

UNIVERSITÀ DI GENOVA

SCUOLA POLITECNICA

DIME

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica

Gestionale e dei Trasporti



TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

**Aerodinamica del veicolo: analisi CFD di
profili alari a singolo elemento e a più flap**

Studente

Nicolò Roveri

Relatore

Chiar.mo Prof. Alessandro Bottaro

Correlatore

Dott. Damiano Natali

2024-2025

A Riccardo, Cristiano, Giacomo e Giulio
vi voglio bene

Abstract

Partendo da un'introduzione dei fondamentali della meccanica dei fluidi si passa all'applicazione dei concetti principali alle vetture e alle appendici aerodinamiche; accennando all'evoluzione storica dell'aerodinamica del veicolo.

Successivamente viene spiegata la differenza tra profili alari costituiti da un singolo elemento o da più flap, che viene poi evidenziata con uno studio CFD di due profili realizzati tramite CAD.

Segue un confronto diretto tra i risultati reso possibile dalla similitudine tra gli stessi e dalle medesime condizioni di lavoro.

Si conclude poi con il procedimento pratico tramite il quale si studia questa disciplina oggi nelle massime categorie del motorsport.

Indice

1	Evoluzione storica dell'aerodinamica del veicolo	1
1.1	Forze a cui è sottoposto un veicolo	1
1.1.1	Resistenza aerodinamica	2
1.1.2	Deportanza	2
1.2	Storia dell'Aerodinamica del veicolo	4
2	Elementi di meccanica dei fluidi	8
2.1	Proprietà dei fluidi	8
2.1.1	Densità	8
2.1.2	Comprimibilità	8
2.1.3	Viscosità	9
2.2	Strato limite	10
2.2.1	Paradosso di d'Alembert	11
2.3	Equazioni di Navier-Stokes	12
2.3.1	Equazioni di Navier-Stokes mediate con Reynolds	12
2.4	Distacco della vena fluida	13
2.5	Teoria del profilo alare 3D	14
2.5.1	Teoria della linea portante di Prandtl	15
3	Aerodinamica applicata al veicolo	17
3.1	Differenze tra uso stradale e da competizione	17
3.1.1	Vetture da competizione, scopi e design	17
3.2	Effetto Venturi	18
3.2.1	Porpoising	19
3.3	Introduzione agli elementi aerodinamici	20
3.4	Spoiler anteriore	20
3.5	Splitter	21
3.6	Minigonne	21
3.7	Diffusore	22
3.7.1	Ventilatore	23
3.8	Generatori di vortici	24
3.8.1	Scia	25
3.9	Endplates	25
3.10	Ala posteriore	26
3.10.1	Ala a singolo elemento	26
3.10.2	Ali a più flap	27
4	Analisi CFD di profili alari	28
4.1	Modelli CAD	28
4.2	Impostazioni simulazione	30
4.2.1	Dominio fluido	30
4.2.2	Parametri simulazione	30
4.2.3	Mesh	32
4.3	Analisi risultati	33

4.3.1	Ala a singolo elemento	34
4.3.2	Ala a 2 flap	36
4.3.3	Confronto	39
5	Studio pratico e ingegneria dei Materiali	41
5.1	Processo di studio ed ottimizzazione	42
	Bibliografia	44

1 Evoluzione storica dell'aerodinamica del veicolo

1.1 Forze a cui è sottoposto un veicolo

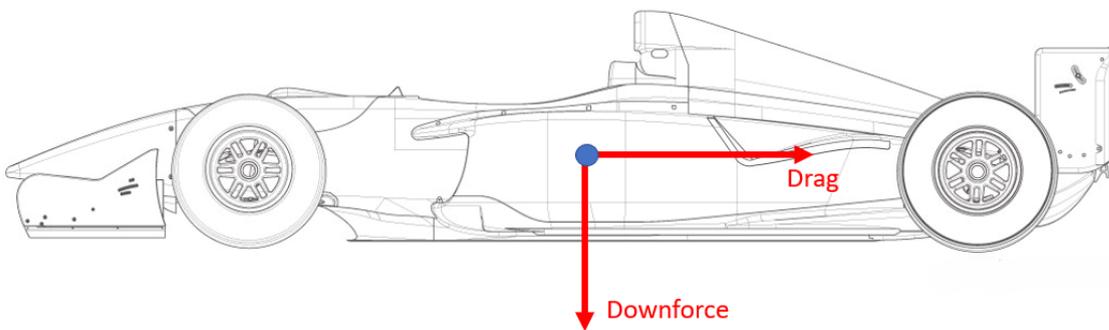
Per comprendere l'importanza dell'aerodinamica di un veicolo bisogna essere a conoscenza delle forze che agiscono sullo stesso quando è in movimento.

Infatti oltre alle forze note quali:

- La gravità,
- La spinta del motore,
- L'attrito volvente,

il moto di una vettura è influenzato anche da altre forze legate direttamente alle proprietà aerodinamiche, quali:

- La resistenza all'avanzamento (o *drag*),
- La deportanza (o *downforce*).



In particolare vedremo come, se da un lato il drag risulti sempre penalizzante per le prestazioni, dall'altro la generazione di carico aerodinamico è fondamentale quando si vuole ottimizzare il potenziale di una vettura.

Tuttavia la produzione di deportanza è quasi sempre accompagnata da un incremento della resistenza, quindi l'obiettivo principale è quello di trovare un compromesso che massimizzi l'efficienza.

1.1.1 Resistenza aerodinamica

La resistenza aerodinamica, detta anche *drag*, a velocità ridotte è piccola in modulo, ma già quando si viaggia intorno ai 60 km/h diventa la componente di maggiore importanza tra quelle che si oppongono al moto.

Proprio per questo motivo impatta direttamente sia sui consumi sia sulle prestazioni alle alte velocità.

Data quindi l'introduzione di normative sempre più stringenti sulle emissioni, i costruttori hanno avviato un processo di ottimizzazione aerodinamica, con l'obiettivo di migliorare l'efficienza complessiva senza compromettere eccessivamente le prestazioni dei motori.

La resistenza dell'aria su un veicolo è causata da diversi fattori: principalmente dalla differenza di pressione attorno ad esso nella direzione del moto, ma anche dall'attrito sulla superficie stessa e dalle perdite dovute al passaggio dell'aria tra i diversi componenti interni.

Infatti possiamo dividere il drag in tre componenti principali:

- Il drag di pressione, o di forma, legato appunto alla stessa del corpo, corrisponde a circa il 50%;
- Il drag da attrito viscoso, che è circa il 20%;
- Il drag indotto, che tratteremo approfonditamente ed è circa il 30%.

In generale si può stimare la resistenza di un veicolo come:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A v^2 \quad (1.1)$$

con C_D il coefficiente di drag adimensionale, A l'area frontale del corpo in $[m^2]$, ρ la densità dell'aria, funzione di pressione e temperatura in $[kg/m^3]$, e v il modulo della velocità risultante, ottenuta dalla somma dei vettori velocità del corpo e di eventuali variazioni esterne quali il vento, in $[m/s]$.

1.1.2 Deportanza

Per quanto riguarda il *downforce* il discorso è diverso, dato che a differenza della resistenza all'avanzamento che impatta qualsiasi veicolo, esso ha maggiore importanza principalmente per le vetture ad elevate prestazioni.

Oltre ai benefici in termini prestazionali che verranno analizzati in seguito, un ulteriore vantaggio che può portare il downforce riguarda la distribuzione dei pesi, perché in base a dove si installano le componenti che lo generano si può modificare la posizione del centro di massa della vettura, rendendo quindi questa forza importante anche dal punto di vista telaistico.

In generale è noto che le ruote di una vettura sono in grado di resistere a determinate accelerazioni laterali, che si verificano durante la percorrenza di una curva, fino ad un certo angolo oltre il quale comincia a verificarsi la condizione di slittamento, quando il carico risulta eccessivo e si vanno a perdere tenuta e direzionalità.

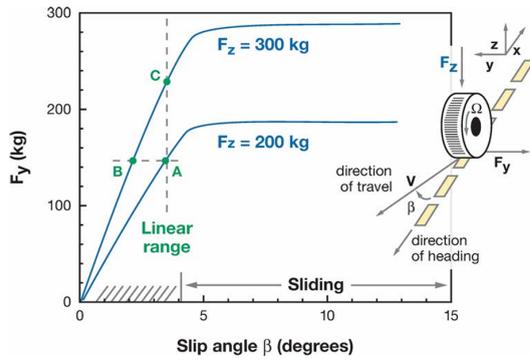


Figura 1.1: Andamento carico laterale sulle ruote, figura tratta da [1].

Prima di questo valore limite, l'andamento del carico laterale sulle ruote è lineare con l'angolo, ma poco oltre risulta costante, quando si entra nella zona di "scivolamento". Come si vede però un altro parametro dal quale dipende direttamente è il carico verticale.

Di conseguenza andando ad aumentare il peso di una vettura si possono raggiungere accelerazioni laterali maggiori, ma ovviamente una macchina più pesante seppur stabile, risulterà anche poco agile ed efficace quando invece si affrontano curve a bassa velocità; oltre ad avere una componente dell'attrito volvente maggiore. Da qui si capisce l'enorme vantaggio che il carico aerodinamico porta: a velocità più ridotte si ha una vettura con il suo peso "standard" leggermente maggiorato dal downforce, con comunque buona agilità; mentre con l'aumentare della velocità accresce con essa il carico verticale e quindi quello laterale generato dalle gomme. Questo si vede direttamente dall'equazione del lift, che nel nostro caso sarà negativo in quanto carico aerodinamico:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho A v^2 \quad (1.2)$$

Simile a quella del drag, con l'unica differenza nel coefficiente, in questo caso di lift e ovviamente negativo.

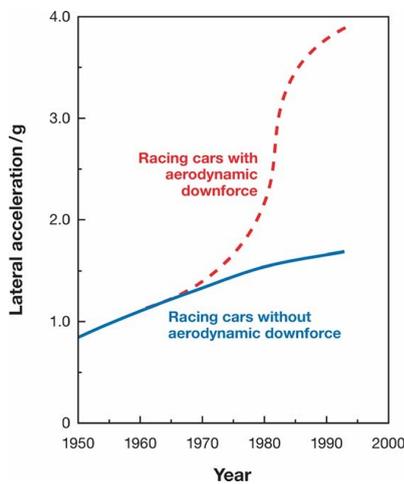


Figura 1.2: Differenza tra vetture con e senza carico aerodinamico, figura tratta da [1].

Vedremo diverse soluzioni adottate per aumentare il carico aerodinamico generato, ma si capisce quanto sia importante già dal grafico che riporta la differenza di accelerazioni laterali raggiungibili da un veicolo nel corso degli anni su vetture con e senza carico.

1.2 Storia dell'Aerodinamica del veicolo

La storia dell'aerodinamica del veicolo e della ricerca di un concept ottimale era iniziata anche prima di quando fosse effettivamente necessaria: inizialmente si traeva ispirazione dalle forme delle navi e degli aerei provando a riadattarle alle vetture, senza però ottenere il successo desiderato; questo perché con le velocità ridotte dell'epoca non si ottenevano particolari benefici da quei nuovi profili particolari, che erano inoltre stati accolti con scetticismo.

Inoltre i primissimi veicoli con il telaio ancora in stile "carrozza" erano efficaci per le esigenze di quel tempo, ossia protezione da vento, acqua e fango.

Poi più avanti con il progresso delle vetture si è arrivati a trarre dei vantaggi, sia prestazionali sia economici, dallo sviluppo aerodinamico delle vetture e questa disciplina ha preso campo.

Seppur non esista direttamente un resoconto di come si è evoluto questo processo nel corso degli anni, un obiettivo che è sempre stato comune a tutti i ricercatori era minimizzare la resistenza all'avanzamento.

Per riuscirci sono stati adottati due approcci diversi: il primo era la ricerca di un design innovativo per ottimizzare l'aerodinamica; il secondo si incentrava più su un'ottimizzazione dei dettagli, in particolare dei punti "deboli" esistenti sulle vetture, senza però andare a stravolgere il concept di base.

Come visto un primo tentativo fu quello di utilizzare le forme che si erano rivelate efficienti nelle applicazioni navali e riportarle sulle quattro ruote.

A questa prima generazione appartengono i cosiddetti "Torpedo", il cui nome deriva dall'inglese e si traduce letteralmente con "siluro", proprio per la loro forma stretta e allungata.

Seppur dal punto di vista del Drag fossero nettamente migliori rispetto alle altre vetture dell'epoca, erano tutt'altro che perfette dal punto di vista aerodinamico: infatti, oltre ad avere le ruote scoperte e la parte inferiore del telaio esposta (che portano grandi disturbi al flusso), non si era a conoscenza del fatto che, vicino al suolo, il flusso intorno a un solido di rivoluzione perda la sua simmetria, andando ad aumentare notevolmente la resistenza.

Non si può però trascurare che sulla base di questo concept Camille Jenatton realizzò nel 1899 il primo veicolo in grado di superare il "muro" dei 100 km/h.



Figura 1.3: *Jamais Contente*, figura tratta da [2]

Successivamente grazie agli studi sul drag di Riedler, Eiffel e soprattutto Prandtl si passò dal primo approccio più "intuitivo" ad uno studio più dettagliato dell'aerodinamica; seppur si continuasse ancora a provare ad applicare i concetti di aeronautica alle vetture.

L'auto che meglio rappresenta questo periodo è la Tropfenwagen di Rumpler, la cui principale evoluzione era un tettuccio non più piatto ma "raccordato" con il posteriore verso il quale si abbassava, limitando la separazione dello strato limite.



