nel pezzo di raccordo si è pensato di usare una maggiore accortezza nel fissaggio; infatti, sono stati usati dei fori che passano in entrambi i semi-gusci, in particolare filettati e ciechi da una parte, mentre passanti e con la cava per l'alloggio della testa della vite dall'altra, così da migliorare il fissaggio.

#### 4.1.4 Posizionamento

Per iniziare lo studio, si è pensato di posizionare i braccetti paralleli al suolo, così da avere un buon compromesso tra drag ridotto e indirizzamento dei flussi; infatti, un obiettivo parallelo alla diminuzione di drag, è quello di migliorare l'indirizzamento dell'aria all'interno delle pance, potendo migliorare la prestazione sul livello motoristico.

Il vantaggio di questa tipologia di progettazione, infatti, è la possibilità di poterli orientare a piacimento; infatti,

- se si vuole diminuire il drag, o anzi aumentare la deportanza, si possono inclinare i profili del triangolo superiore (poiché è quello in cui arriva più aria) verso il basso, così da diminuire l'angolo di attacco del profilo, o anzi renderlo non nullo nel caso si voglia generare deportanza;
- Se si vuole migliorare il raffreddamento, questi vengono indirizzati il più possibile verso le pance, ovviamente costringendo nel globale ad avere maggiore portanza.

## 4.2 DISEGNO CAD DEI PROFILI

### 4.2.1 CAD per la Simulazione

Partiti dal disegno 3D usato per le simulazioni su *STAR CCM+* (che rappresenta un modello semplificato dell'auto, vista in sezione, Figura 4.33) ho provveduto alla realizzazione in primis dei profili: ho quindi importato i punti da usare per ottenere la curva che descrive correttamente il profilo.

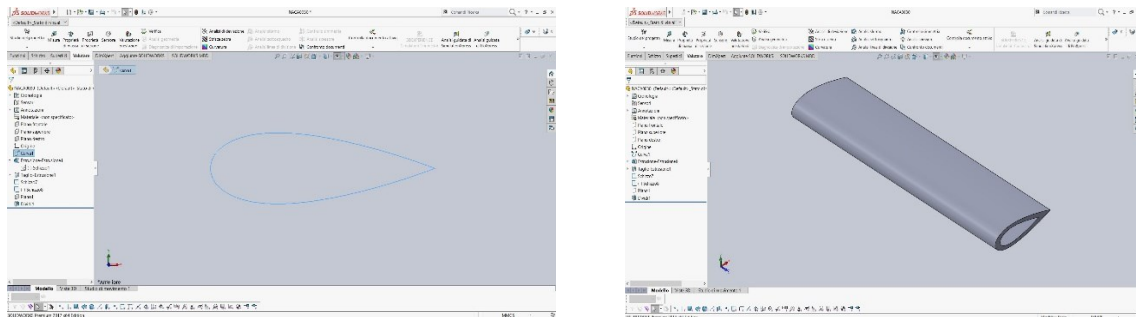


Figure 4.1 e 4.2: Curva profilo e Profilo alare estruso

Dopo averlo importato e scalato nella giusta dimensione (rapporto di 0,87 quindi), l'ho estruso di una dimensione tale da intersecare il monoscocca dell'auto.

In seguito ho disegnato la parte che unisce i due profili, eseguendo due curve di loft per la parte esterna e per il raccordo.

Successivamente ho creato il solido con le due superfici, per poi tagliarlo con altre due superfici realizzate mediante loft.

Poiché la disposizione dei braccetti è differente tra triangolo superiore ed inferiore, le due parti sono visibilmente diverse.

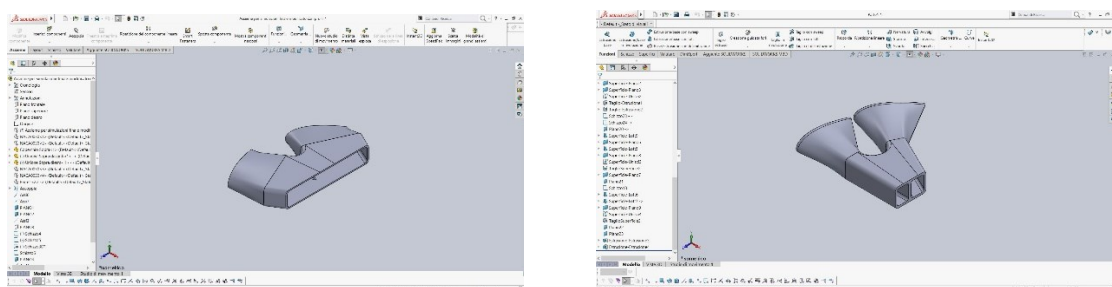


Figure 4.3 e 4.4: Raccordo del triangolo superiore e del triangolo inferiore

Andando quindi ad accoppiare il tutto, è venuto l'intero assieme dei braccetti,

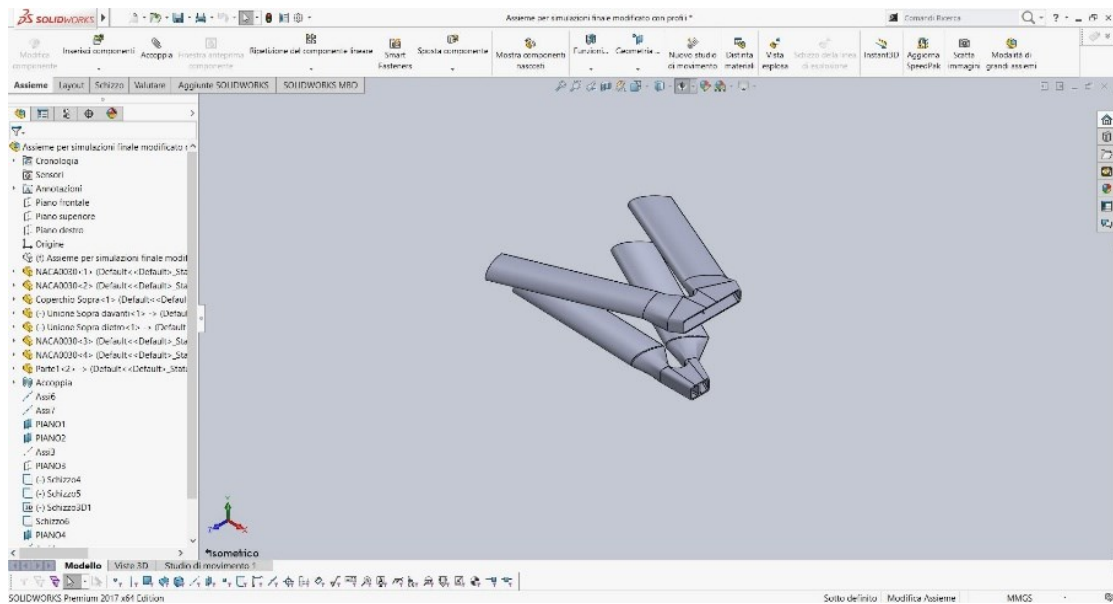


Figura 4.5: Assieme braccetti

che è stato poi inserito nel CAD semplificato dell'auto, pronto per fare la simulazione.

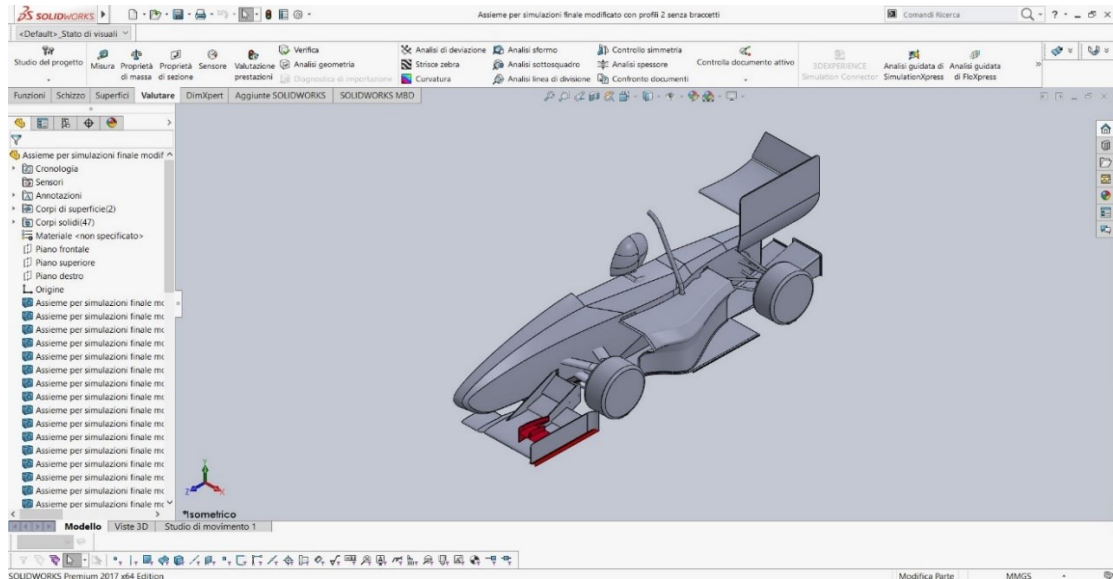


Figura 4.6: Disegno dell'auto completa provvista di profili sui braccetti

Prima di utilizzarlo nel software di simulazione, ho salvato l'assieme come file part, per poi esportarlo con formato .x\_t.