Figura 1.4: Rumpler Tropfenwagen, 1921, figura tratta da [2]

Egli riuscì ad ottenere una generazione di vetture il cui drag era diminuito di un terzo rispetto ai competitors dell'epoca, seppure le auto fossero ancora molto distanti dalla perfezione dal punto di vista aerodinamico.

Ciò si nota chiaramente sia dalla grande area frontale sia dalla forte separazione dello strato limite al posteriore.

Anche questo tipo di concept non riscontrò grande successo nel mercato dell'epoca, nonostante venissero introdotti alcuni concetti interessanti.

Il problema principale che venne riconosciuto a posteriori fu che allora era ancora presente l'idea che il flusso d'aria intorno ad un'automobile fosse bidimensionale, mentre vedremo che in realtà su una qualsiasi superficie di lunghezza finita gli effetti legati alla tridimensionalità non sono trascurabili.

Ciò venne successivamente intuito dallo stesso ideatore di questo concept (e lo si vede da elementi quali il sottoscocca liscio e le superfici convesse) ma egli non riuscì mai a realizzare una vettura con la conformazione "ideale".

Nel 1930 lo studioso Jaray anticipò quelle che sarebbero rimaste le forme di riferimento fino al secondo dopoguerra, caratterizzate da superfici lisce e integrate tra di loro (monovolume).



Figura 1.5: Audi Type K, 1923, figura tratta da [2]

Queste vetture avevano però ancora due problemi principali:

- Un'eccessiva curvatura del posteriore, che causava il distacco della vena fluida e peggiorava le prestazioni globali;
- Instabilità in condizioni di vento laterale, che venne scoperta con l'aumentare della potenza e quindi delle velocità raggiunte.

Quando nel dopoguerra ricominciò la produzione si ebbe una differenza di approccio tra l'Europa, che riprese gli studi lasciati in sospeso e l'America, in cui venne introdotto un nuovo design, il trivolume.

Quest'ultimo concept era caratterizzato da tre vani, divisi tra motore, passeggeri e bagagliaio; il risultato fu una riduzione del Drag generale del 20%, grazie al fatto che l'area frontale si avvicinò notevolmente al suo limite di efficienza.



Figura 1.6: Ford Lincoln Continental, 1949

Bastò un successivo intervento da parte degli aerodinamici nella modellazione e si arrivò a notevoli diminuzioni della resistenza all'avanzamento.

Un'ulteriore ostacolo era legato all'ergonomia: si riusciva ad ottenere delle vetture valide dal punto di vista aerodinamico finché le componenti interne erano di dimensioni ridotte (quindi si avevano potenze più limitate), mentre le auto con i motori più potenti e grandi erano inferiori in termini di efficienza.

Da qui si entra nella terza fase principale della storia, durante la quale si spostò il

focus sull'ottimizzazione dei dettagli.

In questo periodo ci si concentrava su una serie di piccole modifiche localizzate che nel loro insieme portavano a una considerevole riduzione del drag complessivo.

Inizialmente ciò portò a rapidi progressi ma ben presto si arrivò al limite di questo approccio, infatti nonostante si provassero diverse soluzioni, i miglioramenti diventavano esigui e praticamente trascurabili.

Successivamente ci fu un periodo di crisi del petrolio intorno al 1973-1974 nel quale venne "forzato" un ulteriore "step" dal punto di vista dell'evoluzione aerodinamica.

Ritornarono di tendenza i veicoli monovolume degli anni '20, con la differenza che dopo cinquant'anni di studi si aveva la conoscenza sufficiente per andare a correggere i difetti della prima generazione.

Si arrivò così all'ultima fase della storia; infatti è da questo periodo che si ispirano le vetture moderne.

Se invece non si guardano più le vetture ad uso stradale ma quelle da competizione, ci sono stati alcuni anni di riferimento per lo sviluppo:

- Nei primi anni '70 l'aerodinamica cominciò ad essere applicata per la generazione di downforce, la tendenza iniziale era quella di applicare alle "rovesciate" alle vetture;
- Negli anni '80 prese campo l'effetto suolo, visti i notevoli vantaggi che era in grado di portare;
- Negli anni '90, dopo che venne vietato per questioni di sicurezza, riprese campo uno studio approfondito su tutta la vettura.

Anche le vetture da competizione odierne sono "discendenti" di questo periodo.

Concludendo, grazie ai frequenti cambi di regolamento nelle massime categorie del motorsport, questa materia è sempre in costante evoluzione visto che anche la scoperta di minimi vantaggi può fare la differenza.

2 Elementi di meccanica dei fluidi

2.1 Proprietà dei fluidi

In generale possiamo riunire nella categoria dei fluidi sia i liquidi sia gli aeriformi. Tra le diverse proprietà degli stessi andiamo ad analizzare quelle di particolare rilevanza per lo studio dell'aerodinamica del veicolo, senza le quali non sarebbe possibile avere chiari i principali fenomeni, che sono rispettivamente:

- Densità,
- Comprimibilità,
- Viscosità.

2.1.1 Densità

La densità di qualsiasi materiale è definita come il rapporto tra la massa e il volume. Come si vede dall'equazione dei gas perfetti (accettabile per l'aria) essa è funzione di pressione, temperatura e ovviamente fluido in esame (tramite la costante del gas, R).

Si ha:

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (2.1)$$

Da cui segue che:

$$\rho = \frac{RT}{p} \quad (2.2)$$

Per un fluido a velocità molto alte varia fortemente con esse, ma per i casi che a noi interessano si può considerare pressoché costante.

2.1.2 Comprimibilità

In generale si definisce la comprimibilità di un fluido in base a come esso si comporta in termini di riduzione di volume in seguito ad una variazione di pressione (negativa, quindi compressione) esterna.

Sappiamo infatti che:

$$\Delta V = -kV\Delta p \quad (2.3)$$

con k il coefficiente di comprimibilità e T la temperatura in $[K]$.

Il coefficiente di comprimibilità k dipende dalla pressione e solitamente è molto piccolo per i liquidi, che sono "quasi" incompressibili; al contrario ha un valore molto maggiore per i gas.

Però nel nostro caso in particolare di moto di un corpo "immerso" nell'aria dobbiamo

fare una distinzione in base alla velocità a cui si viaggia, perché il moto non è sempre considerato comprimibile e anzi per la maggior parte dei regimi di velocità nei quali si lavora, utilizzare l'ipotesi di incomprimibilità permette di facilitare notevolmente i calcoli andando a commettere un errore trascurabile.

Si definisce per questo il numero di Mach, ossia il rapporto tra le velocità locali del flusso e del suono:

$$Ma = \frac{v}{\sqrt{a}} = \frac{v}{\sqrt{\gamma RT}} \quad (2.4)$$

con γ il coefficiente di dilatazione adiabatica, rapporto tra i calori specifici.

Al variare del numero adimensionale Ma cambia il metodo con cui possiamo approssimare il problema.

Per $Ma < 0.3$ possiamo infatti trattare l'aria come incomprimibile e considerando che a temperatura ambiente con una vettura da competizione che raggiunge i 300 km/h siamo a

$$Ma = \frac{v}{\sqrt{\gamma RT}} = 0.24 \quad (2.5)$$

possiamo considerare accettabile l'ipotesi di incomprimibilità.

Questo è importante perché all'aumentare del numero di Mach inizierebbero a non essere più trascurabili le variazioni di densità (significative in funzione di pressione e temperatura) e le forze di pressione diventerebbero dominanti rispetto a quelle viscosi.

Senza contare poi l'arrivo in un regime transonico, sonico o supersonico che implicherebbe altri problemi quali onde d'urto, salti di pressione e riscaldamento del flusso.

2.1.3 Viscosità

Per viscosità di un fluido si intende la resistenza degli strati adiacenti dello stesso allo scorrimento reciproco, ossia quell'attrito interno che c'è tra le molecole.

Anche questa proprietà dipende dalla temperatura e ci sono differenze nel comportamento tra liquidi e aeriformi: infatti se nei primi all'aumentare della temperatura segue una diminuzione della viscosità (perché diminuisce la coesione), nei secondi esse sono invece direttamente proporzionali, perché il riscaldamento provoca un'agitazione delle particelle che scambiano una maggiore quantità di moto.

Ed è proprio questa la differenza tra i due: nei liquidi prevalgono le forze intermolecolari mentre nei gas la velocità con cui si muovono le molecole.

Considerando un qualsiasi fluido che entra in contatto con una parete sappiamo che le sue molecole più vicine alla stessa si "attaccano" ad essa a causa delle forze intermolecolari, di conseguenza la velocità del flusso nel punto di contatto sarà nulla.

Poi allontanandosi dalla parete l'attrito tra le molecole del fluido fa sì che gli strati successivi si muovano a velocità sempre crescenti, fino a raggiungere la velocità massima, coincidente con quella del flusso.

Questa distribuzione è detta profilo di velocità, ed è anche la causa che genera uno sforzo di taglio sulla parete, coincidente con la forza di attrito viscoso F che si oppone al moto, di modulo pari a:

$$F = \mu A \frac{\Delta v}{\Delta x} \quad (2.6)$$

con μ la viscosità dinamica del fluido, $\frac{\Delta v}{\Delta x}$ il gradiente di velocità tra gli strati e A la superficie di contatto.

Un altro parametro indicativo è la viscosità cinematica:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.7)$$

ossia il rapporto tra quella dinamica e la densità del fluido.

Se a livello microscopico si può considerare la viscosità come lo scambio di quantità di moto tra le molecole, la diretta conseguenza a livello macroscopico sono le "streamlines", ossia le linee di flusso che si "attaccano" al profilo con cui interagisce lo stesso.

Per il caso stazionario abbiamo che traiettorie e linee di corrente coincidono, bisogna specificare che le prime corrispondono effettivamente al percorso del fluido, mentre le linee di corrente sono tangenti in ogni loro punto al vettore velocità, di cui rappresentano una sorta di "istantanea".

Queste ultime di solito sono importanti anche per le simulazioni CFD, dove vengono studiate per identificare aree di alta e bassa pressione, separazione del flusso e vortici.

2.2 Strato limite

Una delle dirette conseguenze della viscosità è la formazione dello strato limite, scoperto da Prandtl nei primi anni del '900.

Egli scoprì una zona molto sottile attaccata al corpo in cui le forze viscosive sono quasi dello stesso ordine di grandezza delle forze di inerzia, quindi non più trascurabili come nel resto del flusso.

Questa regione è localizzata tra la superficie del corpo e la prima linea di corrente "nitida".

All'interno di essa poi si ha anche l'evoluzione del profilo di velocità, la quale è nulla a contatto con il corpo, per poi arrivare a circa il 99 % sul confine dello strato limite. Poi in base al regime di moto esistono tre tipi diversi di strato limite:

- Laminare,
- Transizionale,
- Turbolento.

La differenza tra loro dipende dal numero di Reynolds, dato da:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (2.8)$$

funzione quindi di densità, velocità del flusso, dimensione caratteristica d e viscosità dinamica.

Se in quello laminare le particelle si dispongono secondo strati paralleli più "ordinati", in quello turbolento invece abbiamo un flusso più caotico con moto anche perpendicolare delle stesse.

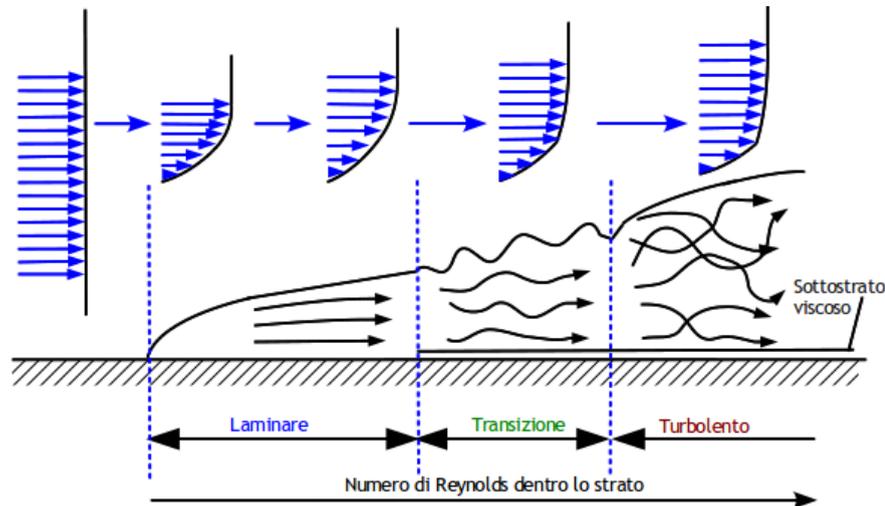


Figura 2.1: Evoluzione dello strato limite e dei profili di velocità al variare del regime di moto

Lo strato limite laminare è preferibile perché si ha una minore resistenza di attrito, dovuta al moto più ordinato, che implica minori scambi di quantità di moto e sforzi di taglio contenuti; resta però la sensibilità ai gradienti di pressione avversi, che potrebbero causare il distacco della vena fluida.

Qui si trova un vantaggio del regime turbolento, che essendo più "caotico" porta a maggiori scambi di quantità di moto, che limitano questo fenomeno.

Inoltre il profilo di velocità di uno strato limite turbolento è molto più "pieno" o "ripido" rispetto a quello laminare, ciò significa che il gradiente di velocità vicino alla parete è maggiore, così come lo sforzo di taglio sulla stessa; per questo si hanno maggiore robustezza e minor propensione a rallentare fino a un punto di distacco.

2.2.1 Paradosso di d'Alembert

La scoperta dello strato limite è stata la soluzione del paradosso di D'Alembert.

Inizialmente per studiare il moto di un corpo immerso in un fluido, vista la complessità dei calcoli, erano state assunte tre ipotesi semplificative: flusso potenziale, incomprimibile e non viscoso.

La scelta di assumere come potenziale il fluido è prettamente matematica, perché si assume che, per moto irrotazionale, la velocità del fluido sia il gradiente di una funzione scalare.

Abbiamo visto che l'ipotesi dell'incomprimibilità per velocità ridotte (paragonate a quella del suono) è accettabile e conveniente.

Resta la non-viscosità del fluido, che in prima approssimazione era sembrata corretta visto che quest'ultima proprietà nell'aria è relativamente bassa.

Fu questa però che portò al paradosso, perché risultava che un qualsiasi corpo investito da un flusso non producesse alcuna resistenza.

Ovviamente ciò è impossibile, come è stato provato poi da Prandtl con lo strato limite, in cui si concentrano gli effetti della viscosità e si arriva al concetto di resistenza "parassita".

2.3 Equazioni di Navier-Stokes

Le equazioni di Navier-Stokes sono le relazioni che rappresentano al meglio le condizioni di un fluido reale.

Sono non lineari e derivano dai principi di conservazione di massa, quantità di moto ed energia.

Sono in grado di descrivere pressione e velocità di un fluido in ogni punto dello spazio e del tempo.

Sono importanti perché tramite esse si riesce a modellare una vasta gamma di fenomeni.

Data però la loro complessità, una risoluzione in forma analitica è possibile solo per un numero limitato di casi molto semplici.

Infatti la maggior parte delle volte viene utilizzata una soluzione di tipo numerico, che permette di ottenere risultati approssimati ma estremamente accurati.

Per il caso incomprimibile le equazioni in forma vettoriale sono le seguenti:

- $$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (2.9)$$

- $$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (2.10)$$

con la prima che è l'equazione di continuità, mentre la seconda è la conservazione della quantità di moto (vale per tutte e 3 le direzioni), con D/Dt la derivata materiale. Il gradiente di pressione è il termine principale perché evidenzia come il fluido tenda ad accelerare nella direzione in cui la pressione diminuisce.

E ciò si ricollega a quanto visto per la resistenza aerodinamica: il fluido ad alta pressione sul leading edge "vorrebbe" andare verso il trailing edge dove la pressione è minima, quindi genera una forza che è appunto il drag.

2.3.1 Equazioni di Navier-Stokes mediate con Reynolds

Nel caso di flussi turbolenti le equazioni di Navier-Stokes si complicano ulteriormente.

Questo perché le variabili di campo come la velocità e la pressione non cambiano in modo regolare ma oscillano rapidamente nel tempo.

"Mediare" secondo Reynolds consiste nel dividere una determinata grandezza istantanea in due componenti:

- Media, ottenuta appunto dalla media (o temporale o statistica);
- Fluttuante, che rappresenta la deviazione istantanea dalla media.

Successivamente si utilizza la forma "classica" delle equazioni e si sostituiscono le variabili con la loro forma scomposta, per poi fare la media temporale su tutta l'equazione.

Dopo questa compaiono nuovi termini che introducono il "tensore degli sforzi di

Reynolds", che rappresenta gli effetti medi della turbolenza sul flusso. Queste nuove quantità sono però note solo statisticamente, quindi il sistema non è chiuso, ossia si hanno più incognite che equazioni anziché averne lo stesso numero. Per questo nelle simulazioni CFD vengono introdotti i modelli di turbolenza, basati su ipotesi fisiche ed evidenze sperimentali, che aggiungono leggi empiriche per rappresentare gli effetti delle fluttuazioni sulle variabili medie e stimare questi termini.

2.4 Distacco della vena fluida

Durante il moto del nostro corpo immerso in un fluido sappiamo che si genera un gradiente di pressione; finché quest'ultimo è negativo lo strato limite rimane laminare perché avremo la forza di pressione e la quantità di moto del fluido che "vinceranno" l'attrito viscoso.

Questo gradiente di pressione però diventerà avverso in quelle regioni dove la pressione cresce lungo la direzione del flusso, andando insieme all'attrito viscoso ad ostacolare il moto.

Finirà poi la quantità di moto della singola particella, che di conseguenza annullerà lo sforzo viscoso e si avrà solo il gradiente di pressione avverso che genererà un "ricircolo" e porterà al distacco della vena fluida.

Questo distaccamento dello strato limite porta a pessimi effetti dal punto di vista aerodinamico, quali:

- Una scia turbolenta nella parte posteriore, con una pressione molto bassa (mentre nella condizione ottimale si dovrebbe avere un recupero di pressione) che incrementa notevolmente il Drag "di forma";
- I vortici nella scia possono causare delle forze laterali "instabili", soprattutto ad alte velocità, portando ad instabilità per esempio in situazioni di vento laterale;
- Inoltre, andando a perdere parte della depressione, avremo come conseguenza anche una perdita di carico aerodinamico; perlopiù in base a dove si verifica il distacco potremmo avere uno spostamento del centro di pressione del veicolo andando ad alterarne l'equilibrio.

Quindi abbiamo capito che "idealmente" non vorremmo che questo fenomeno si verificasse, seppur ovviamente ciò non sia possibile.

Come vedremo però possono essere adottate alcune contromisure per limitarlo il più possibile, o localizzarlo in particolari zone in cui vogliamo che si verifichi.

2.5 Teoria del profilo alare 3D

Uno dei concetti fondamentali alla base dell'aerodinamica è il fatto che non ci si può fermare a uno studio in due dimensioni di un qualsiasi profilo come se fosse di lunghezza infinita, visto che alcuni tra i principali fattori dipendono proprio dalla "finitezza" del corpo stesso e hanno come conseguenza degli effetti tridimensionali sul flusso d'aria.

Un primo esempio riguarda la distribuzione della (de)portanza.

A differenza di un'ala bidimensionale, dove essa è considerata uniforme lungo tutta la lunghezza, su un'ala reale non è costante.

Ciò è una diretta conseguenza di un fenomeno chiamato vortice d'estremità.

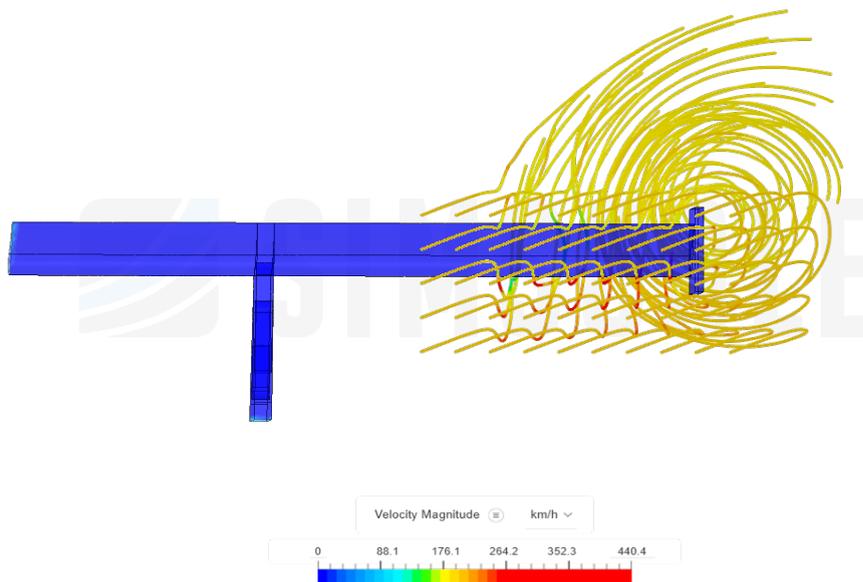


Figura 2.2: Vortice d'estremità visualizzato nella simulazione CFD del profilo alare monoelemento

Questo non è altro che un flusso d'aria vorticoso che si genera, appunto all'estremità, di una qualsiasi superficie alare con portanza (o come in questo caso deportanza), a causa della differenza di pressione tra le due parti dell'ala, con l'aria ad alta pressione che tende a "scavalcare" l'estremità e a fluire verso il lato a bassa pressione sottostante.

Questo movimento d'aria genera un vortice che si avvolge dietro l'alettone consumando energia cinetica del flusso e alterandone anche la direzione effettiva della frazione che passa sopra l'ala.

Quest'ultimo effetto detto "downwash" investe ogni sezione dell'ala, riducendo l'angolo d'attacco effettivo; inoltre ovviamente aumenta di intensità verso le estremità dell'ala e si riduce man mano che ci si avvicina alla radice.

E poiché la portanza dipende dall'angolo d'attacco, questa diminuzione dello stesso verso le estremità causa una riduzione della portanza locale.

Di conseguenza, quest'ultima non sarà uniformemente distribuita, ma avrà una forma approssimabile a una curva, con il massimo nella parte centrale dell'ala e che tenderà a zero alle estremità.

Ne segue anche un aumento della resistenza all'avanzamento, con una componente aggiuntiva che viene chiamata *drag indotto*, funzione del vortice d'estremità stesso.

Da notare che questa frazione del drag, come abbiamo visto, è direttamente legata alla produzione di carico aerodinamico, quindi inevitabile per qualsiasi ala che nasce proprio per generarlo.

Esiste infatti una relazione che li lega direttamente, valida per qualsiasi profilo alare ideale senza separazione del flusso:

$$C_{D_i} = \frac{C_L^2}{\pi e AR} \quad (2.11)$$

con

- e , fattore di Oswald o di efficienza dell'allungamento alare, su cui ci soffermeremo;
- AR , l'aspect ratio, è un parametro geometrico dell'ala che indica il rapporto tra la l'apertura alare e la corda media.

C'è da considerare anche che nella condizione di stallo il drag indotto, che di solito corrisponde a circa il 25/30 % di quello totale, cala drasticamente in quanto il pressure drag diventerà la componente predominante.

2.5.1 Teoria della linea portante di Prandtl

La teoria di Prandtl fu un primo modello pratico per analizzare gli effetti tridimensionali del flusso sulle ali finite.

Si basa su una serie di ipotesi:

- L'ala viene sostituita da una "linea portante" avente la stessa lunghezza;
- Fluido incomprimibile;
- Flusso potenziale;
- Angoli di attacco contenuti.

Seppur queste siano ipotesi fortemente semplificative, Ludwig Prandtl riuscì all'inizio del secolo scorso ad ottenere un modello funzionale e rigoroso che gettò le basi per lo studio dell'aerodinamica moderna.

Infatti oltre a scoprire tutto ciò che abbiamo già visto (vortice d'estremità, drag indotto, downwash), intuì anche la distribuzione ideale della portanza, quella ellittica. Questa soluzione minimizza la resistenza indotta per una data portanza e apertura alare, dato che permette di avere il downwash costante lungo tutta l'ala, che è la condizione ideale per l'efficienza in quanto si ha lo stesso angolo di attacco indotto in ogni sezione dell'ala.

Quindi la resistenza indotta viene generata in modo uniforme e l'integrazione di questa resistenza su tutta l'ala produce il valore minimo possibile per una data portanza.

Al contrario, un downwash non uniforme creerebbe un vettore portanza locale più inclinato all'indietro in alcune sezioni, con conseguente aumento complessivo della resistenza indotta.

Tornando infine al fattore di Oswald, esso è un valore adimensionale che esprime quanto la distribuzione della portanza su un'ala reale si avvicini a quella ellittica e per quest'ultima e ha valore unitario.

3 Aerodinamica applicata al veicolo

3.1 Differenze tra uso stradale e da competizione

Lo studio dell'aerodinamica, in base al tipo di veicolo al quale viene applicato, presenta delle differenze sia nello scopo che si pone sia nelle risorse che vengono spese per la ricerca.

Ci sono poi ovviamente anche delle differenze tra le auto da utilizzo esclusivamente cittadino e quelle dal carattere più sportivo, oltre che tecniche anche in termini di risorse effettivamente impiegate.

Rimane comunque il fatto che per tutte le vetture ad uso stradale i target principali siano minimizzare il drag e garantire stabilità anche in condizioni avverse.

Un'auto con poco drag permette al costruttore di limitare le emissioni, regolate da sempre più stringenti normative e in più, sempre per le auto caratterizzate da un design più sportivo, di aumentare leggermente le velocità di punta.

Tutt'altro discorso riguarda invece le vetture da competizione, qui ingenti quantità di risorse e uomini si dedicano esclusivamente al concept aerodinamico del veicolo: dall'ottimizzazione delle singole parti fino all'interazione tra esse nel sistema globale della vettura, a volte persino andando a stravolgere elementi di primaria importanza quali telaio o componenti interne nella ricerca del miglior percorso dei flussi d'aria. In queste ultime si ricerca sempre stabilità, ma il target principale rimane trovare il massimo dell'efficienza aerodinamica possibile; questo perché ovviamente si vuole avere una bassa resistenza all'avanzamento, ma è necessario anche generare una quantità importante di carico aerodinamico per massimizzare le prestazioni in curva. Vedremo anche come su queste ultime vengono applicati diversi elementi secondari volti proprio alla ricerca della massima efficienza.

3.1.1 Vetture da competizione, scopi e design

Gli obiettivi che ci si prefissa nello studio delle vetture da competizione si possono riassumere in:

- Minimizzare il coefficiente di Drag;
- Ridurre il più possibile l'area frontale;
- Avere il massimo rapporto (negativo) Lift-Drag (quale priorizzare dipende dal contesto e soprattutto dal regolamento tecnico);
- Avere una maggiore deportanza sull'asse posteriore rispetto a quello anteriore (soprattutto per stabilità);
- Riuscire ad avere un raffreddamento dei componenti sufficiente senza penalizzare troppo l'aerodinamica.

3.2 Effetto Venturi

Partiamo dal fenomeno che, applicato alle vetture, in termini di efficienza è il più vantaggioso.

L'effetto Venturi nella meccanica dei fluidi è una diretta conseguenza del teorema di Bernoulli applicato al caso particolare del tubo di Venturi.