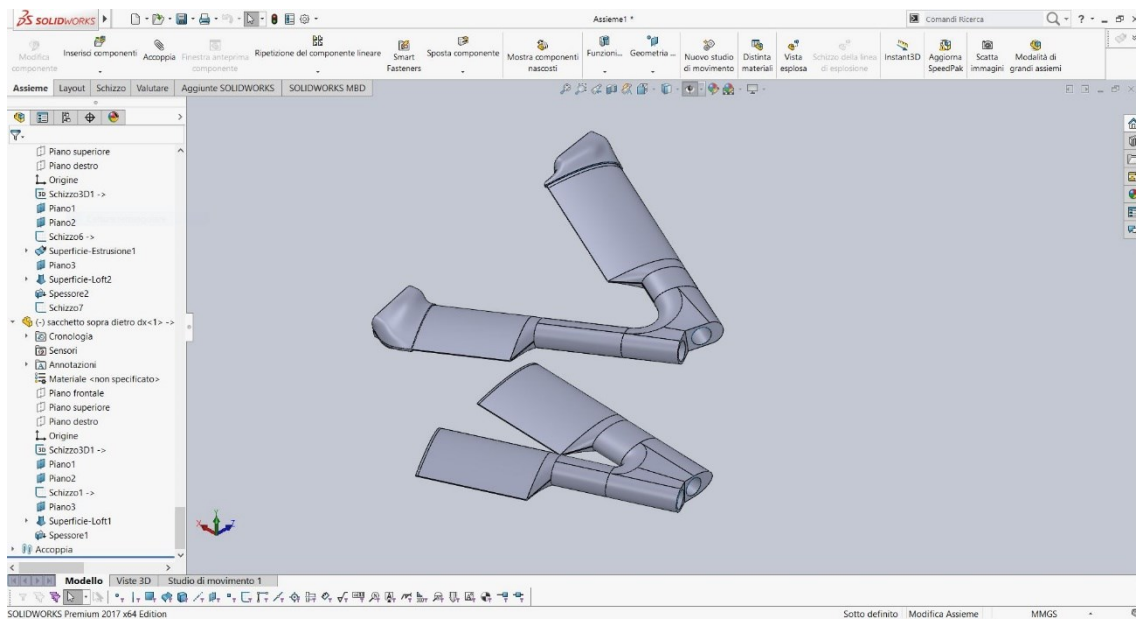
## 4.2.2 CAD Reale

In questo modellamento non è stato tenuto conto di nessun calcolo tensionale, poiché rappresenta una sola copertura del braccetto.

È stato poi migliorato, più in particolare adattato all'auto reale, poiché questo disegno non tiene conto di:

- Angolo di sterzata delle ruote;
- Presenza del push rod;
- Contatto del raccordo con il cerchio;
- Presenza dei sacchetti in gomma.

Nonostante ciò, per capire il funzionamento della soluzione è sufficiente trascurare tali ipotesi.



*Figura 4.7: Assieme reale per la produzione*





Figure 4.8 e 4.9: Profili montati sull'auto (visti dall'alto e da davanti)

## 4.3 SIMULAZIONE

### 4.3.1 Impostazione Simulazione con i Profili

Una volta esportato su STAR CCM+ come modello CAD 3D (con impostazione “*very fine*”, per migliorare la qualità della simulazione), si è provveduto al disegno del dominio, secondo le dimensioni ottimali fornite da SIEMENS.

## Setup- Open Road tunnel

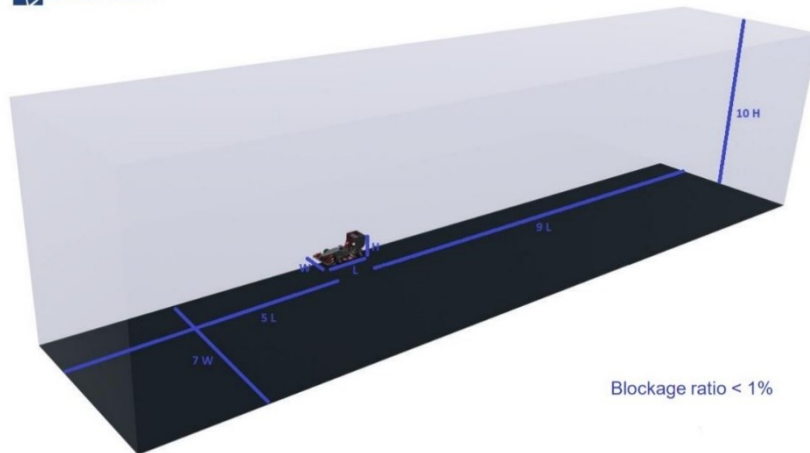


Figura 4.10: Best practise per le dimensioni del dominio

Le dimensioni sono dunque venute:

- Altezza: 11 m
- Lunghezza: 45,480 m
- Larghezza: 4,745 m

Una volta estruso anche il dominio, è stata fatta la sottrazione booleana, ottenendo quindi il dominio con l'auto importata.

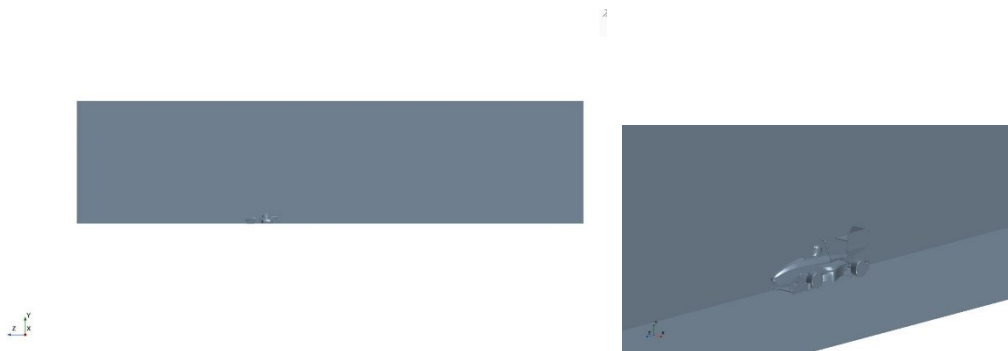


Figure 4.11 e 4.12: Dominio della simulazione

Una volta realizzata la parte, ogni superficie è stata splittata ed assegnata al controllo necessario:

- La faccia del blocco davanti alla vettura come *velocity inlet*;

- La faccia del blocco dietro come *pressure outlet*;
- Il piano di simmetria come *symmetry plane*;
- Il piano della strada come *ground*;
- Le facce restanti del blocco come *wall*;
- Tutte le superfici dell'ala anteriore come tale;
- Tutte le superfici dell'ala posteriore come tale;
- Tutte le superfici della macchina come tale;
- Tutte le superfici della ruota anteriore come tale;
- Tutte le superfici della ruota posteriore come tale;
- Tutte le superfici del fondo come tale.

Sono quindi assegnate le regioni, in particolare alle facce del blocco, impostando anche la velocità di 100 km/h dello scorrimento del ground.

È stato poi eseguito il comando di surface wrapper, per poter creare delle superfici senza la presenza di errori: sono stati inseriti controlli di default più permissivi, mentre per le superfici che racchiudevano l'auto, l'aerodinamica (ossia fondo, ali, braccetti) e il ground, in maniera tale da avere un buon compromesso di usabilità e correttezza delle superfici.

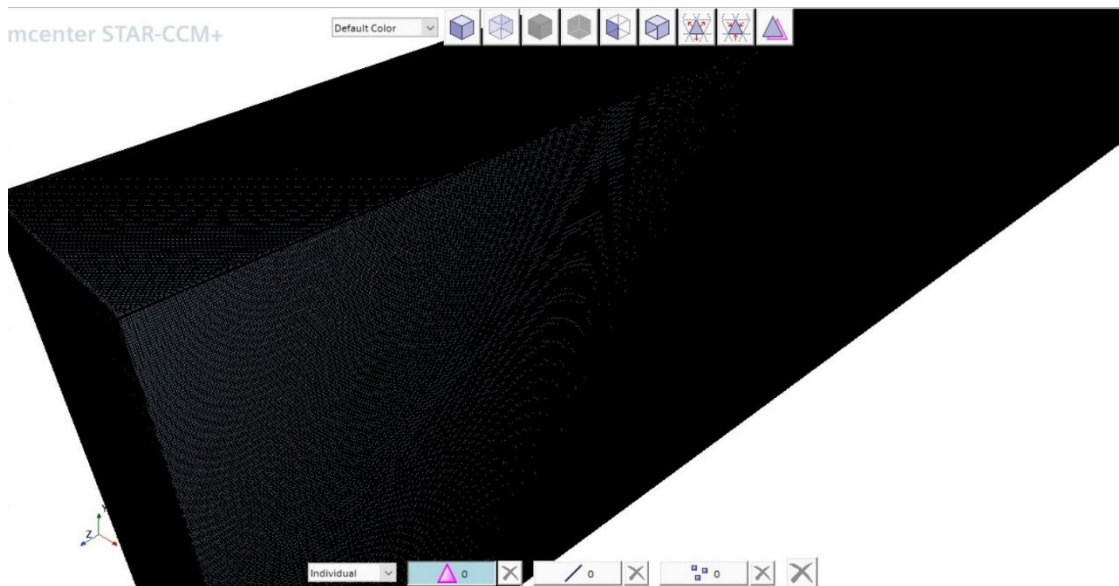
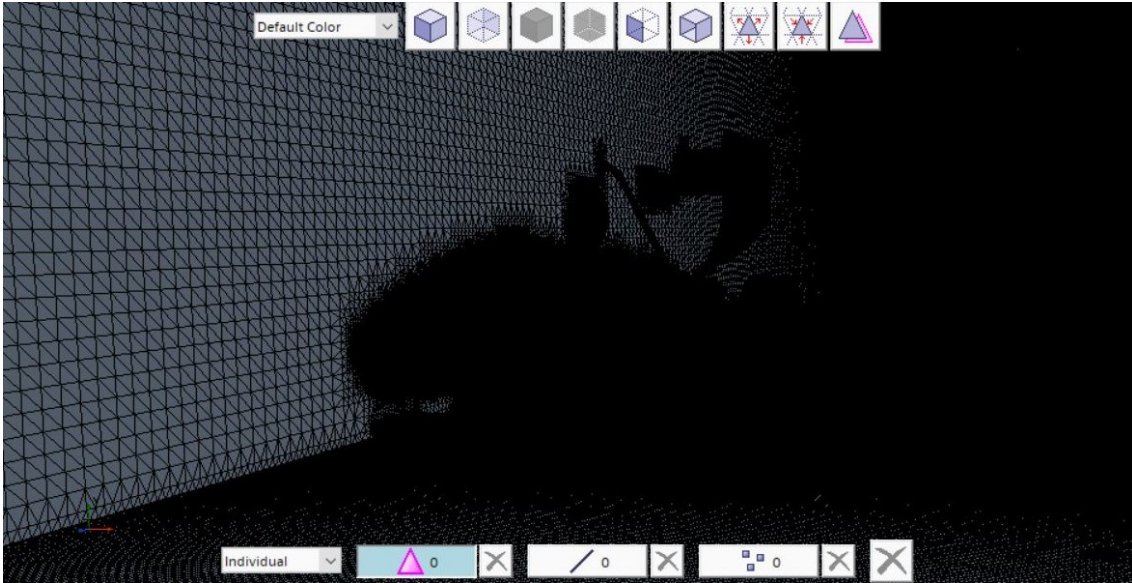
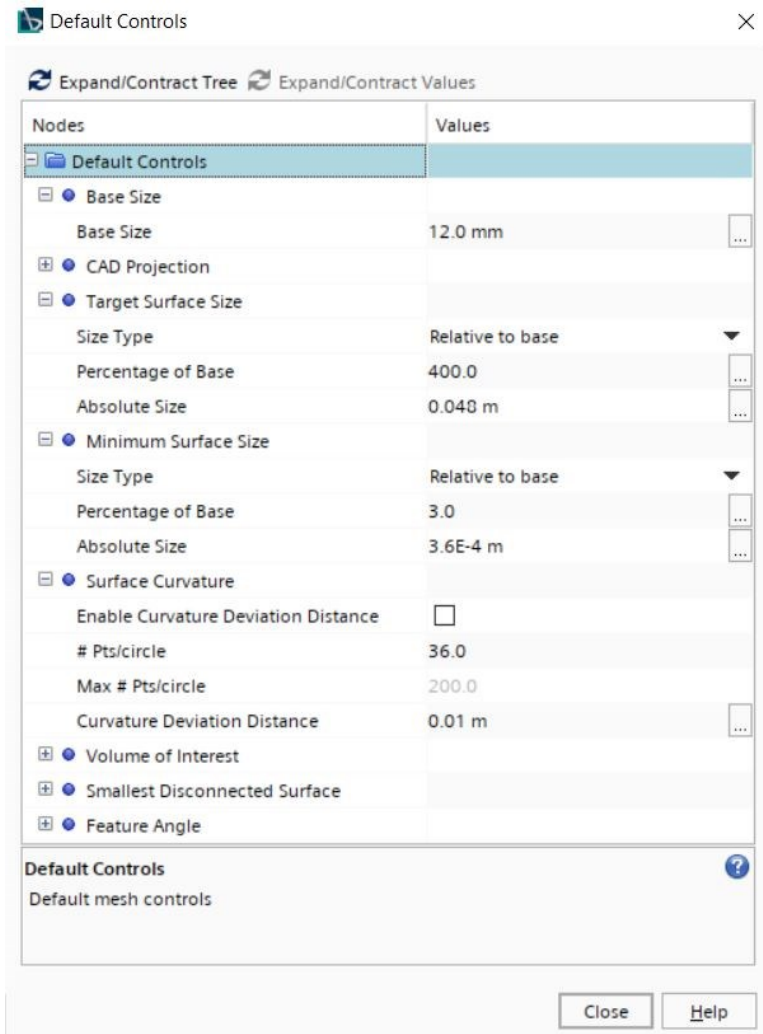