Quest'ultimo è un tubo piano il cui asse centrale è orizzontale e la sezione in ingresso è maggiore di quella in uscita. L'equazione di Bernoulli tra ingresso (1) e uscita (2) ha la forma:

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 \quad (3.1)$$

che per le due altezze uguali diventa:

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} \quad (3.2)$$

Risulta coerente adottare come ipotesi il fatto che la portata massica sia costante, da cui segue che avremo $v_1 < v_2$ e quindi $p_1 > p_2$.

Le vetture ad effetto suolo utilizzano questa depressione che si crea nel flusso d'aria tra il fondo e l'asfalto per andare a generare deportanza.

Si è visto anche che l'utilizzo dei canali Venturi è una delle migliori soluzioni in termini di efficienza; infatti si riesce ad avere un enorme incremento della deportanza con un basso incremento del drag, che risulta irraggiungibile anche con i profili alari più complessi.

Seguendo il percorso del flusso avremo:

- Un'ampia sezione di ingresso per massimizzare la quantità entrante;
- Un restringimento nella parte centrale nella quale il flusso accelera notevolmente e si crea una zona a bassa pressione, generando il "risucchio" desiderato;
- Il diffusore in cui la sezione si riallarga e si recupera la pressione favorendo l'estrazione dell'aria.

Proprio quest'ultimo elemento è fondamentale per un miglior mantenimento delle condizioni di pressione e scorrimento del flusso.

Inoltre, è importante avere il flusso d'ingresso dei canali il più pulito possibile, così da avere una maggiore velocità iniziale a cui segue il salto di pressione massimo.

Come vedremo esistono diversi elementi per l'ottimizzazione dell'effetto suolo come le *fences* per indirizzare il flusso "sporco" verso l'esterno o le *minigonne* per sigillare al meglio i canali.

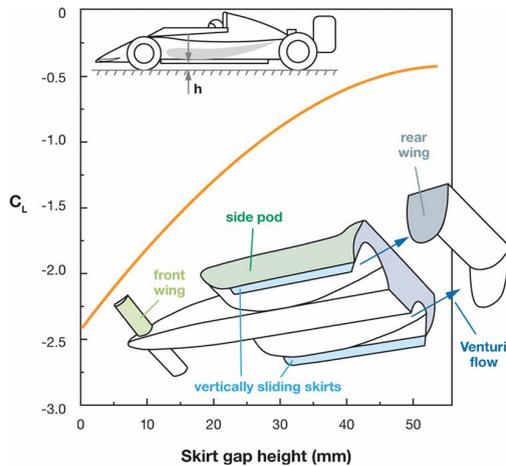


Figura 3.1: Coefficiente di lift al variare dell'altezza da terra, figura tratta da [1]

Un altro parametro fondamentale è la vicinanza all'asfalto: al diminuire di essa seguirà una diminuzione della sezione di passaggio nella parte centrale del fondo, quindi anche una maggiore accelerazione del flusso.

Un flusso con maggiore velocità porta poi ad un maggiore salto di pressione e di conseguenza un maggior downforce generato.

Si nota come una vettura più "alta" comporti maggiori infiltrazioni che portano a perdite di carico e stabilità.

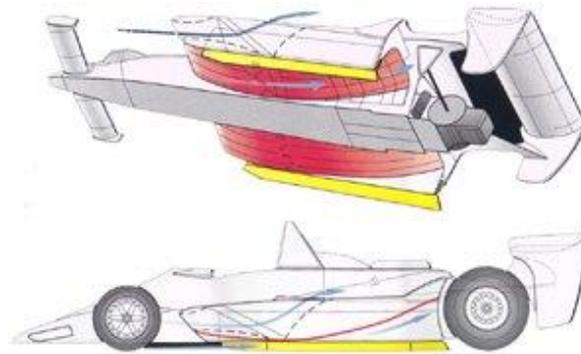


Figura 3.2: Effetto Venturi applicato al fondo di una vettura di formula 1

3.2.1 Porpoising

Il porpoising è un fenomeno che si verifica quando l'effetto suolo viene estremizzato oltre il suo limite.

Quando il flusso viene accelerato eccessivamente nel fondo c'è il rischio che nella sezione centrale di area minima la distanza tra lo stesso e il suolo sia tanto ridotta da non permettere più il passaggio dell'aria.

Segue quindi un'improvvisa perdita di carico, che manda in stallo il fondo stesso e fa perdere efficienza.

Il mancato passaggio dell'aria porta poi ad un "balzo" verso l'alto della vettura; di conseguenza i canali venturi avendo di nuovo uno spazio sufficiente ricominciano a lavorare.

E finché la velocità rimarrà elevata ciò avverrà ciclicamente, andando a danneggiare sia la vettura sia ovviamente le prestazioni.

Quindi il fattore chiave dell'effetto suolo è proprio riuscire a trovare un compromesso sull'altezza da terra, che come visto in precedenza vorremmo fosse minima per la massima efficienza, ma sufficientemente grande da non innescare questo fenomeno.

3.3 Introduzione agli elementi aerodinamici

Oltre alla ricerca di un telaio che garantisca il minimo drag e la maggior efficienza aerodinamica possibili, esistono diverse soluzioni adottabili per andare a "limare" ulteriormente i dettagli e migliorare il pacchetto complessivo.

Un vantaggio dei componenti è che in primo luogo possono essere studiati e ottimizzati singolarmente, seppur rimanga fondamentale poi l'integrazione nel corpo vettura in cui si devono considerare le interazioni reciproche fra essi.

Esistono due principali categorie: alcuni hanno come scopo aumentare la performance, mentre altri servono principalmente per generare dei vortici nella propria scia andando a "danneggiare" la stabilità di eventuali vetture che seguono.

3.4 Spoiler anteriore

Lo spoiler anteriore è un'estensione della parte anteriore della scocca di una vettura il cui scopo principale è ridurre la distanza della stessa dal suolo.

La sua presenza modifica la distribuzione dei flussi ed ha effetto sia sulla deportanza sia sulla resistenza all'avanzamento.

Si è visto che al diminuire della sua distanza dalla superficie stradale segue un aumento del carico aerodinamico generato all'anteriore, che si riflette in una miglior aderenza e stabilità direzionale.

Nella parte inferiore si instaura una zona di ricircolo, caratterizzata da bassa pressione dovuta alla separazione del flusso e alle perdite viscosive.

Mentre nella parte superiore avremo alta pressione, da questa differenza si genera il carico.

Un'altra conseguenza dell'adozione di questa soluzione è un abbassamento dei punti di ristagno, da cui si avrà sia una minor penetrazione del flusso d'aria nella parte inferiore del veicolo, sia una maggiore quantità della stessa spinta attorno ai lati e sul cofano, privilegiando quindi il raffreddamento.

In teoria però avendo una superficie frontale maggiore dovrebbe aumentare anche il drag.

Ma in realtà grazie al flusso ai lati al cofano, che ha una velocità maggiore e quindi una pressione minore, esso viene limitato.

Inoltre esso fornisce anche una maggiore copertura delle ruote, quindi si ha un'ulteriore riduzione della resistenza.

Infine per vetture non dotate di fondo piatto, un minor quantitativo d'aria che passa nel sottoscocca porta a minori perdite quando incontra i vari elementi che disturbano il flusso nelle vetture stradali.

Si ha quindi un netto miglioramento in termini di efficienza sull'anteriore.

Spesso per un'ottimizzazione completa è accompagnato da uno splitter.

3.5 Splitter

Lo splitter è un'estensione orizzontale del labbro inferiore dello spoiler anteriore con il quale "lavora" in simbiosi.

Infatti da esso derivano sia un aumento consistente di deportanza all'anteriore sia una variazione quasi nulla di drag generato, grazie alla piccolissima sezione frontale di questo dispositivo.

La deportanza generata aumenterà con la lunghezza (intesa come estensione nella direzione dell'avanzamento) dello splitter fino ad un certo valore limite, oltre il quale non si ottengono benefici.

Il principio di funzionamento dello splitter è creare contemporaneamente una zona di alta pressione appena al di sopra di esso (dove si congiunge con lo spoiler) e una zona di forte depressione immediatamente al di sotto; con il risultato complessivo di un notevole incremento di deportanza all'asse anteriore.



Figura 3.3: Divisione dei flussi dovuta all'utilizzo dello spoiler anteriore e dello splitter.

3.6 Minigonne

Dette anche "bandelle laterali", sono elementi applicati alla carrozzeria che si trovano nella parte inferiore della fiancata e coprono quasi tutta la distanza che c'è tra gli assi delle due ruote.

La loro funzione principale è delimitare lo spazio tra il fondo della vettura e l'asfalto. Sono un elemento tra quelli che vengono utilizzati per l'ottimizzazione dell'effetto suolo.

Il loro impiego porta diversi benefici, come un aumento della deportanza e della stabilità a velocità elevate, perché si riesce a sigillare il flusso d'aria che attraversa il fondo.

In alcune categorie del motorsport, come la Formula 1, sono però state vietate per motivi di sicurezza: essendo infatti molto sottili e quindi facilmente danneggiabili, è stato valutato troppo alto il rischio che potessero, in seguito a collisioni, diventare detriti e causare forature.

Un altro fattore non trascurabile per cui vengono impiegate è quello estetico, infatti

le minigonne rendono la vettura più bassa e sportiva facendola percepire come più "dinamica".

In conclusione si può dire che le minigonne sono funzionali e utilizzate nelle vetture da competizione (dove il regolamento lo permette) e nelle macchine dal carattere più sportivo; mentre per l'uso quotidiano e stradale si tende a evitarle sia per il limitato vantaggio aerodinamico a basse velocità sia per le numerose irregolarità presenti nel fondo stradale che potrebbero danneggiarle.



Figura 3.4: Dettaglio di una minigonna per un'Alfa Romeo Giulietta.

3.7 Diffusore

In una vettura il diffusore, detto anche estrattore, è la parte inferiore del posteriore della vettura.

Il suo scopo principale è favorire l'uscita del flusso d'aria che scorre al di sotto della macchina per accelerarlo, andando a creare una maggiore depressione per favorire l'effetto suolo e di conseguenza la deportanza.

Per quanto riguarda la sua modellazione deve essere piatto nella parte iniziale e particolarmente rialzato e scavato nella parte finale; la pendenza deve però presentare una variazione graduale dell'angolo di inclinazione, in modo da evitare che il flusso si separi troppo velocemente dalla parte superiore e sui lati.

Spesso si utilizzano delle paratie verticali come convogliatori di flusso per rendere lo stesso il più omogeneo possibile.

In Formula 1 esso è accompagnato dalla beam wing, una piccola ala posizionata appena sopra al diffusore per favorire lo scorrimento del flusso.

Questa crea una zona a bassa pressione che potenzia l'effetto Venturi e aumenta il carico aerodinamico senza penalizzare troppo la resistenza all'avanzamento.

Inoltre stabilizza il flusso verso l'ala posteriore migliorando nettamente l'efficienza del retrotreno.

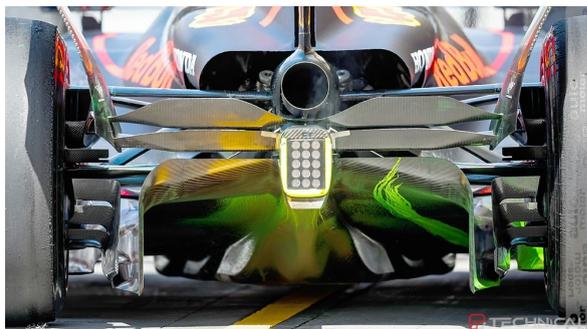


Figura 3.5: Flusso in uscita dal diffusore che scorre verso la beam wing della Redbull F1 tracciato con la flow-viz, figura tratta da [3]

3.7.1 Ventilatore

Nel corso della storia dell'aerodinamica si è sempre cercato di estremizzare i vantaggi che essa è in grado di portare ad un veicolo.

Soprattutto per quanto riguarda i prototipi da competizione, questo ha portato a soluzioni spesso "borderline" con i regolamenti.

Tra queste va fatta una menzione d'onore alla Brabham del 1978 per l'introduzione di questa geniale soluzione.

Infatti gli ingegneri erano riusciti a sigillare quasi completamente il fondo, oltre ad installare un ventilatore che toglieva aria dal fondo vettura abbassandone ulteriormente la pressione e "forzando" l'effetto suolo stesso.

Ma questo non era l'unico vantaggio che questo elemento innovativo conferiva alla vettura, infatti:

- Il Drag aggiuntivo che questa soluzione genera è irrisorio rispetto alla quantità di deportanza che riesce a generare;
- Il downforce generato è indipendente dalla velocità del veicolo, migliorando così notevolmente le prestazioni a basse velocità nelle curve lente (che sono l'unico "limite" dell'effetto suolo);
- Infine si ha anche una stabilità più costante, che si riflette in maggior prevedibilità e sicurezza, data dal fatto che il flusso d'aria sotto la vettura è meglio controllato e permette di evitare turbolenze e variazioni repentine di carico aerodinamico.



Figura 3.6: Brabham con ventilatore, 1978

3.8 Generatori di vortici

Seppur di minime dimensioni i generatori di vortici hanno una notevole importanza, ma come tutti gli altri elementi bisogna effettuare un corretto dimensionamento. Il loro scopo principale è, come si evince anche dal nome stesso, generare dei vortici; ma ciò può avere due finalità diverse:

- La prima è evitare il distacco della vena fluida, posticipando il fenomeno verso una zona più arretrata della vettura;
- La seconda è andare ad aumentare le turbolenze generate nella propria scia, per "danneggiare" maggiormente un'eventuale vettura che insegue.

Un esempio che si collega bene al primo motivo per cui si adottano può essere il lunotto posteriore di una qualsiasi vettura: infatti in molte auto questa zona è soggetta alla separazione dello strato limite a causa di una deviazione troppo marcata, con conseguente aumento del drag e, se presente, limitazione del funzionamento di una superficie alare posteriore.

Ma grazie all'applicazione di questi piccoli "ostacoli" nel punto dove inizierebbe la separazione si ha un "rimiscelamento" del flusso d'aria che porta notevoli benefici allo strato limite: questo infatti viene re-energizzato dalla transizione da regime laminare a turbolento, che per caratteristiche resiste meglio al distacco.

Un dimensionamento erroneo però comporterebbe che il beneficio ottenuto dal ritardo del distacco risulterebbe vano rispetto alla resistenza ausiliaria intrinseca dei generatori.

Un altro possibile utilizzo può essere quello di "sostituire" le minigonne dove vietate per regolamento: per sigillare il fondo si crea una struttura vorticoso sul lato dello stesso per minimizzare le infiltrazioni, che sarà tanto più forte quanto più il "marciapiede" è vicino al suolo.



Figura 3.7: Generatori di vortice applicati sul tettuccio della Mitsubishi Lancer Evo IX del 2005, figura tratta da [4]



Figura 3.8: Generatori di vortice applicati sul marciapiede del fondo Ferrari, figura tratta da [5]

3.8.1 Scia

L'effetto scia influenza fortemente le forze che agiscono su una vettura.

Infatti in base alla distanza che si ha con la vettura davanti, drag e carico aerodinamico subiscono consistenti variazioni, che sono ulteriormente accentuate se si è nella scia di più vetture a distanza ravvicinata.

Si stima che il drag diminuisca anche fino al 30 % per la prima vettura in coda, fino ad arrivare al 37 % per quelle ancora dietro, ciò ovviamente è positivo per le prestazioni.

Al contrario il downforce è fortemente penalizzato, e ciò si riflette in:

- Un anteriore meno preciso, che tende al sottosterzo, dato che è la parte più colpita dall'aria "sporca", quindi per una stessa curva si dovrà fornire un input di sterzo maggiore;
- Un fondo che perde di efficienza, alterando il bilanciamento aerodinamico;
- Trasferimenti di carico laterale più "bruschi", in cui si rischia di perdere il controllo;

Per questi motivi riuscire a concentrare i flussi turbolenti verso le vetture che seguono è uno degli obiettivi principali nelle vetture da competizione .

3.9 Endplates

Gli *endplates* sono elementi di micro-aerodinamica applicati alle estremità degli alettoni o della carrozzeria.

Li si trova principalmente nelle vetture da competizione più estreme, perché la loro utilità nelle macchine ad uso cittadino sarebbe limitata.

Si usano come deviatori di flusso per gestire e limitare eventuali turbolenze; al variare della loro angolazione segue variazione di carico e resistenza prodotti.

Il loro scopo principale resta però limitare il drag indotto: essendo barriere verticali limitano lo scorrimento dell'aria tra intradosso ed estradosso contenendo fortemente i vortici di estremità.

La loro importanza si vede soprattutto nei profili alari con elevato angolo di attacco a velocità ridotte.

Si stima che con il loro impiego si riesca a limitare il drag indotto di circa il 10%.



Figura 3.9: Endplates sull'ala anteriore della McLaren F1, figura tratta da [6]

3.10 Ala posteriore

Lo *spoiler* è la soluzione aerodinamica più conosciuta e diffusa, sia per i numerosi vantaggi che porta in termini di prestazioni sia perché è anche molte volte "richiesto" per l'estetica.

La sua funzione principale è quella di aumentare il downforce generato, incrementando la stabilità della vettura e permettendole quindi di raggiungere valori maggiori di accelerazione laterale.

Un ulteriore vantaggio è che questo carico aggiuntivo è "localizzato" sul retrotreno della vettura, proprio dove noi vorremmo avere una migliore stabilità possibile per un bilanciamento ottimale.



Figura 3.10: Alettone posteriore a singolo elemento

In base al tipo di vettura sul quale sono applicati, si possono poi distinguere profili alari a singolo elemento e quelli composti da più flap.

3.10.1 Ala a singolo elemento

Un alettone posteriore costituito da un singolo elemento è abbastanza semplice nel design e porta a diversi effetti dal punto di vista aerodinamico.

Innanzitutto proprio la semplicità non è un fattore da trascurare, soprattutto per quanto riguarda la produzione, l'installazione e ultima non per importanza la regolazione dell'ala stessa; infatti è molto facile far variare l'angolo d'attacco per la ricerca di un bilanciamento ottimale.

Inoltre queste ali generalmente producono meno drag rispetto a quelle multi-elemento, proprio per le loro superfici lisce e semplici.

Tuttavia bisogna anche considerare che il carico aerodinamico generato, rispetto alle altre, è inferiore: questo perché più downforce voglio generare più vado ad aumentare l'angolo di attacco, fino ad un valore massimo per cui il moto diventerà turbolento causando la separazione e ci sarà di conseguenza una perdita di deportanza associata a un enorme incremento del drag, in quella che è detta "condizione di stallo".

Quindi visto che non posso arrivare a valori di carico elevati, seppur il drag generato sia poco, a livello di efficienza globale quest'ala non è ottimale.

Un altro punto a sfavore è che questa tipologia di ali è meno "adattabile" al variare delle condizioni, del tracciato e delle velocità; quindi l'unico modo per cambiare configurazione è sostituirla.

3.10.2 Ali a più flap

Le ali multi-elemento sono realizzate collegando insieme una serie di flap, il cui scopo è massimizzare le performance aerodinamiche dell'ala.

Un grande vantaggio sta nel downforce generato, nettamente maggiore rispetto ad un profilo alare costituito da un singolo elemento.

Questo accade grazie al fatto che più superfici portano ad un salto di pressione maggiore, che ha come conseguenza un maggiore carico generato.

Inoltre grazie ai più elementi si ha un miglior controllo del flusso, proprio perché questi ultimi possono ri-energizzare lo strato limite, portandolo a subire meno separazione e riducendo le turbolenze generate.

Da questo deriva la possibilità di avere angoli di attacco maggiori, che incrementano la generazione di downforce senza però subire l'ingente incremento di drag dovuto al distacco, come su quelle a singolo elemento.

Tutto ciò si riflette poi anche in una maggiore stabilità all'aumentare della velocità.

Un ulteriore vantaggio è la possibilità di regolare separatamente i singoli flap in modo da ottimizzare l'ala al variare delle condizioni.

Possiamo concludere dicendo che queste specifiche sono sicuramente complesse, costose e devono essere regolate maggiormente; ma a livello di efficienza aerodinamica sono nettamente le migliori in termini di performance.

4 Analisi CFD di profili alari

Il calcolo CFD è uno degli aspetti fondamentali dell'aerodinamica, in quanto esso permette di ottenere un primo e preciso riferimento di come andrà ad evolvere il flusso su un componente che stiamo studiando.

Facendo riferimento a quanto visto sulla differenza tra alettoni a singolo elemento o a più flap sono state eseguite due simulazioni su modelli in scala 1:1 per verificare che effettivamente il secondo tipo di specifica, grazie alla separazione dello strato limite ridotta, riporti un'efficienza maggiore.

Per fare ciò sono stati eseguiti diversi passaggi:

- Preparazione dei modelli CAD,
- Realizzazione del mesh e scelta delle impostazioni del processo simulativo,
- Analisi dei risultati.

4.1 Modelli CAD

Con l'utilizzo del programma: "Creo Parametric", sono stati realizzati due modelli di alettoni posteriori con particolari caratteristiche volte a rendere direttamente confrontabili i due profili di seguito rappresentati:

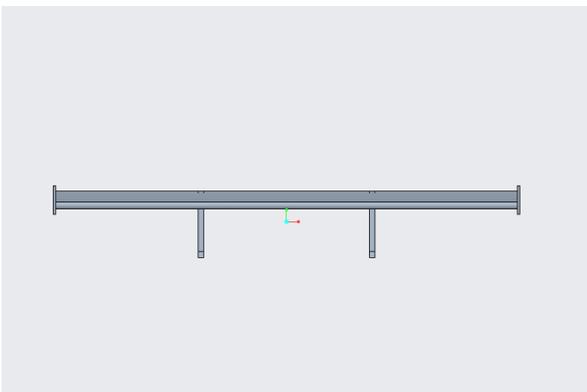


Figura 4.1: Ala a singolo elemento

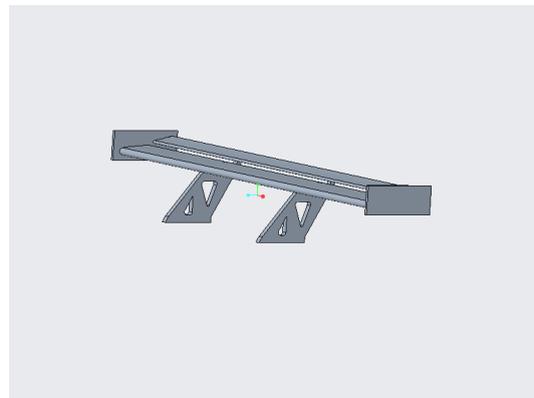


Figura 4.2: Ala con due flap

Le due specifiche sono state disegnate con alcuni elementi comuni in termini di forma e dimensioni, riprese direttamente da un alettone per vetture GT, quali:

- Sostegni di base,
- Endplates,
- Area frontale ($0,112 \text{ m}^2$),
- Lunghezza profilo ($1,6 \text{ m}$) e corda ($0,45 \text{ m}$);
- Angolo di attacco (-10°),
- Angolo di deflessione tra ingresso ed uscita (20°).

Vediamo ora le dimensioni principali direttamente riportate sull'ala (in mm):

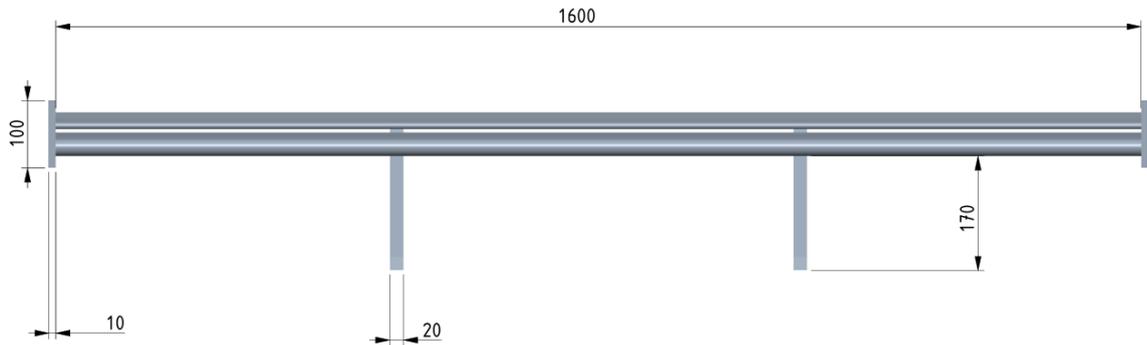


Figura 4.3: Vista frontale dell'ala quotata

Infine per una migliore visualizzazione segue una rappresentazione in sezione dell'ala a più flap.

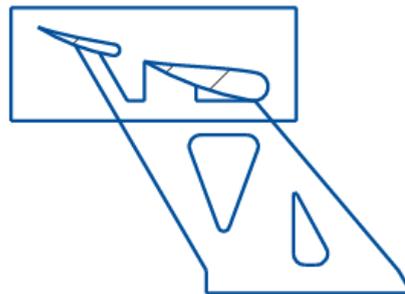


Figura 4.4: Vista in sezione dell'ala

4.2 Impostazioni simulazione

Anche per quanto riguarda le impostazioni che hanno portato alla generazione del mesh e alla simulazione stessa sono stati utilizzati parametri comuni per entrambe le versioni, sempre per confrontare direttamente i risultati.

4.2.1 Dominio fluido

Le simulazioni sono state effettuate su metà del profilo alare per sfruttare la simmetria dello stesso, andando a risparmiare potenza di calcolo che è stata invece dedicata a rendere il mesh il più fine possibile.

Innanzitutto è stato creato il volume di fluido, ovviamente come flusso "esterno" rispetto al nostro alettone, e come dimensioni si è scelto:

- Dal centro dell'alettone fino a 3 volte la sua dimensione in larghezza;
- Dalla sua base fino a 4 volte la sua altezza;
- Da 3 volte la sua apertura alare prima che il fluido lo investisse fino a 5 volte la stessa dopo, per avere una completa evoluzione dello strato limite.

Questi valori risultano leggermente minori rispetto a quelli ideali, ma come vedremo si è optato di rendere il più fine possibile il mesh intorno al profilo a discapito della dimensione globale, non essendo di primaria importanza ciò che accade lontano dallo stesso.

Successivamente si è eliminata l'ala per far sì che venisse considerata come "ostacolo" all'interno di questo volume, così da poter visualizzare il flusso intorno ad essa.

4.2.2 Parametri simulazione

La simulazione è stata di tipo incomprimibile, perché abbiamo visto essere accettabile nel caso in questione dato che siamo a Mach minore di 0,3.

Come modello di turbolenza è stato adottato "K omega SST" che è risultato il più adatto per simulazioni di flussi esterni.

Questo perché è un compromesso tra i modelli più classici dei quali mantiene le principali caratteristiche.