Figura 4.13: Surface Wrapper esterno



*Figura 4.14: Surface Wrapper interno*

In particolare, questi sono i valori di controllo di Default:



Mentre questi i Custom Control:

Surface Wrapper

Expand/Contract Tree Expand/Contract Values

Nodes	Values
Custom Controls	
ground	
Part Surfaces	[Body 64.ground]
Apply Only to Contacting Area	<input type="checkbox"/>
Tags	[]
Enable Control	<input checked="" type="checkbox"/>
Controls Display Mode	All
Controls	
Values	
Target Surface Size	
Size Type	Relative to base
Percentage of Base	100.0
Absolute Size	0.012 m
Minimum Surface Size	
Size Type	Relative to base
Percentage of Base	3.0
Absolute Size	3.6E-4 m
macchina	
Part Surfaces	[Body 64.macchina, Body 64.ruota anteriore, Bo
Apply Only to Contacting Area	<input type="checkbox"/>
Tags	[]
Enable Control	<input checked="" type="checkbox"/>
Controls Display Mode	All
Controls	
Values	
Target Surface Size	
Size Type	Relative to base
Percentage of Base	32.0
Absolute Size	0.00304 m

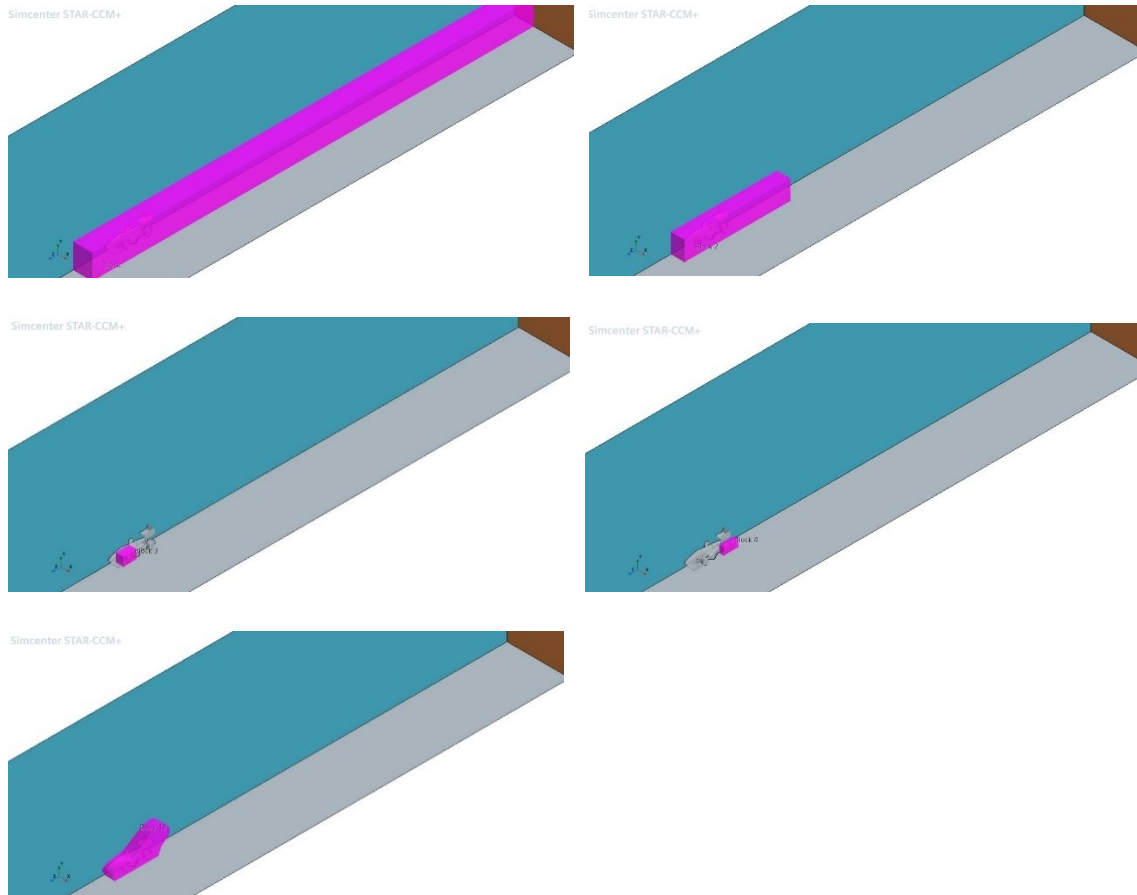
Surface Wrapper

Expand/Contract Tree Expand/Contract Values

Nodes	Values
Minimum Surface Size	
Size Type	Relative to base
Percentage of Base	10.0
Absolute Size	0.0012 m
Surface Curvature	
Enable Curvature Deviation Distance	<input type="checkbox"/>
# Pts/circle	120.0
Max # Pts/circle	200.0
Curvature Deviation Distance	0.01 m
profili alari	
Part Surfaces	[Body 64.ala anteriore, Body 64.ala posteriore, B
Apply Only to Contacting Area	<input type="checkbox"/>
Tags	[]
Enable Control	<input checked="" type="checkbox"/>
Controls Display Mode	All
Controls	
Values	
Target Surface Size	
Size Type	Relative to base
Percentage of Base	15.0
Absolute Size	0.0018 m
Minimum Surface Size	
Size Type	Relative to base
Percentage of Base	3.0
Absolute Size	3.6E-4 m
Surface Curvature	
Enable Curvature Deviation Distance	<input type="checkbox"/>
# Pts/circle	120.0
Max # Pts/circle	200.0
Curvature Deviation Distance	0.01 m



Dopodiché, prima di creare la mesh, si assegnano le regioni del surface wrapper creato per sostituire il cad. Successivamente si creano dei blocchi di controllo per andare ad affinare la dimensione delle celle nelle zone vicine all'auto, in particolare nella zona dei braccetti che deve essere la parte studiata.



*Figure da 4.15 a 4.19: Blocchi usati per volumetric control*

In ordine, i valori di controllo dei blocchi sono:

- Grande;
- Piccolo;
- Ruote (terzo e quarto blocco);
- Offset.

Quest'ultimo blocco viene fatto per affinare maggiormente la mesh in prossimità del veicolo, ancor più rispetto ai blocchi "grande" e "piccolo".

Anche ora si provvede all'assegnazione dei valori per la creazione della mesh. In questo caso sono interessate sia le superfici sia i blocchi creati precedentemente.



Automated Mesh

Expand/Contract Tree Expand/Contract Values

Nodes	Values
Automated Mesh	
Per-Part Meshing	<input type="checkbox"/>
Mesher Execution Mode	Parallel
Input Parts	[Surface Wrapper]
Tags	{}
Perform Local Surface Meshing	<input type="checkbox"/>
Preserve Surface Perimeters	None
Verbose Output	<input type="checkbox"/>
Meshers	
Default Controls	
Base Size	
Base Size	1.0 m
CAD Projection	
Target Surface Size	
Size Type	Relative to base
Percentage of Base	100.0
Absolute Size	1.0 m
Minimum Surface Size	
Size Type	Relative to base
Percentage of Base	10.0
Absolute Size	0.1 m
Surface Curvature	
Enable Curvature Deviation Distance	<input type="checkbox"/>
# Pts/circle	36.0
Max # Pts/circle	200.0
Curvature Deviation Distance	0.01 m
Surface Proximity	
Surface Growth Rate	
Surface Growth Rate	User Specified

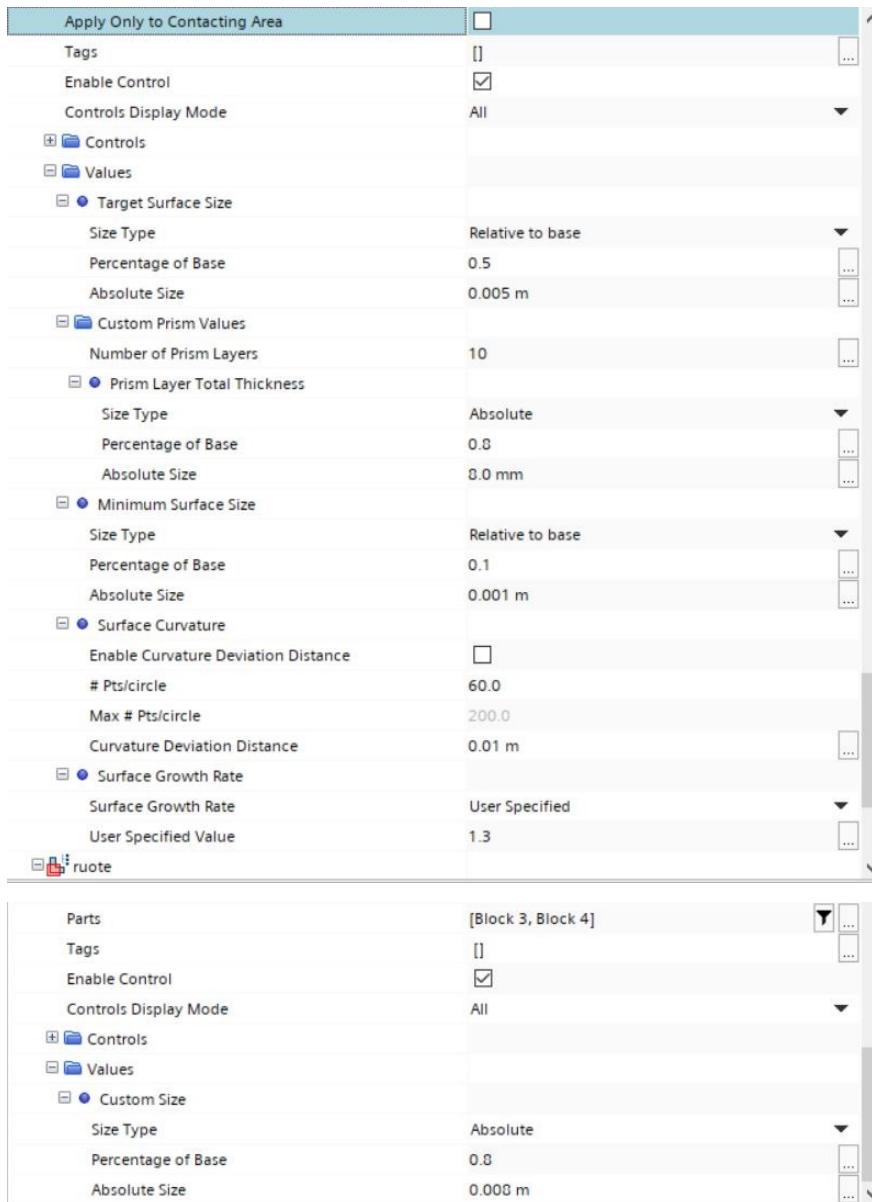
User Specified Value	1.3	...	^
⊕ Auto-Repair Minimum Proximity			
⊖ Number of Prism Layers			
Number of Prism Layers	12	...	
⊕ Prism Layer Stretching			
⊖ Prism Layer Total Thickness			
Size Type	Absolute		▼
Percentage of Base	0.8	...	
Absolute Size	0.008 m	...	
⊕ Maximum Core/Prism Transition Ratio			
⊖ Volume Growth Rate			
Default Growth Rate	Slow		▼
Surface Growth Rate	Disable		▼
⊕ Maximum Cell Size			
⊕ Post Mesh Optimization			
⊖ Custom Controls			
⊖ ext			
Part Surfaces	[Surface Wrapper.Body 64.in, Surface Wrapper.B	▼	...
Apply Only to Contacting Area	<input type="checkbox"/>		
Tags	[]	...	
Enable Control	<input checked="" type="checkbox"/>		
Controls Display Mode	All		▼
⊕ Controls			
⊖ Values			
⊖ Target Surface Size			
Size Type	Absolute		▼
Percentage of Base	100.0	...	
Absolute Size	1.0 m	...	
⊖ Minimum Surface Size			▼

Size Type	Absolute	
Percentage of Base	100.0	...
Absolute Size	1.0 m	...
grande		
Parts	[Block]	▼ ...
Tags	{}	...
Enable Control	<input checked="" type="checkbox"/>	
Controls Display Mode	All	▼
Controls		
Values		
Custom Size		
Size Type	Absolute	▼
Percentage of Base	20.000000000000004	...
Absolute Size	0.20 m	...
Custom Prism Values		
Number of Prism Layers	2	...
Prism Layer Total Thickness		
Size Type	Relative to base	▼
Percentage of Base	33.33	...
Absolute Size	0.3333 m	...
ground		
Part Surfaces	[Surface Wrapper.Body 64.ground]	▼ ...
Apply Only to Contacting Area	<input type="checkbox"/>	
Tags	{}	...
Enable Control	<input checked="" type="checkbox"/>	
Controls Display Mode	All	▼
Controls		
Values		
Target Surface Size		

Size Type	Absolute	
Percentage of Base	10.5	...
Absolute Size	0.105 m	...
Custom Prism Values		
Number of Prism Layers	6	...
Prism Layer Total Thickness		
Size Type	Absolute	▼
Percentage of Base	1.6	...
Absolute Size	16.0 mm	...
Minimum Surface Size		
Size Type	Absolute	▼
Percentage of Base	3.5000000000000004	...
Absolute Size	0.035 m	...
Surface Curvature		
Enable Curvature Deviation Distance	<input type="checkbox"/>	
# Pts/circle	36.0	
Max # Pts/circle	200.0	
Curvature Deviation Distance	0.01 m	...
Surface Growth Rate		
Surface Growth Rate	User Specified	▼
User Specified Value	1.3	...
macchina		
Part Surfaces	[Surface Wrapper.Body 64.macchina, Surface Wr	▼ ...
Apply Only to Contacting Area	<input type="checkbox"/>	
Tags	{}	...
Enable Control	<input checked="" type="checkbox"/>	
Controls Display Mode	All	▼
Controls		
Values		

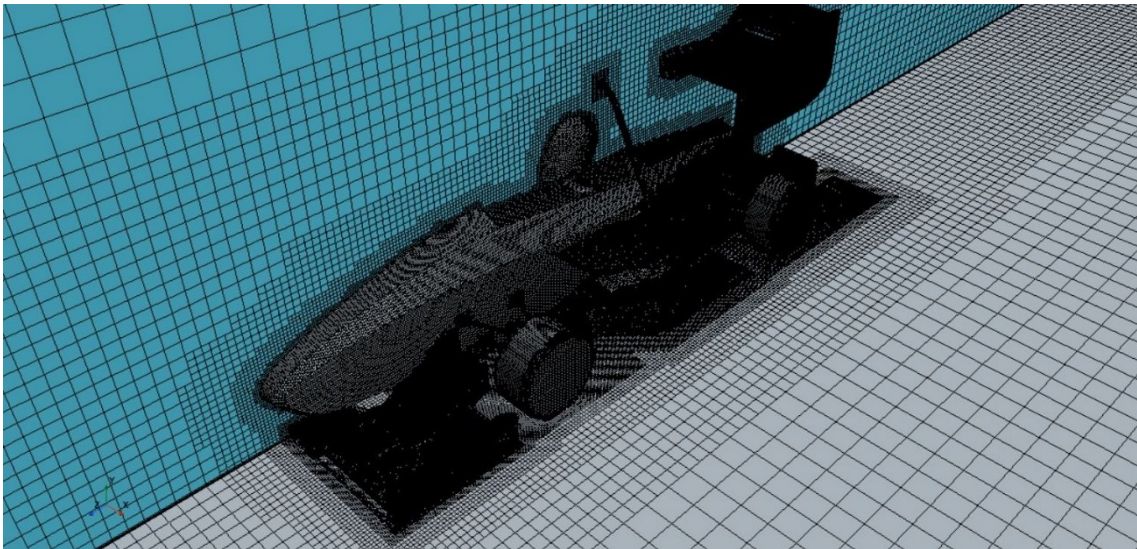
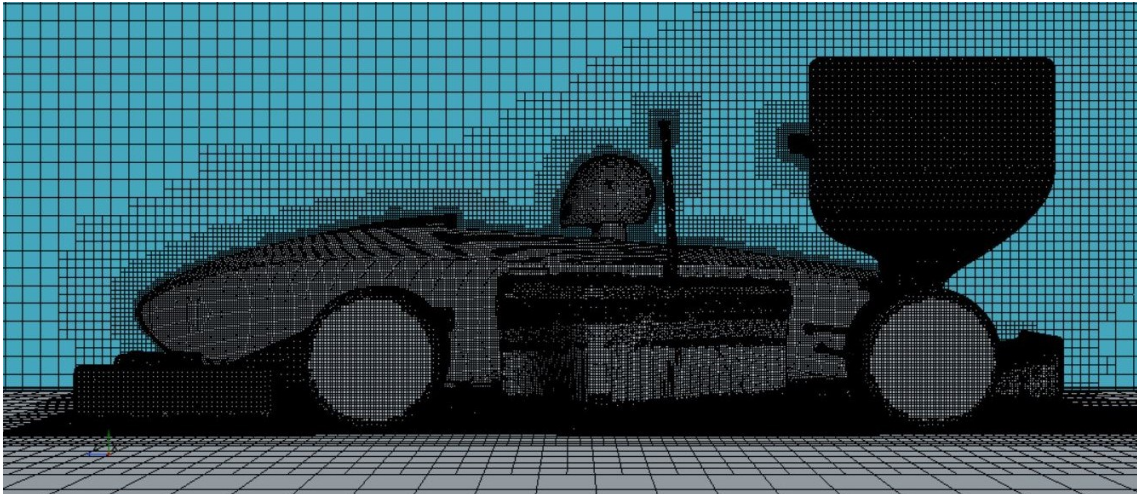
Target Surface Size		
Size Type	Relative to base	▼
Percentage of Base	0.7	...
Absolute Size	0.006999999999999999 m	...
Custom Prism Values		
Number of Prism Layers	1	...
Prism Layer Total Thickness		
Size Type	Absolute	▼
Percentage of Base	0.1	...
Absolute Size	1.0 mm	...
Minimum Surface Size		
Size Type	Relative to base	▼
Percentage of Base	0.4	...
Absolute Size	0.004 m	...
Surface Curvature		
Enable Curvature Deviation Distance	<input type="checkbox"/>	
# Pts/circle	32.0	
Max # Pts/circle	200.0	
Curvature Deviation Distance	0.01 m	...
Surface Growth Rate		
Surface Growth Rate	User Specified	▼
User Specified Value	1.3	...
offset		
Parts	[Body 42]	▼ ...
Tags	[]	...
Enable Control	<input checked="" type="checkbox"/>	
Controls Display Mode	All	▼
Controls		
Values		

Custom Size		
Size Type	Absolute	▼
Percentage of Base	3.0	...
Absolute Size	0.03 m	...
Custom Prism Values		
Number of Prism Layers	2	...
Prism Layer Total Thickness		
Size Type	Relative to base	▼
Percentage of Base	33.33	...
Absolute Size	0.3333 m	...
piccolo		
Parts	[Block 2]	▼ ...
Tags	[]	...
Enable Control	<input checked="" type="checkbox"/>	
Controls Display Mode	All	▼
Controls		
Values		
Custom Size		
Size Type	Absolute	▼
Percentage of Base	10.0	...
Absolute Size	0.1 m	...
Custom Prism Values		
Number of Prism Layers	2	...
Prism Layer Total Thickness		
Size Type	Relative to base	▼
Percentage of Base	33.33	...
Absolute Size	0.3333 m	...
profili alari		
Part Surfaces	[Surface Wrapper.Body 64.ala anteriore, Surface	▼ ...