In particolare:

- Dal K-omega mantiene l'estrema precisione nel descrivere il comportamento del flusso turbolento vicino a una parete, fondamentale visto che fenomeni come lo strato limite, la separazione del flusso e lo stallo influenzano pesantemente drag e downforce;
- Dal K-epsilon prende robustezza e stabilità nel calcolo dei flussi turbolenti in aree lontane dalla parete, come il flusso in ingresso e la scia a valle di un oggetto;

- Dal SST (Shear Stress Transport) mantiene l'accuratezza della gestione degli strati dove il flusso si separa dalla superficie di un corpo, rendendo precisi anche i valori della resistenza di forma.

Il flusso medio è stato considerato come stazionario, che implica il fatto che le grandezze medie, quali velocità, pressione, densità e temperatura, rimangano costanti nel tempo.

Come materiale del dominio fluido ovviamente è stata scelta l'aria.

Poi sono state applicate le seguenti condizioni al contorno:

- Velocità in ingresso pari a 200 km/h, un valore a cui questi profili comunemente lavorano;
- Pressione all'uscita relativa (all'atmosfera) nulla, dovuta alla grande estensione del dominio per cui risulta accettabile;
- Condizione di simmetria sulla parete nell'esatto centro del profilo alare, perché abbiamo appunto eseguito la simulazione su metà profilo;
- Condizione di scivolamento su tutte le pareti del volume che non interessavano direttamente il flusso;
- Condizione di non-scivolamento su tutto il profilo alare, per simulare appunto la sua resistenza.

Per quanto riguarda la parte numerica sono state adottate le specifiche che garantissero una maggiore stabilità durante la simulazione, quindi rispetto ai parametri standard sono stati adottati come schemi "Gauss linear" per il gradiente e "Gauss linear corrected" per il laplaciano.

Mentre per quanto riguarda divergenza, interpolazione e gradiente normale alla superficie si sono scelti quelli standard.

Infine è stata ridotta l'incertezza sulle grandezze fino al quarto ordine decimale (di default sarebbe al sesto), che è risultato comunque sufficiente per arrivare rapidamente a convergenza nei risultati.

Da notare tra le voci sul controllo della simulazione sono invece due impostazioni:

- L'opzione di flusso potenziale come condizione iniziale, che garantisce ulteriore stabilità e soprattutto velocizza la convergenza;
- La scelta di "Scotch" come algoritmo di scomposizione, perché divide nel modo più bilanciato ed efficiente possibile il dominio computazionale in più sottodomini, che possono poi essere elaborati in parallelo (su più core o processori).

Nella sezione riguardante il controllo dei risultati è stato indicato al programma di calcolare i coefficienti di lift e drag sul profilo alare.

Inoltre si è specificato di rilevare i dati su tutta l'ala e di calcolare i campi di pressione e turbolenza.

4.2.3 Mesh

Il Mesh è lo "scheletro" su cui si basa tutta la simulazione CFD.

Quando si simula il comportamento di un fluido non si può calcolare esattamente cosa succede in ogni punto infinitesimo dello spazio, ed è per questo che il dominio fluido oggetto dello studio viene diviso in milioni di piccoli elementi (celle), su cui si risolvono le equazioni di Navier-Stokes mediate con Reynolds.

Più la griglia mesh è fine (ossia si hanno tante piccole celle vicine tra loro) più la simulazione sarà precisa; ovviamente ciò richiederà anche più tempo e potenza di calcolo.

Per quanto riguarda la griglia di entrambe le simulazioni, si è scelto come algoritmo quello standard, in quanto permetteva un grado di finezza maggiore rispetto agli altri.

Esso presentava anche una scala di precisione da 1 a 10 (con 1 "molto grossolano" e 10 "molto preciso") che ha permesso di effettuare diverse iterazioni per individuare il valore più elevato possibile in termini di accuratezza, senza però superare i limiti computazionali che avrebbero impedito l'esecuzione della simulazione.

Per il volume di fluido è stato indicato come grado di finezza quello di 8/10.

Per avere poi dei riscontri il più precisi possibile è stata creata un secondo volume all'interno del primo, con le seguenti dimensioni:

- Dal centro dell'alettone fino a 1,5 volte la sua dimensione in larghezza;
- Dalla sua base fino a 2 volte la sua altezza;
- Da 1,5 volte la sua apertura alare prima che il fluido lo investisse fino a 3 volte la stessa dopo.

In questa box la finezza raggiungeva i 9/10, proprio perché al suo interno si aveva la zona cruciale di tutto il dominio (quella più vicino al profilo).

Infatti si nota la differenza di densità di celle lontano dall'ala e nella regione più vicina ad essa.

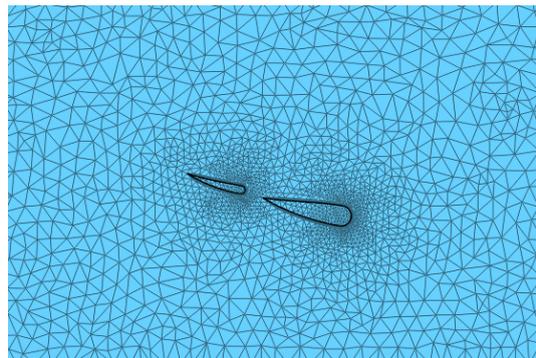


Figura 4.5: Mesh dalla simulazione CFD, che aumenta di finezza con l'avvicinarsi all'ala

Questo procedimento grazie al quale si incrementava la precisione è stato applicato anche direttamente sulla superficie dell'ala stessa.

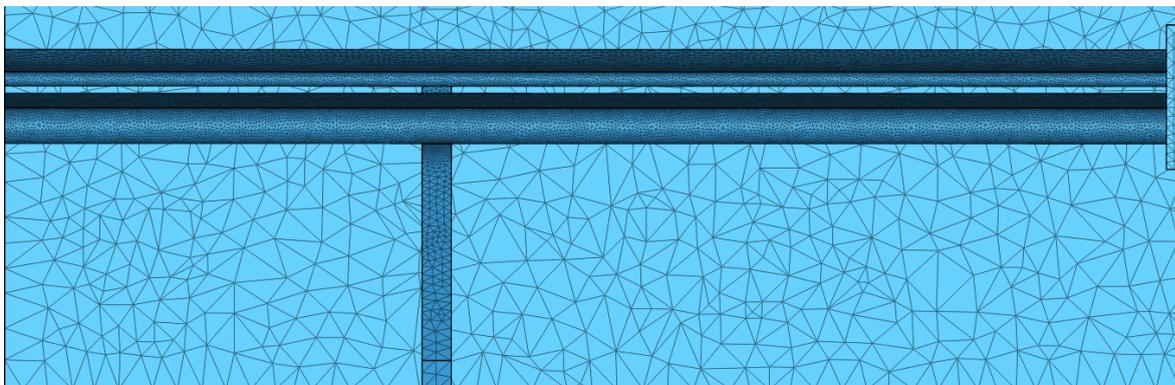


Figura 4.6: Griglia sull'ala con la finezza massima dalla simulazione CFD

Sul profilo la griglia ha la massima densità di celle, che sono anche ovviamente di minime dimensioni.

Come ultima parte del mesh si ha anche lo sviluppo dello strato limite, è stato calcolato un primo valore del suo spessore sulla base del quale è stato poi sviluppato dal programma.

Si è partiti dal calcolo del numero di Reynolds locale dato da:

$$Re_L = \frac{vL}{\nu} = 1,67 \times 10^7, \quad (4.1)$$

basato sulla velocità espressa in m/s , una lunghezza di corda L pari a 45 cm , la viscosità cinematica pari a $\nu = 1,5 \times 10^{-5} m^2/s$ in condizioni di pressione e temperatura standard.

Successivamente si è passati allo spessore, ricavato tramite una classica correlazione turbolenta come:

$$\delta(L) = 0,38 \times \frac{L}{Re_L^{0,2}} \approx 6,15\text{ mm}. \quad (4.2)$$

4.3 Analisi risultati

Una volta terminata la griglia mesh e dopo aver verificato che rispettasse gli standard di precisione e ortogonalità, senza i quali o non funzionerebbe o darebbe risultati falsati, sono state avviate le simulazioni con il codice SimScale (<https://www.simscale.com/>).

4.3.1 Ala a singolo elemento

Innanzitutto si sono verificati i valori dei coefficienti di lift e di drag. Per quanto riguarda questa specifica si è ottenuto il seguente grafico:

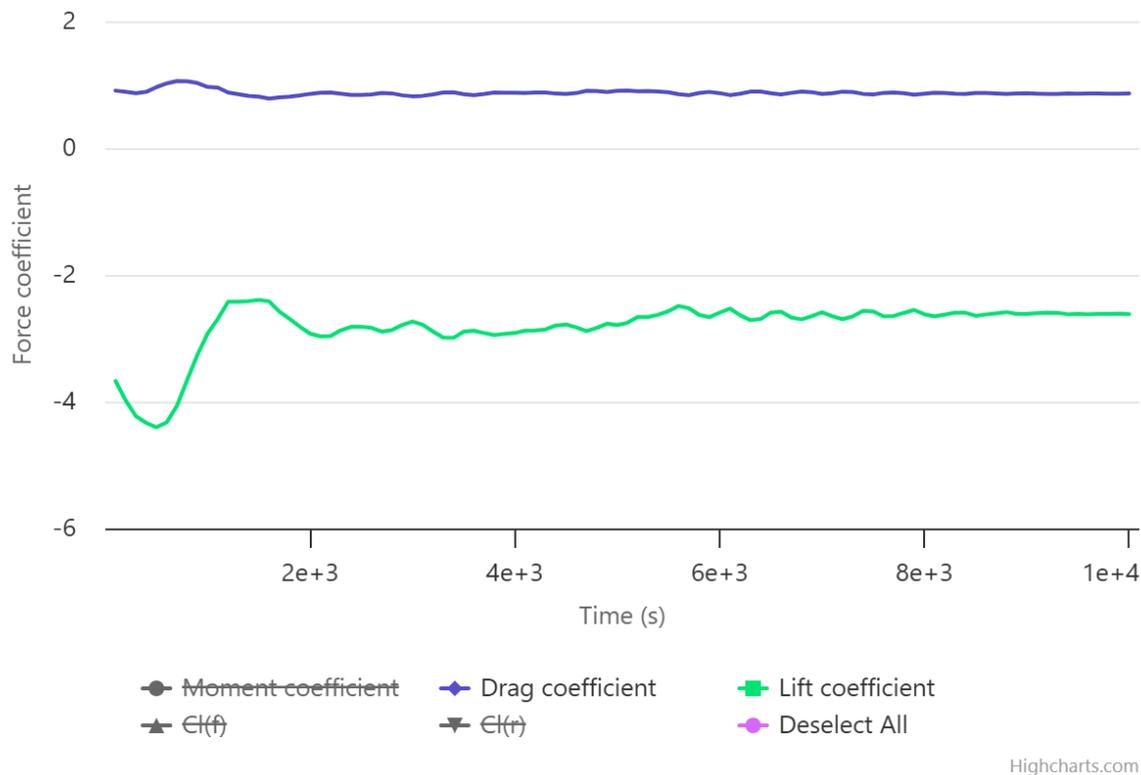


Figura 4.7: Diagramma dei coefficienti di lift e drag del profilo monoelemento

In cui si è riscontrato un $C_L = -2,61$ e un $C_D = 0,86$, che corrispondono ad un'efficienza pari a $\epsilon = \frac{|C_L|}{C_D} = 3,03$.

Questi valori risultano coerenti con una specifica ad alto carico, ma l'efficienza globale risulta non eccelsa e la ragione si capirà dalle distribuzioni di velocità.

Infatti per un profilo a singolo elemento l'angolo di attacco di -10° risulta essere molto alto e ha come diretta conseguenza una forte separazione dello strato limite.

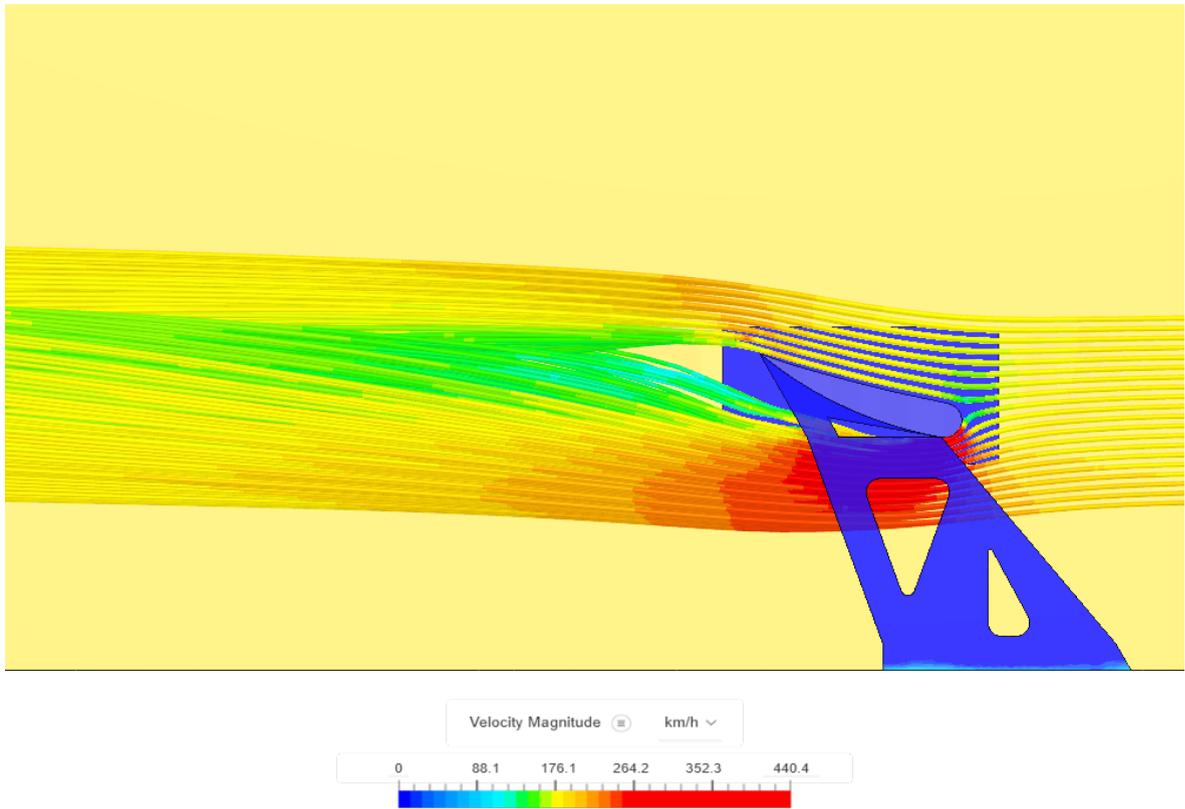


Figura 4.8: Visualizzazione delle linee di flusso nel profilo a singolo elemento

Se nel pressure side vediamo che le linee di corrente seguono regolarmente il profilo, si nota invece come nelle immediate vicinanze della zona di stallo (in rosso) facciano più fatica a ricongiungersi, andando a creare una zona di distacco importante. Gli effetti dell'elevata incidenza si notano anche molto bene sul piano di rappresentazione dell'energia cinetica turbolenta, mostrata nella figura 4.9.

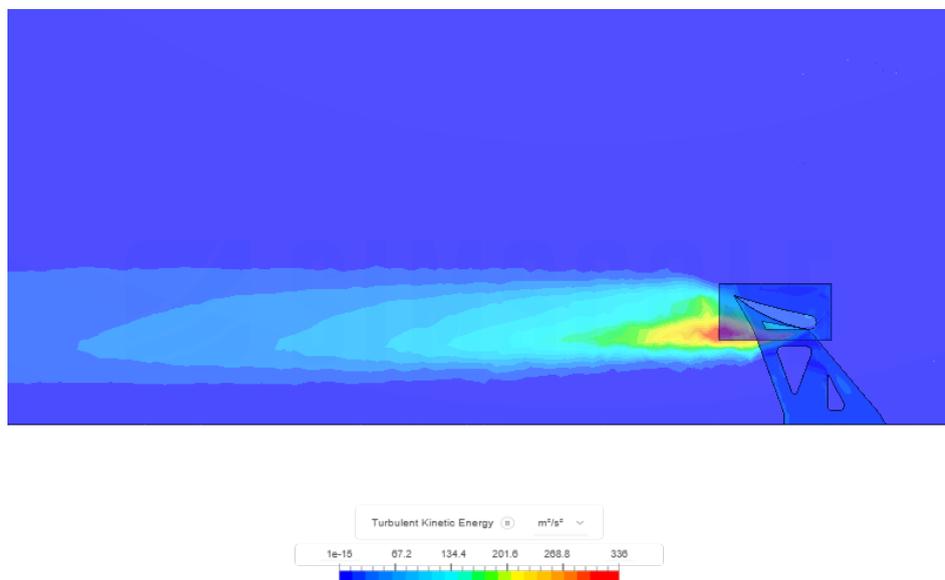


Figura 4.9: Intensità della turbolenza nella scia del profilo monoelemento

Anche qui, come si nota nella scala subito sotto, più il colore tende verso il rosso più il valore sarà elevato, di conseguenza si avrà una turbolenza maggiore.

Infine si hanno le distribuzioni di pressione sulla parte anteriore e posteriore, che risultano regolari e tipiche dei profili alari.

Si nota la linea principale sulla quale avviene lo stallo in cui è massima (in rosso), per poi dividersi in pressure e suction side.

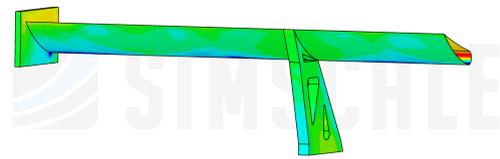
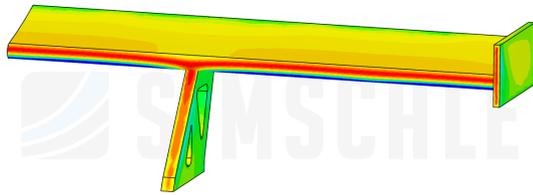
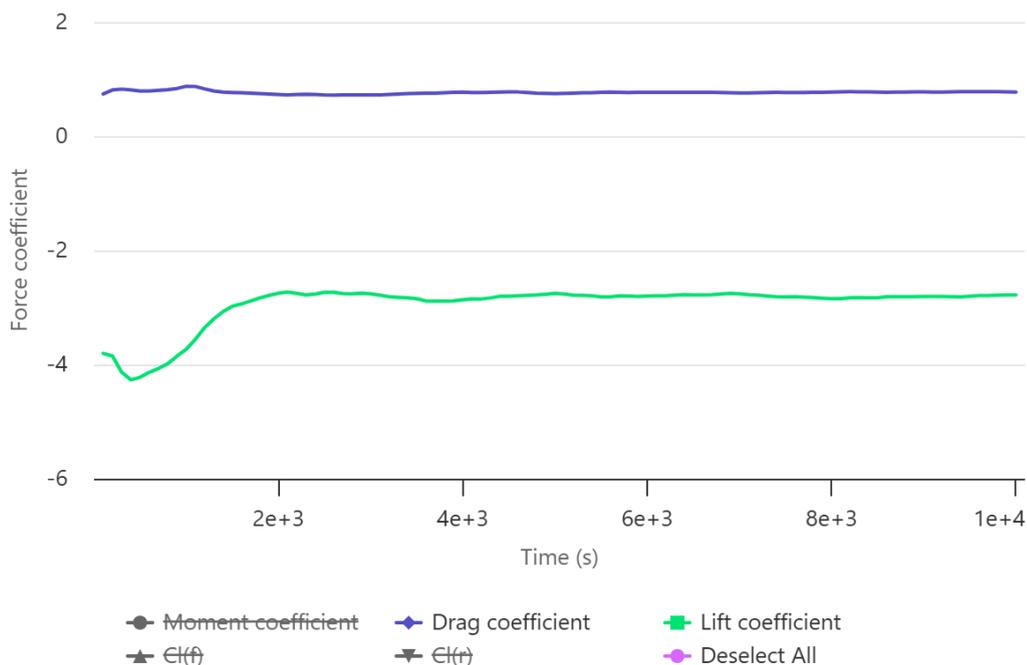


Figura 4.10: Distribuzione di pressione sulla parte anteriore dell'ala

Figura 4.11: Distribuzione di pressione sulla parte posteriore dell'ala

4.3.2 Ala a 2 flap

Per quanto riguarda il profilo multi-elemento invece si è arrivati ai seguenti coefficienti di lift e drag:



Highcharts.com

Figura 4.12: Diagramma dei coefficienti di lift e drag del profilo multi-elemento

Si è riscontrato un $C_L = -2,78$ e un $C_D = 0,77$, che corrispondono ad un'efficienza pari a $\epsilon = \frac{|C_L|}{C_D} = 3,61$.

Anche questi valori sono coerenti con un'ala da vettura GT ad elevato carico aerodinamico. Andando poi ad osservare le streamlines è possibile notare come effettivamente i profili a più elementi garantiscano una migliore gestione dei flussi.

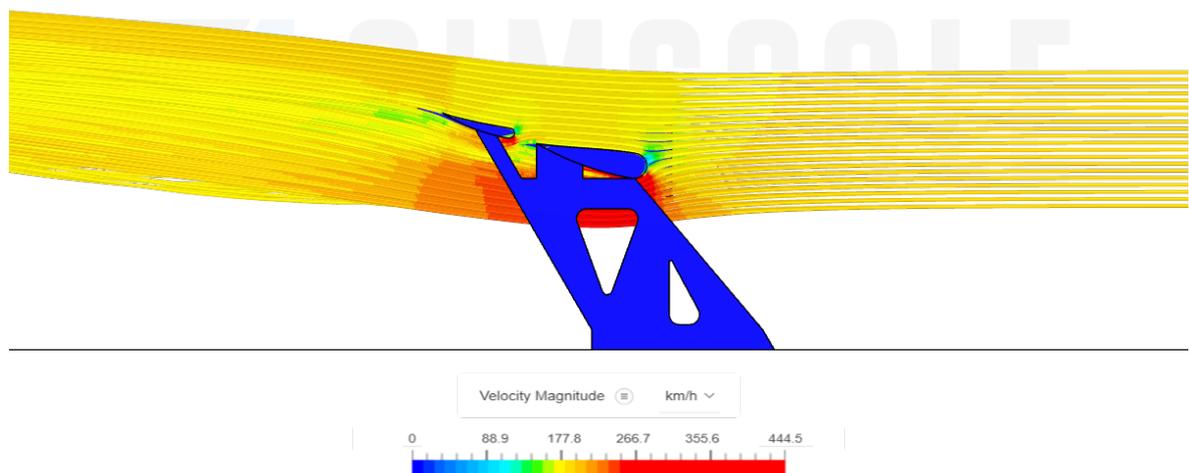


Figura 4.13: Visualizzazione delle linee di flusso nel profilo a più flap

Seppur lo *slot* tra i due flap sia di dimensioni contenute, riesce comunque a fare la differenza.

Infatti esso crea un gradiente di pressione favorevole che aiuta a mantenere il flusso attaccato sul dorso del secondo elemento.

In particolare permette al flusso ad alta energia della parte inferiore dell'ala di "passare" nella parte superiore dell'elemento successivo.

Così facendo energizza lo strato limite e ritarda il distacco.

Questo porta ovviamente a minori turbolenze nella scia, come evidenziato in figura 4.14.

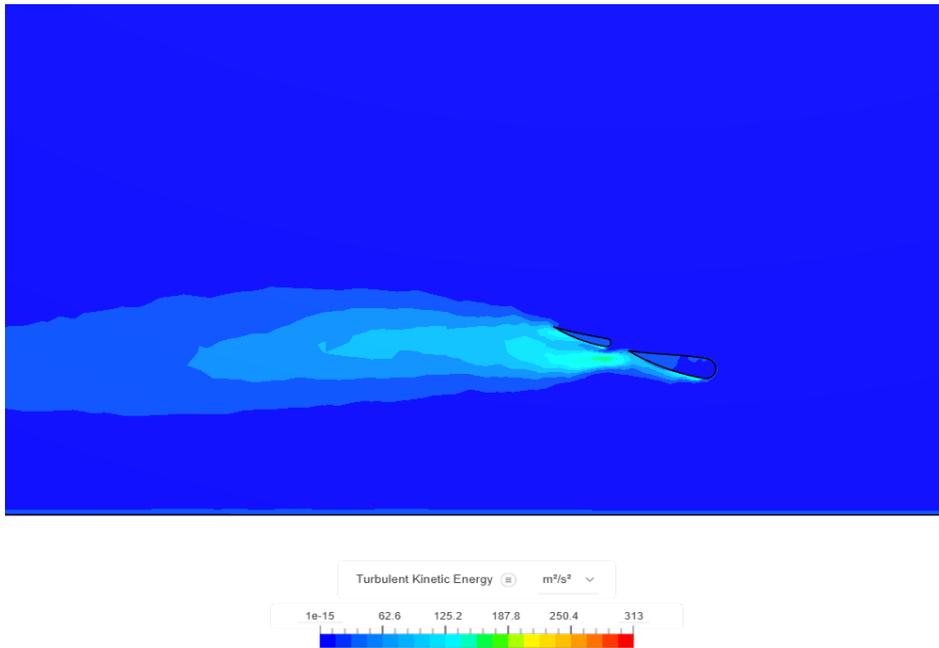


Figura 4.14: Intensità della turbolenza nella scia del profilo multi-elemento

Infine vediamo come la pressione sul profilo sia di nuovo regolare, a verifica della bontà di quanto simulato.

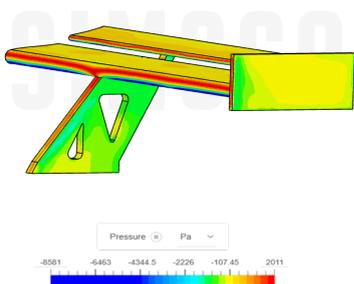


Figura 4.15: Distribuzione di pressione sulla parte anteriore dell'ala

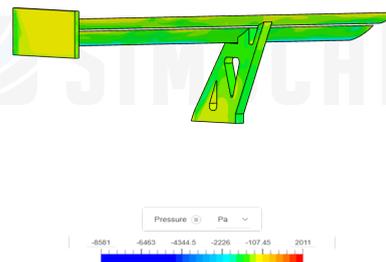


Figura 4.16: Distribuzione di pressione sulla parte posteriore dell'ala

4.3.3 Confronto

Alla luce dei dati rilevati possiamo osservare diverse caratteristiche dei tipi di ala studiati.

Innanzitutto abbiamo visto come tra i due profili quello costituito da più flap abbia sia un coefficiente di lift maggiore in modulo, sia un coefficiente di drag minore.

Questo ovviamente porta ad un'efficienza che risulta maggiore.

Gli alettoni posteriori delle categorie GT solitamente hanno questo valore compreso in un intervallo tra 2 e 4; quindi i risultati ottenuti sono verificati e accettabili.

Inoltre seppur la differenza tra l'efficienza della prima (3,03) e quella della seconda (3,61) sembri limitata, in realtà se si valuta in termini percentuali è un incremento del 19 %.

Questa differenza è notevole, sarebbe impossibile guadagnare uno step prestazionale del genere solo ottimizzando la prima specifica.

Risulterebbe quindi ovvio adottare sempre una tipo di ala del secondo tipo, ma la conformazione dell'ala stessa nelle competizioni è determinata dal regolamento.