Così da poter eseguire la mesh.





*Figure 4.20 e 4.21: Mesh della simulazione*

Una volta eseguita, si procede con l'impostazione della fisica, seguendo il best practise della SIEMENS.

## Steady Aerodynamics - Setup

SIEMENS  
Ingenuity for life

Changes marked with red

Module	Category	Settings
Geometry	Wind tunnel (Open road scenario) – half Car	[ 45 , 10.5 , 12 ] m
Continua	Models	Coupled Solver, Constant Density
	Turbulence Model	k-omega SST, a1 = 1, realizability coefficient = 1.2
	Coupled Flow: Flux	Roe FDS - no blending
	Gradients: Normalized Flat Cell Curvature Factor	1e-20 (for low y+ meshes)
Regions	Air - Inlet	$U_0=60$ km/h
Solvers	CFL	100 AMG Pre-Sweeps = 1, Post-Sweeps = 2
	Expert Initialization (=Grid Sequencing) activated	Default parameters (important) Reduce CFL if not converging
	Expert Driver	CFL Ramp Start = 0.25 (default) CFL Ramp End = 100 Target AMG Cycles = 8
Stopping Criteria	Maximum Steps	3000
Reports	Monitors	Drag, Lift, CFL, Max Velocity

Unrestricted © Siemens AG 2020

Figura 4.22: Best practise impostazioni della fisica

Si creano i report da cui i plot necessari, ossia Drag e Lift di tutte le parti (fondo, braccetti, macchina, ecc.), associando le parti, il tipo di forza e la direzione.

Si assegnano ora le parti da rappresentare nella scena scalare, ossia quella in cui andremo a definire la pressione di ogni punto del dominio e, se inserite, la velocità delle streamline.

Simcenter STAR-CCM+

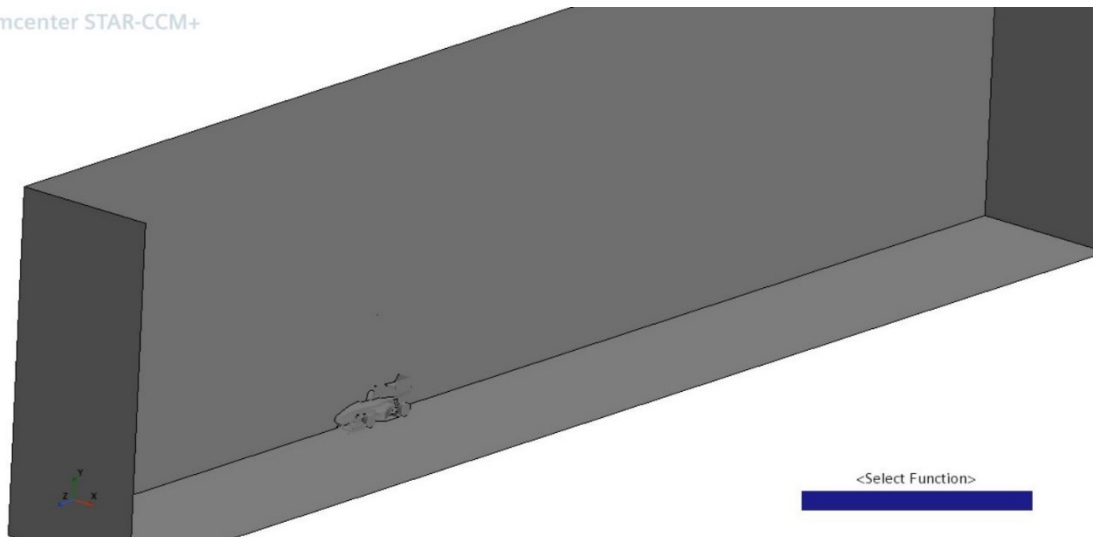


Figura 4.23: Scena scalare

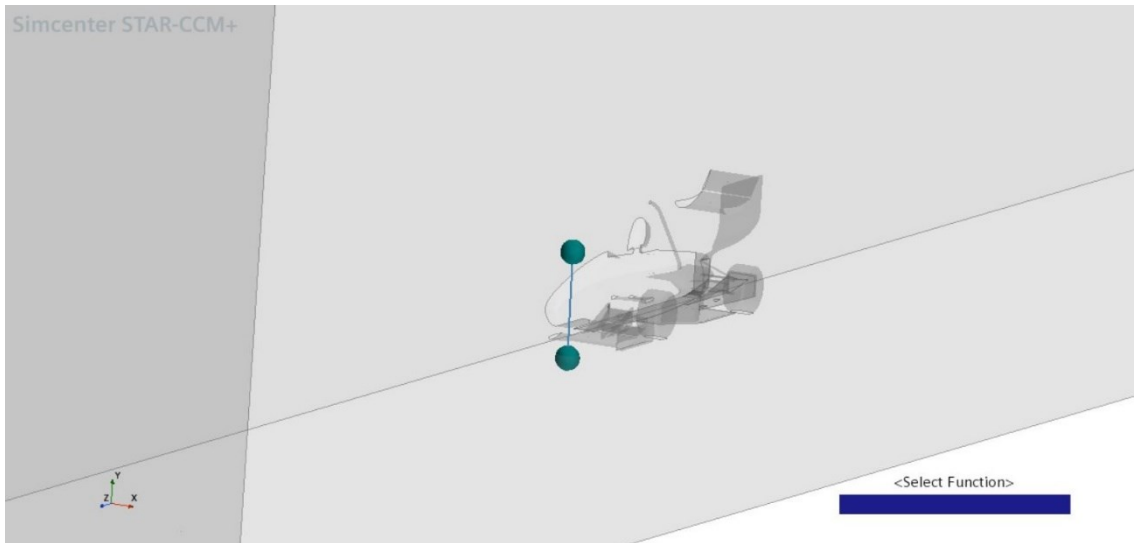


Figura 4.24: Inserimento streamline

Questa linea limitata da due sfere indica il punto di partenza delle streamline.

L'ultimo step è quella di far iterare la simulazione, infatti bisogna aspettare che i valori dei plot arrivino a convergenza, mentre i valori dei residui (che devono essere il più continui e bassi possibile) confermano la correttezza della simulazione.

Dai valori dei residui si nota un andamento un po' oscillante: non sono ottimali ma vanno comunque bene per un'analisi qualitativa.

### 4.3.2 Dati Ottenuti

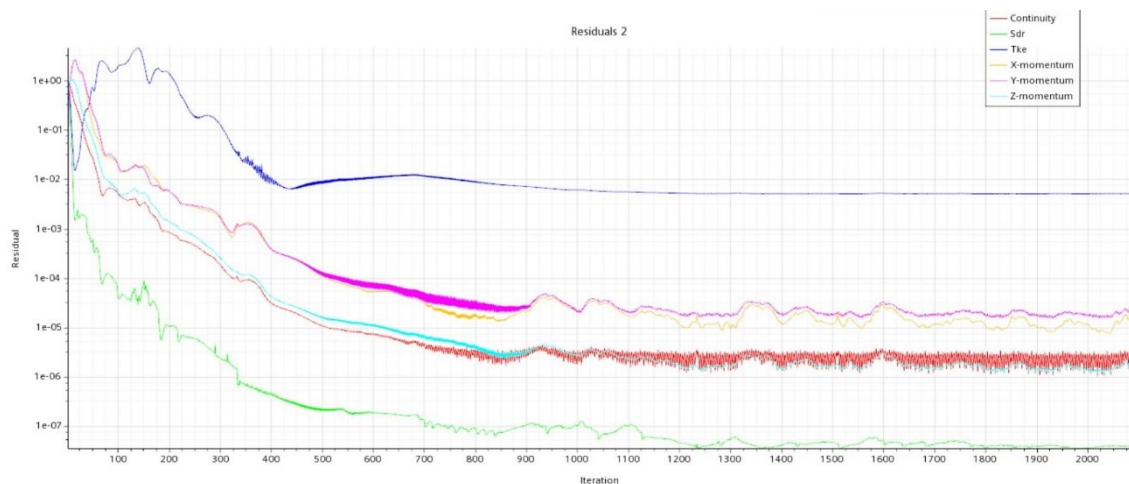


Figura 4.25: Residui della simulazione con i profili



Per prima cosa bisogna evidenziare che i valori presenti in questo primo plot non risultano essere molto buoni; infatti, ci possiamo aspettare una differenza dei valori finali di Lift e Drag.

Si può aggiungere anche che la simulazione non è arrivata fino a 3000 iterazioni, ma si può dire che è già arrivata a convergere.

Andiamo ora ad analizzare i valori dei singoli plot (ovviamente i valori effettivi devono essere raddoppiati, poiché la simulazione è stata fatta sono per metà macchina):

- Macchina: 181 N di Drag e -414 N di Lift;

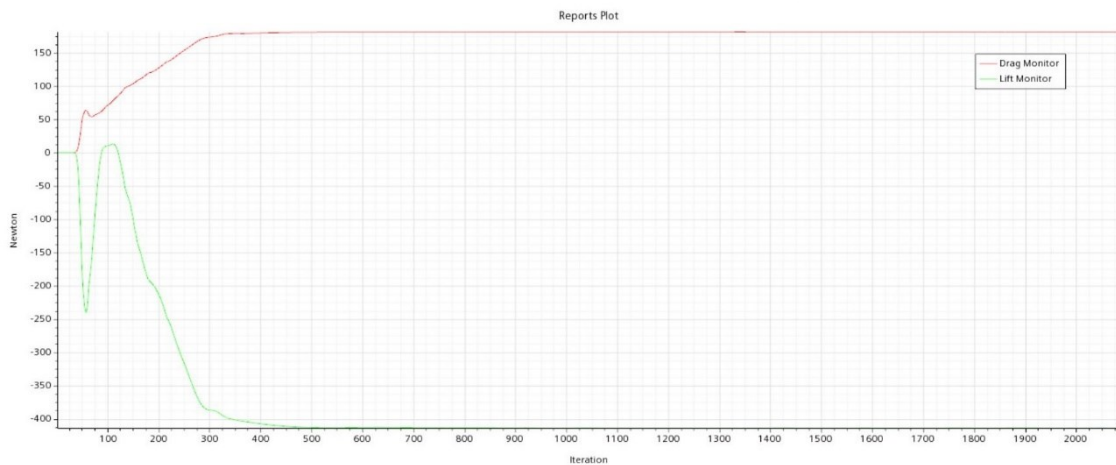


Figura 4.26: Plot di drag (rosso) e di lift (verde) di tutta la macchina

- Braccetti: 1,1 N di drag e 10,5 di Lift;

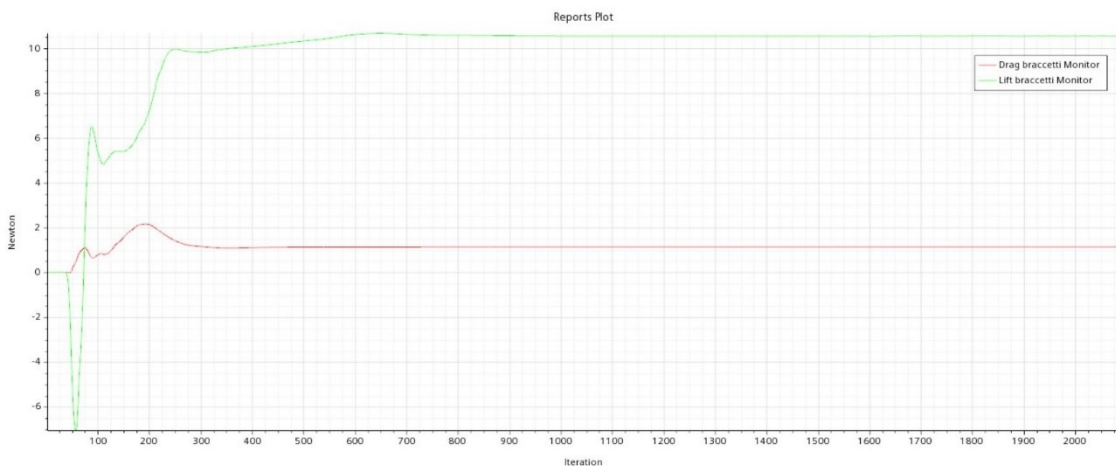


Figura 4.27: Plot di drag (rosso) e di lift (verde) dei braccetti

- Ala Anteriore: 32 N di Drag e -206 di Lift;

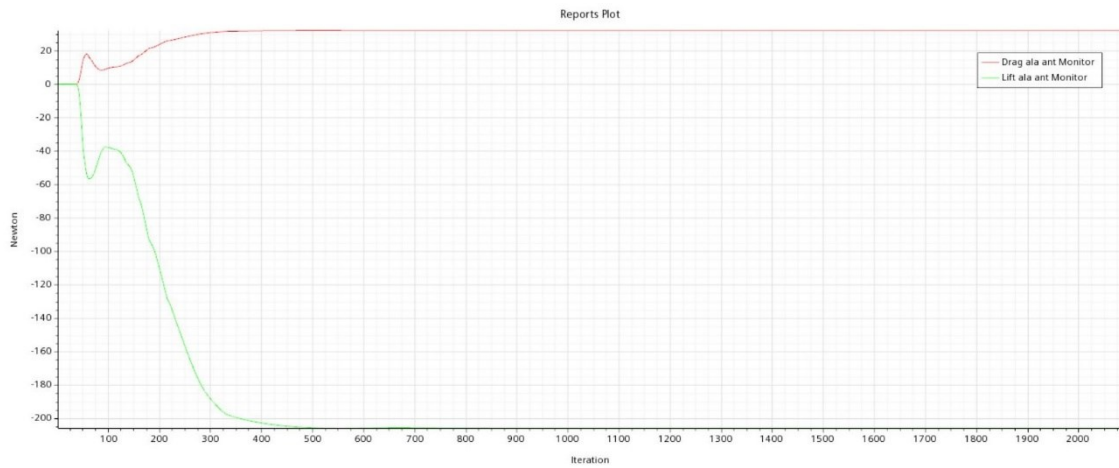


Figura 4.28: Plot di drag (rosso) e di lift (verde) dell'ala anteriore

- Ala Posteriore: 69 N di Drag e -252,5 N di Lift;

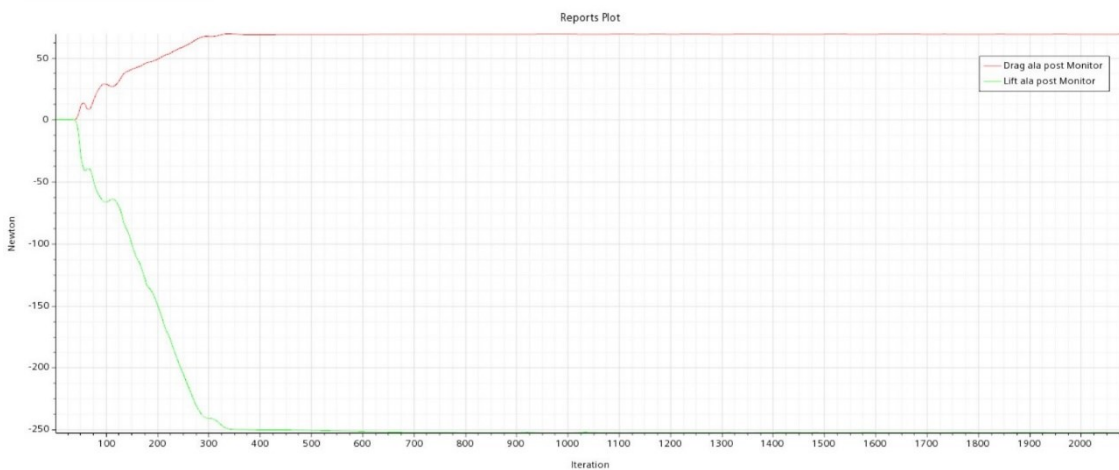


Figura 4.29: Plot di drag (rosso) e di lift (verde) dell'ala posteriore

- Fondo: 9 N di Drag e -77 N di Lift.

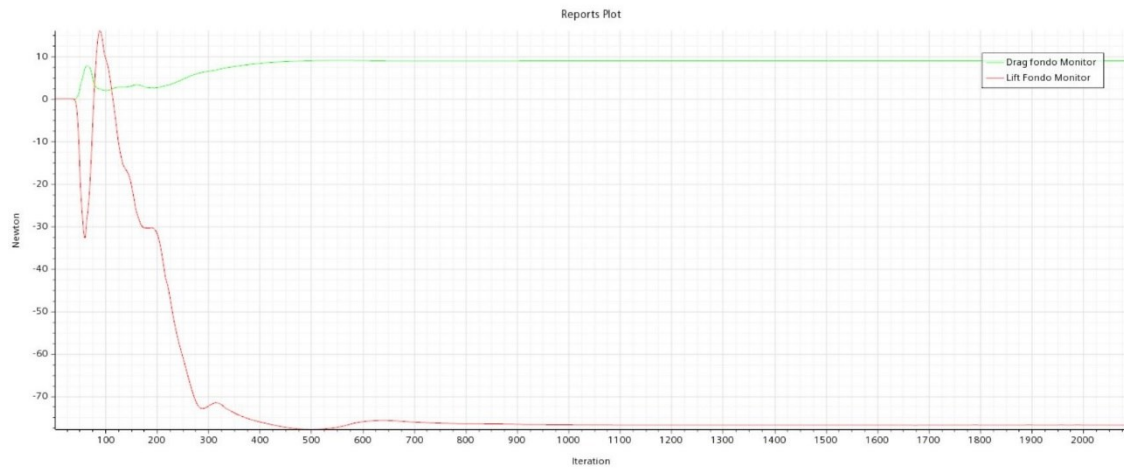
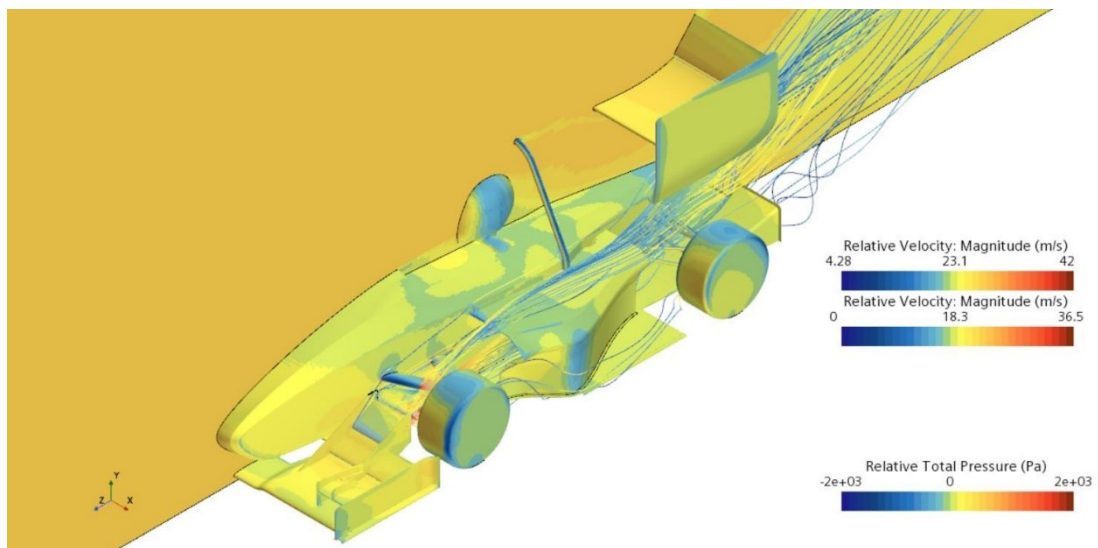


Figura 4.30: Plot di drag (verde) e di lift (rosso) del fondo

Il risultato visivo, invece, della simulazione è tale:



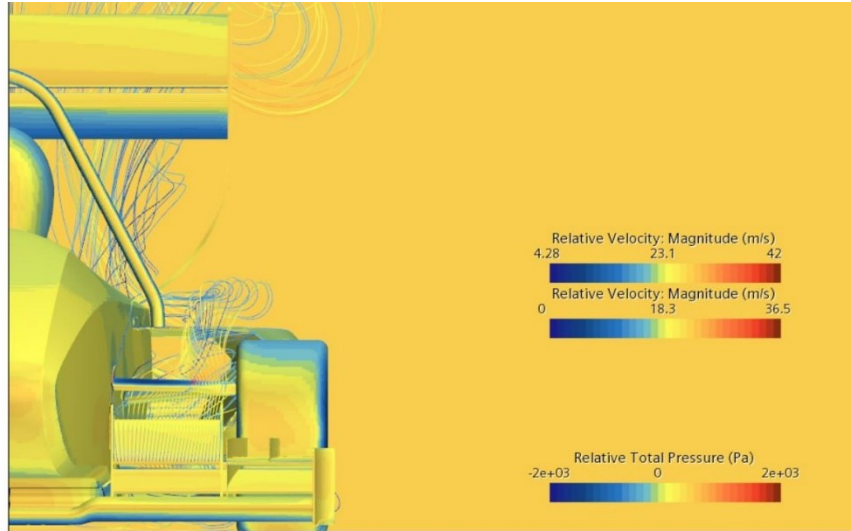


Figure 4.31 e 4.32: Scena scalare della simulazione fatta con i profili

Si può notare quello che anche i plot evidenziano, ossia un effetto portante per i braccetti (dato dall'ingombrante presenza del blu nella parte superiore). Inoltre, si può notare come molte streamline riescono a finire nella pancia.