Rimane però valido il principio che se si realizza un prototipo e lo si vuole estremizzare in termini di performance, sicuramente l'ala posteriore sarà a più flap.

Come abbiamo ampiamente già visto questo delta di efficienza è sostanzialmente tutto dovuto al distacco della vena fluida.

L'angolo di attacco così elevato era stato scelto a priori proprio per sottolineare questo aspetto.

Per avere un riferimento diretto i grafici dell'energia cinetica sono stati catturati nella figura sottostante con una scala praticamente coincidente.

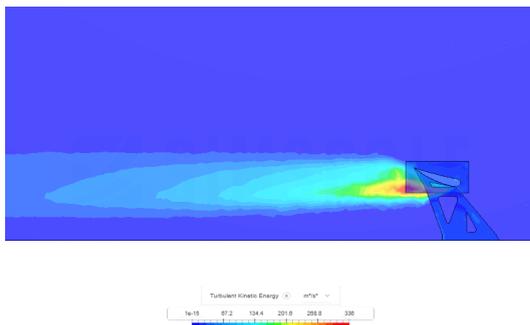


Figura 4.17: Turbolenza prima specifica

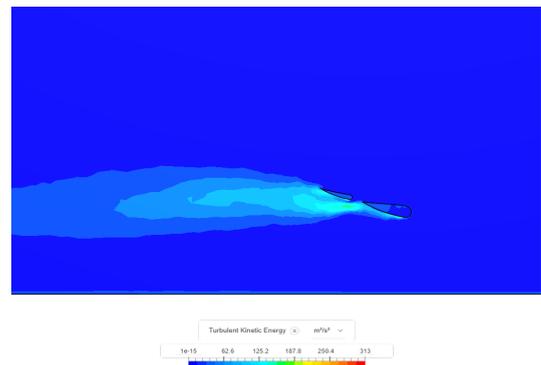


Figura 4.18: Turbolenza seconda specifica

Un altro elemento da considerare è che sono state omesse le rugosità delle superfici coinvolte, visto che il programma "sopprimeva" le feature sotto il quarto ordine di grandezza (mentre la rugosità è circa al sesto ordine di grandezza).

Comunque è valso per entrambe, quindi nel confronto i risultati sono accettabili.

Resta anche il fatto che questi profili siano stati valutati in condizioni ideali del flusso.

Come vedremo in realtà il flusso in entrata non è sempre pulito, anzi bisogna studiare accuratamente le mutue interazioni tra i componenti della vettura per ottimizzare i singoli componenti.

Ma anche in questo caso rimane il fatto che, se messa in condizione di lavorare, la specifica a più flap risulti migliore.

5 Studio pratico e ingegneria dei Materiali

Una disciplina che sempre più affianca l'aerodinamica è l'ingegneria dei materiali. Questo perché nei veicoli con elevate prestazioni, indipendentemente dalla categoria in cui si corre, si cerca sempre di più di limare ogni dettaglio possibile.

Abbiamo visto che generalmente un profilo alare con minor angolo di attacco e deflessione ha come diretta conseguenza una riduzione del drag.

Per questo converrebbe avere un'ala con più incidenza, quindi in grado di generare più carico, in tutte le curve (dove la velocità è minore); mentre quando si viaggia su un rettilineo si vorrebbe un'ala con il minor drag possibile per massimizzare le velocità di punta.

Ma ovviamente quando una vettura è in moto si monta un solo profilo alare, ed è proprio qui che entra in gioco lo studio sui materiali.

Infatti grazie alle proprietà soprattutto del carbonio si cerca di disporre le "strisce" in modo da avere un profilo che garantisca la tenuta e la sua regolare posizione a basse velocità; ma che a tempo stesso vada man mano ad appiattirsi di pari passo con l'aumentare della velocità.

Ciò garantisce un vantaggio in termini di prestazioni, che in formula 1 era stato quantificato tra uno e due decimi, e seppur non sembri enorme nella massima categoria del motorsport in cui spesso i distacchi sono nell'ordine dei centesimi (se non millesimi) di secondo, può comunque fare la differenza.

Se si aggiunge poi che le gare hanno una durata considerevole ciò viene ulteriormente amplificato, perché si ha una grande quantità di giri per cui si può sfruttare questo tempo "risparmiato".



Figura 5.1: Differenza nell'incidenza dell'ala anteriore sulla Mercedes F1 di Russel nel gran premio del Canada 2024, figura tratta da [7]

Nella figura 5.1 si vede un esempio pratico dell'applicazione di questo concetto sulla Mercedes F1.

La foto a sinistra è stata fatta in rettilineo, nel particolare si vede come le due parti dell'ala anteriore siano allineate.

Mentre a destra invece si è a velocità ridotta e guardando il focus si vede come l'ala sia tornata nella sua posizione originale, creando quello "scalino" tra le due linee gialle di riferimento.

5.1 Processo di studio ed ottimizzazione

Come abbiamo già visto ampiamente, riuscire a massimizzare l'efficienza aerodinamica è uno degli obiettivi principali per estremizzare il più possibile le prestazioni di una vettura.

Questo processo è però caratterizzato da diverse procedure iterative data la sua complessità: innanzitutto si studiano i singoli elementi e si cerca di portarli al loro limite di efficienza, principalmente grazie ai calcoli CFD sui software.

Successivamente, sempre tramite i software, si valutano le interazioni che essi hanno con il resto degli elementi e con la vettura stessa per avere un primo riscontro "effettivo".

Questa è anche la fase più critica: riuscire a integrare tra loro queste componenti in modo che riescano a lavorare "insieme" e si ottenga un guadagno di efficienza globale.

Questo perché quando si vanno a ottimizzare i diversi elementi si presuppone inizialmente che il flusso in ingresso sia "pulito", senza turbolenze.

Nella realtà però non è così e l'interazione tra tutte le diverse parti quali il corpo vettura e le appendici aerodinamiche porta a considerevoli variazioni nella distribuzione dei flussi, per questo si apportano una serie di modifiche su un primo prototipo realizzato in scala sul quale si eseguono dei test in galleria del vento.

Lo studio in galleria del vento si è fortemente evoluto negli anni, infatti se inizialmente si utilizzavano quelle dell'industria aerospaziale, si capì ben presto che alcuni fenomeni quali lo scorrimento del pavimento e le ruote in movimento erano fenomeni che influenzavano fortemente il risultato finale.

Oggi nei massimi livelli del motorsport le gallerie hanno raggiunto livelli di complessità e di costo enormi, ma proprio questo dimostra quanto esse siano importanti per la ricerca e lo sviluppo dell'aerodinamica.

L'ultima fase di questo processo è poi la verifica della "bontà" delle correlazioni tra i dati rilevati nei test e la pista.

Attualmente si adottano due metodi differenti, che prevedono l'utilizzo dei tubi di Pitot e della flow-viz.

Il primo è un approccio quantitativo, che consiste nell'applicare nella zona in cui interessa studiare il flusso una griglia di questi misuratori di pressione, per mappare tra le diverse quantità soprattutto velocità e direzione del flusso.

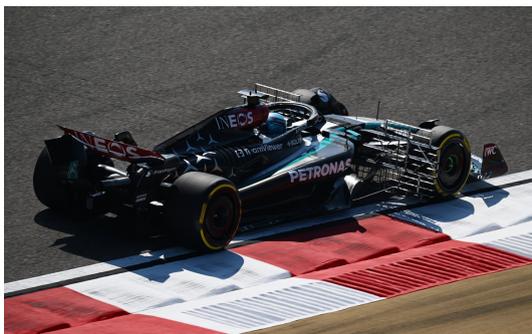


Figura 5.2: Mercedes F1 di Russel con tubi di Pitot, figura tratta da [3]

Nella foto in questione si nota come gli strumenti siano posizionati all'altezza delle sospensioni, dietro ala e ruote anteriori, per studiare i flussi d'aria che arrivano agli inlet del fondo e che quindi interessano i canali Venturi, insieme anche al flusso che arriva nelle pance e serve per il raffreddamento.

Invece l'utilizzo della flow-viz è più qualitativo; spesso si utilizza una vernice fluorescente per studiare visivamente il comportamento dei flussi d'aria sulla superficie della vettura; se ne applica una determinata quantità prima che la vettura inizi a girare per ottenere poi una precisa indicazione sulle zone di moto laminare, turbolento e di separazione.



Figura 5.3: Visualizzazione del flusso sulla Toro Rosso del 2019

In questo esempio pratico la vernice è stata posizionata sul bordo delle pance e sul "marciapiede" del fondo per andare a controllare l'evoluzione dei flussi, che si ricongiungono poi nella parte posteriore dove vengono convogliati sull'ala, alla quale devono arrivare il più "puliti" possibile per poter estrarre la massima performance dalla stessa.

Riferimenti bibliografici

- [1] Joseph Katz. Aerodynamics of race cars. *The Annual Review of Fluid Mechanics*, 2016.
- [2] Wolf-Heinrich Hucho (Editor). *Aerodynamics of Road Vehicles, Fourth Edition*. SAE International, 1998.
- [3] Sky italia. Test in bahrain 2024. *Sky sport F1*, 2024.
- [4] Gianluca Covini. Aerodinamica dei veicoli terrestri, terza parte. *AUTOtecnica.org*, 2017.
- [5] Sky italia. Novità ferrari al gp bahrain. *Sky sport F1*, 2025.
- [6] Matt Somerfield e Jonathan Noble. McLaren brings new f1 front wing to further lift low-speed gains. *Autosport.com*, 2024.
- [7] Zander Arcari. Td ali flessibili 2025: nuova prova di presunzione della fia. *funoanalisitecnica.com*, 2025.
- [8] Joseph Katz. Aerodynamics in motorsports. *Journal of Sports Engineering and Technology*, 2021.
- [9] Paolo Luchini and Alessandro Bottaro. Adjoint equations in stability analysis. *The Annual Review of Fluid Mechanics*, 46(1):493–517, 2014.
- [10] Thomas Schuetz. *Aerodynamics of Road Vehicles, Fifth Edition*. SAE International, 2016.
- [11] Temistocle Petridi. Formula 1 aero insights pt.2: Single vs multi-element rear wings. *Nablaflow.io*, 2024.
- [12] Antonio Spina. Aerodinamica: vorticità e strato limite. *F1INGENERALE.com*, 2023.
- [13] Ferdinando Caprilli. Teoria dell'ala. *ferdinandocaprilli.it*, 2024.
- [14] Ennio Mattioli. *Aerodinamica, seconda edizione*. Levrotto Bella, 1989.
- [15] Simon Durrer. *Aerodynamics of Race Car Wings: A CFD Study*. PhD thesis, Grand valley state university, 2016.
- [16] William Toet. Aerodynamics and aerodynamic research in formula 1. *The aeronautical journal*, 2013.
- [17] Marco Gaggiotti. *Progettazione ala posteriore vettura Formula S.A.E.* PhD thesis, Università politecnica delle Marche, 2022.
- [18] Pietro Minazzato. *L'aerodinamica applicata alle autovetture da competizione*. PhD thesis, Università degli Studi di Padova, 2023.
- [19] Simon Mcbeath. *Competition Car Aerodynamics*. Haynes Publishing, 2006.
- [20] William Milliken. *Race Car Vehicle Dynamics*. SAE International, 1994.

Ringraziamenti

Grazie a mamma e papà per esserci sempre stati in questi anni, avermi sempre messo al primo posto in qualsiasi cosa, sono fortunato ad avere voi come genitori.

Grazie a nonna Renata per essere sempre dalla mia parte, sei la persona con il cuore più grande che io conosca, per me sarai sempre un modello e un punto di riferimento.

Grazie agli zii per essere sempre presenti e vicini a me, oltre ad avermi fatto i 4 regali più belli che potessi mai ricevere.

Grazie a Carla e Umberto, Dina e Za', Pino, Luciana per il ricordo che mi avete lasciato di voi, vi porterò sempre con me.

Grazie Jaco per tutti questi anni insieme nei quali ho sempre saputo di avere un amico come te al mio fianco, ne abbiamo combinate tante ma ce ne rimangono ancora molte di più da fare.

Grazie Filo per essere la persona che sei, un amico sempre pronto ad ascoltare e starti vicino, su cui so di poter sempre contare, ti voglio bene.

Grazie Nick per tutti questi anni e per tutti i bei momenti passati insieme, ne abbiamo ancora tanti davanti, per te ci sarò sempre.

Grazie a tutta Courmacinema per farmi sempre sentire a casa tutte le volte che sono con voi, vi voglio bene.

Grazie Trava, Mozza e Fede per essere sempre stati "noi quattro" in tutti questi anni che sono stati sempre più divertenti e leggeri grazie a voi.

Grazie Nicole e Anna per i momenti che abbiamo condiviso e per poter parlare di tutto con voi, vi voglio bene.

Grazie Edo e Matti, quando ci siamo ritrovati ormai molto tempo fa dopo un po' di anni, per me è stato subito come se fossimo sempre stati insieme, vi sono grato per questo e ne abbiamo ancora tante davanti.

Grazie Carlo per tutti i momenti passati insieme, sono stato fortunato ad incontrarti e anche noi ne abbiamo ancora tante da fare.

Grazie Giu per essere sempre la stessa amica a cui posso raccontare tutto.

Grazie Laura, Chiara, Elena, Giulia, Tommi, Edo perché ogni volta che sono con voi è ancora come se fosse uno dei tanti giorni in cui ci vedevamo quotidianamente.

Grazie Zioperapia per aver reso questi tre anni di lezioni ed esami mai banali.

Grazie al professor Bottaro e al Dottor Natali per questa possibilità che mi è stata data e che spero di aver onorato.