### 4.3.3 Dati Ottenuti dalla Simulazione Senza Profili

In seguito, è stata impostata anche la simulazione per vedere l'efficacia del dispositivo, infatti il CAD presente nella simulazione è sprovvisto dei profili che coprono i braccetti.

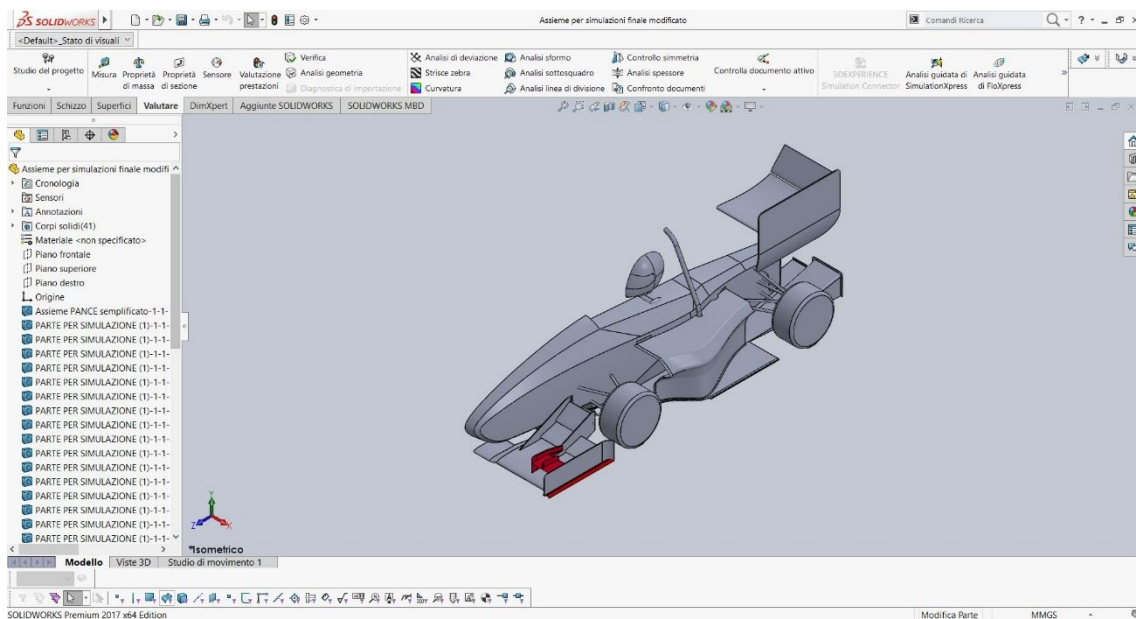


Figure 4.33: Disegno dell'auto completa senza profili

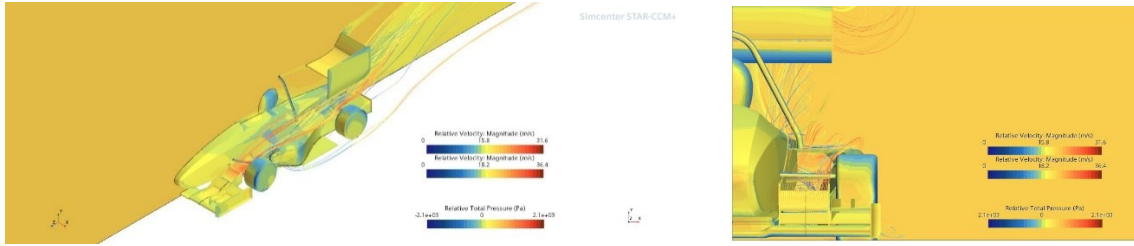


Figure 4.34 e 4.35: Scena scalare della simulazione senza i profili

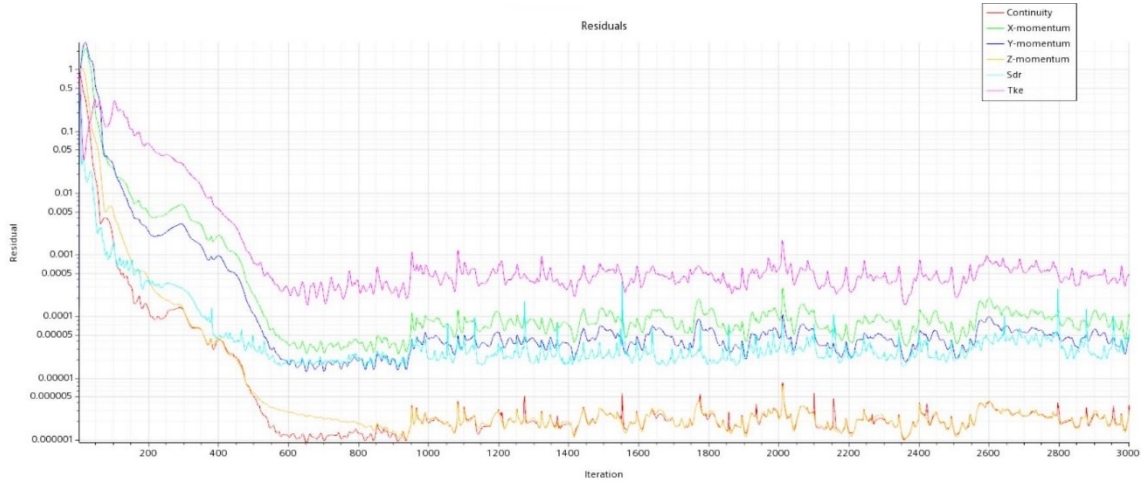


Figure 4.36: Residui della simulazione senza i profili

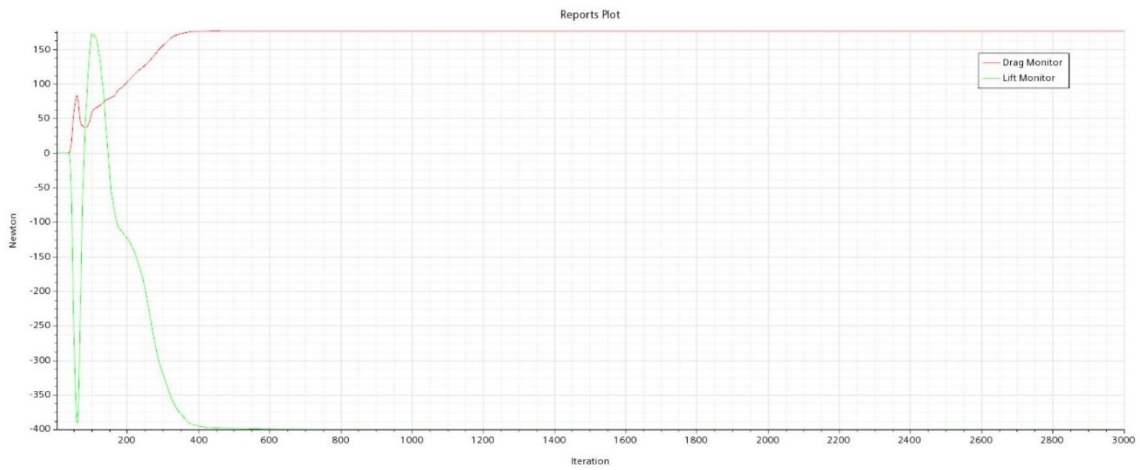


Figure 4.37: Plot di drag (rosso) e di lift (verde) di tutta la macchina



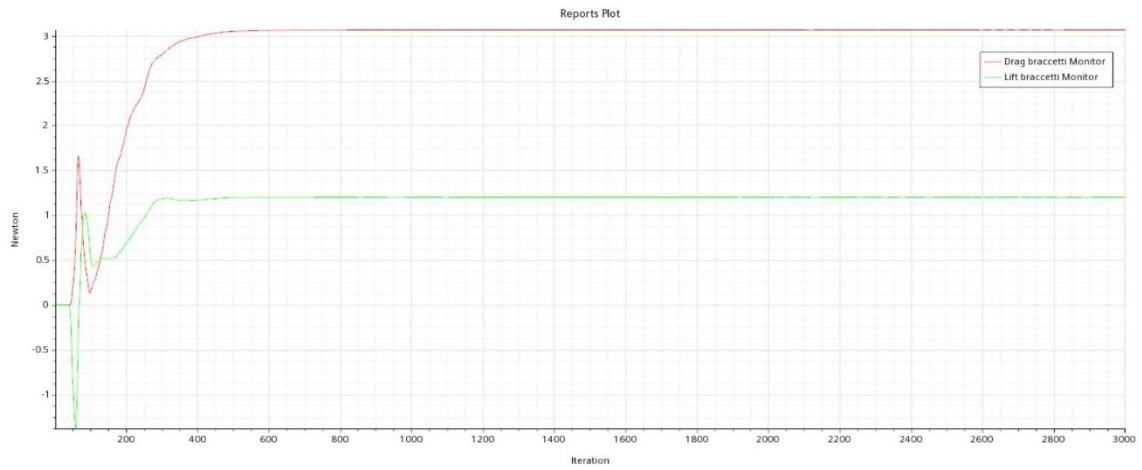


Figura 4.38: Plot i drag (rosso) e di lift (verde) dei braccetti

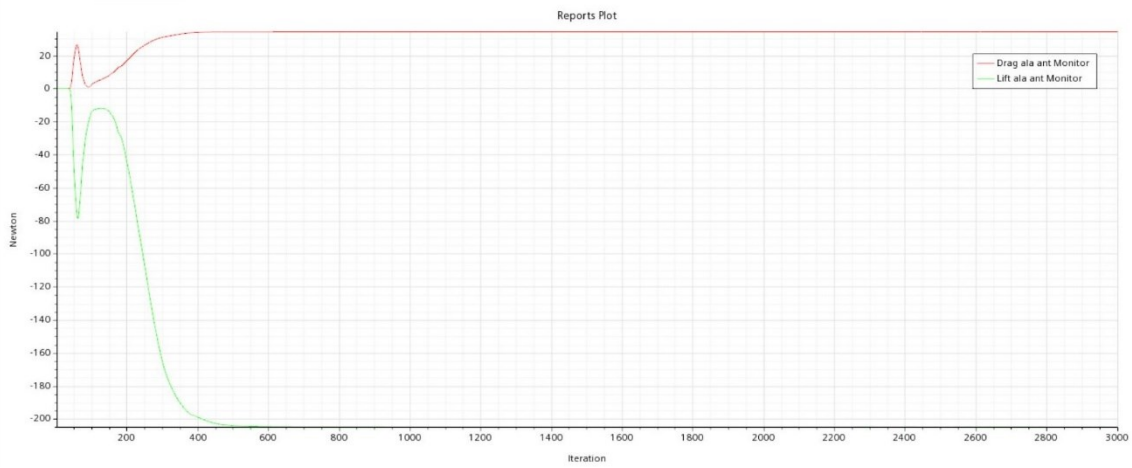


Figura 4.39: Plot di drag (rosso) e di lift (verde) dell'ala anteriore

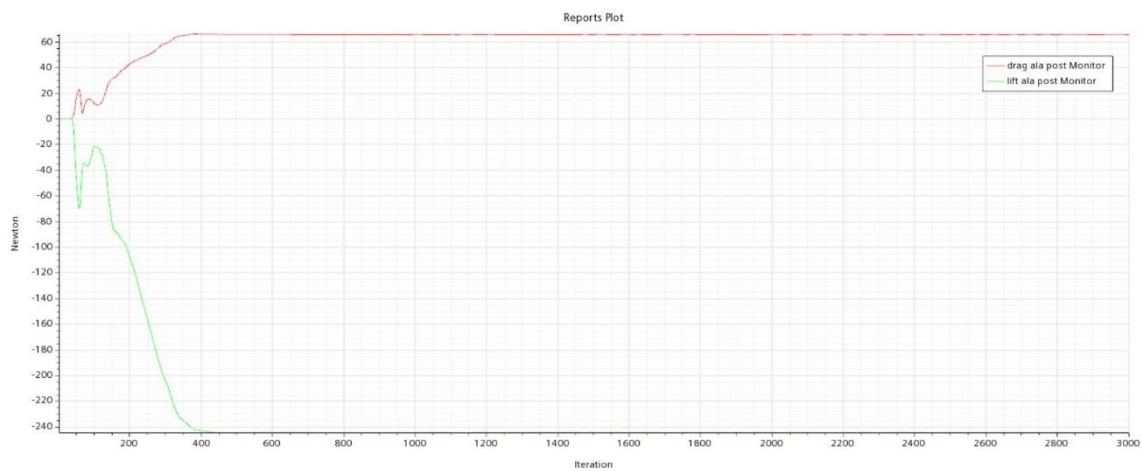


Figura 4.40: Plot di drag (rosso) e di lift (verde) dell'ala posteriore

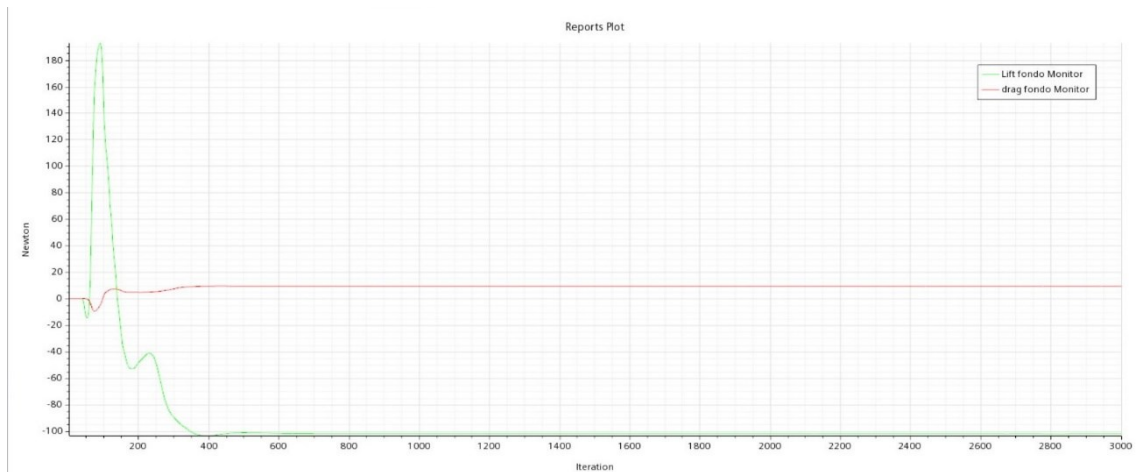


Figura 4.41: Plot di drag (rosso) e di lift (verde) del fondo

Dai plot ottenuti i valori di deportanza e di resistenza all'avanzamento sono:

	Drag [N]	Lift [N]
Macchina	176,2	-400
Braccetti	3,1	1,2
Ala anteriore	34,3	-205
Ala Posteriore	65,5	-244,8
Fondo	9,4	-102

#### 4.3.4 Confronto Dati Ottenuti

Per il confronto possiamo notare due aspetti differenti, ossia la vista della singola parte o dell'intera auto.

Nel primo caso notiamo che, andando ad inserire i braccetti, per le ali abbiamo un miglioramento del comportamento, poiché il valore di lift per entrambe è più negativo a discapito di uno maggiore di drag; nel fondo invece si ha una grande riduzione della deportanza (da 101 N a 77 N).

Parlando invece dei singoli braccetti anteriori si nota un comportamento migliore, per quelli che sono i nostri obiettivi:

- Riduzione del drag da 3 N a 1 N;
- Aumento del lift da 1 N a 10 N.

Infatti, nonostante la disposizione del profilo risulta essere molto inclinata rispetto alla direzione del flusso, si conferma una riduzione della forza di drag, seguita inevitabilmente da un aumento di portanza, vista la grande superficie di impatto.

Andando invece a osservare il plot della macchina intera, sorprendentemente si ha un aumento della deportanza seguito da un aumento del drag. I motivi per cui si ha questa diversa tendenza ancora devono essere ben osservati, poiché le cause possono essere varie.

Un motivo probabile può sicuramente essere dalla presenza di residui non ottimali nella simulazione con i profili, i cui valori non possono essere considerati perfettamente affidabili. Di conseguenza i valori non risultano essere completamente attendibili. Per risolvere si può migliorare sicuramente la qualità della mesh, nonostante sono presenti più di nove milioni di celle.

Se invece vogliamo provare a spiegare la differenza tra le due simulazioni, bisogna dire che manca un plot fondamentale, ossia quello delle forze aerodinamiche dell'auto sprovvista di parti aerodinamiche. Potrebbe essere infatti che tale differenza è spiegata dal comportamento di quest'ultima parte dell'auto.

Facendo delle considerazioni invece sull'aspetto del raffreddamento, dalle streamline che entrano nella pancia (e quindi che escono) si nota un maggiore afflusso dell'aria.



## 5 CONCLUSIONI E MIGLIORAMENTI FUTURI

Nonostante la simulazione non risulta essere del tutto affidabile, possiamo dire che l'obiettivo di ridurre il drag è centrato, poiché nella zona dei braccetti sono stati tolti 2 N. Inoltre, si riesce ad indirizzare meglio i flussi all'interno della pancia.

Al contrario, però, l'aumento di portanza è significativo, e ovviamente i pro non sono pienamente giustificabili per un suo utilizzo in tutte le prove. In particolare, per eventi come l'Acceleration e (in casi estremi) il Brake test possono essere funzionali, anche nella disposizione orizzontale. Poiché l'obiettivo di un'auto è quello di massimizzare la downforce, non si possono aggiungere quasi due chilogrammi di portanza, in particolare per affrontare eventi come l'Autocross e l'Endurance.

Se invece si considerano i valori ottenuti sul globale dell'auto (da cui derivano i valori finali di prestazione dell'auto), si ha maggiore deportanza, seguita da una maggiore drag.

Non si può quindi dire a priori che questa soluzione sia funzionale, perciò necessita di maggiore studio.

Essendo però una soluzione utilizzata da altri team si intuisce che ci sia potenzialità nel progetto, specialmente per le auto future.

Le migliorie possibili riguardano tutti i punti citati precedentemente nella fase di progettazione, ma anche nel materiale usato per produrli.

Infatti, possono essere prodotti in carbonio, realizzando uno stampo mediante stampante 3D.

Ovviamente si possono trovare profili ottimizzati per quella zona dell'auto, essendo il flusso molto disturbato, con un occhio sia al raffreddamento sia alle prestazioni aerodinamiche.

Sicuramente si può ridurre il peso, realizzando pezzi più sottili (rispetto ai due chilogrammi totali) come migliorare il fissaggio, oltre al moto relativo.

Un'idea futura che potrebbe essere sviluppata, in accordo con la dinamica, è la possibilità di inclinare i profili nelle fasi di curva e accelerazione, così da avere un miglioramento in ogni punto della pista.

## **BIBLIOGRAFIA**

Katz J. – New direction in Race Car Aerodynamics\_ Design for Speed

Oleg Zikanov – Essential Computational Fluid Dynamics

Mosca Marco - Progetto del volante e della colonna sterzo di una vettura di Formula SAE (tesi)

## **SITOGRAFIA**

Wikipedia – K-Omega Turbulence Model

Autodesk – SST K-omega Turbulence Model

Airfoil Tools – NACA 4 digit airfoil generation (NACA 0030 airfoil)

Wikipedia – Modello K-epsilon

## **SOFTWARE UTILIZZATI**

Siemens STAR CCM+ 2021.1.1

Dassault Systèmes Solidworks 2017