

# POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale**

Tesi di Laurea

## **Evoluzione storica di velatura posteriore per monoposto da corsa**



### **Relatori**

Ing. Stefania Scarsoglio  
Prof. Renzo Arina

### **Candidato**

Luigi de Martino Norante

Luglio 2015



## **Sommario**

Lo scopo di questa dissertazione consiste nell'evidenziare i principali cambiamenti nell'architettura e nella geometria delle ali posteriori di vetture da corsa, ed in particolare in Formula Uno, motivandone le scelte progettuali e giustificando le considerazioni fatte a riguardo sulla base delle scienze fluidodinamiche.

A tal proposito si è ritenuto opportuno accennare nel primo capitolo ai principali criteri che hanno condizionato negli anni l'architettura della monoposto completa, valutando il comportamento sommario del flusso per la vettura e per i suoi componenti specifici. Opportuni riferimenti bibliografici permettono di esaurire la curiosità del lettore.

Il secondo capitolo costituisce il nucleo centrale della dissertazione, in cui particolare attenzione non è stata posta alle sole modifiche dell'alettone posteriore, bensì anche alle sue interazioni col campo di moto dei fluidi che investono la monoposto. Pertanto, è sembrato adeguato citare alcuni dei dispositivi che possono influenzare significativamente il comportamento dell'ala, con dovuta attenzione a quelli più innovativi degli ultimi anni che hanno fatto la loro comparsa in Formula Uno.

Infine, un esercizio applicativo sul primo caso d'interesse di ala posteriore nel mondo delle corse ha permesso considerazioni quanto più giustificate in merito alla differenza di comportamento tra profilo alare e ala completa, con opportune conclusioni a riguardo dell'ottimizzazione dell'ala stessa e delle limitazioni dell'analisi effettuata.

## INDICE

<b>Sommario</b> .....	I
<b>Lista dei simboli</b> .....	III
<b>Ringraziamenti</b> .....	IV
<b>Capitolo 1</b>	
1. Aerodinamica delle monoposto da corsa.....	1
1.1. Definizione dei parametri aerodinamici in campo <i>automotive</i> .....	1
1.2. Aerodinamica base della monoposto completa.....	2
1.2.1. Dimensioni che influenzano l'aerodinamica del telaio.....	5
1.2.2. Gli pneumatici.....	7
1.2.3. Generatori di vortici.....	9
1.2.4. Flusso interno.....	10
1.2.5. Ali ed alettone anteriore.....	12
1.3. Aerodinamica dell'alettone posteriore.....	14
<b>Capitolo 2</b>	
2. Evoluzione storica dell'alettone posteriore.....	17
2.1. Prime comparse su vetture da corsa (la Chaparral del 1966).....	17
2.2. Alettoni posteriori in Formula Uno.....	20
2.3. Dispositivi che influenzano il flusso intorno all'alettone.....	29
2.3.1. Il Fan.....	29
2.3.2. Il diffusore e il doppio diffusore Brawn.....	30
2.3.3. L'F-Duct.....	33
2.3.4. Il DRS e il DDRS.....	35
2.3.5. Il Monkey seat.....	38
<b>Capitolo 3</b>	
3. Analisi di profilo e di ala rettangolare derivata della Chaparral 2E.....	39
3.1. Il metodo dei pannelli, XFoil e XFLR5.....	39
3.2. Risultati dell'analisi.....	41
3.2.1. Analisi bidimensionale di NACA 0009.....	42
3.2.2. Analisi dell'alettone posteriore della Chaparral 2E.....	44
3.3. Conclusioni.....	48
<b>Riferimenti bibliografici</b> .....	51

## Lista dei simboli

$C_l$ : coefficiente di portanza per profilo isolato o per vettura completa	$l$ : lunghezza della corda
$C_d$ : coefficiente di resistenza per profilo isolato o per vettura completa	$\alpha_a$ : incidenza aerodinamica
$C_y$ : coefficiente di forza laterale o <i>side force</i> per profilo isoalto o per vettura completa	$\alpha_i$ : incidenza indotta
$L$ : portanza	$\lambda$ : allungamento alare o <i>aspect ratio</i>
$D$ : resistenza	$\alpha$ : incidenza
$Y$ : forza laterale o <i>side force</i>	
$\rho$ : densità del fluido	
$V_\infty$ : velocità del fluido indisturbato	
$S$ : sezione di riferimento	
$C_z$ : cfr. $C_l$	
$C_x$ : cfr. $C_d$	
$Re$ : numero di Reynolds	
$p$ : pressione	
$D_i$ : resistenza indotta	
$w$ : velocità indotta dai vortici di estremità	
$\Gamma$ : circuitazione	
$Re_{\delta^*}$ : numero di Reynolds con riferimento allo spessore di spostamento di strato limite	
$U_e$ : velocità esterna allo strato limite	
$\nu$ : viscosità cinematica del fluido	
$\delta^*$ : spessore di spostamento strato limite	
$C_L$ : coefficiente di portanza dell'ala	
$C_D$ : coefficiente di resistenza dell'ala	
$\phi_P$ : potenziale inviscido nel punto P	
$\sigma_P$ : intensità di sorgente nel punto P	
$k$ : fattore correttivo di pendenza di $C_L$	



## *Ringraziamenti*

*Per il materiale fornito e i consigli dati,  
al fine di redigere questa dissertazione,  
si ringrazia in particolare Willem Toet.*

## 1. Aerodinamica delle monoposto da corsa

### 1.1 Definizione dei parametri aerodinamici in campo *automotive*

In campo aeronautico, nel perseguire gli obiettivi delle stime delle forze in gioco che permettono al velivolo un volo sicuro, si è soliti far riferimento ad una normalizzazione delle grandezze fisiche considerate, in accordo con le scienze fluidodinamiche. Questo deriva dal fatto che sia necessario avere un'opportuna correlazione in fase di avamprogetto o durante la procedura *trial and error* in sede di simulazione aerodinamica del comportamento delle superfici che caratterizzano il velivolo, nella fattispecie in galleria del vento. Allo stesso modo tale normalizzazione viene operata in campo automobilistico, dato che col passare degli anni e in particolare dopo la Seconda guerra mondiale, si è cominciato a concepire il progetto delle auto da corsa e successivamente delle autovetture anche dal punto di vista aerodinamico. Le sperimentazioni in galleria del vento con modelli in scala hanno richiesto una sempre maggiore correlazione con i risultati reali, e una costanza della risposta aerodinamica alla variazione delle condizioni esterne. Per queste ragioni nella valutazione delle performance dell'auto si fa riferimento in genere ai coefficienti di portanza (1) e resistenza (2), definiti come segue:

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 S} \quad (1)$$

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 S} \quad (2)$$

$$C_y = \frac{Y}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 S} \quad (3)$$

dove S è solitamente definita in automobilismo come l'area frontale proiettata su piano della vettura o, nel caso si faccia riferimento alle ali isolate (come si farà in riferimento alle figure dedicate e nell'analisi contenuta nel capitolo terzo), come la superficie alare in pianta; L è la portanza generata, D la resistenza aerodinamica al moto,  $\rho$  la densità del fluido che compone la corrente aerodinamica e  $V_\infty$  la sua velocità nella condizione di monte supposta indisturbata. Oltre a questi due parametri occorre menzionare anche il coefficiente di forza laterale (Y) o *side force* (3), che sarebbe opportuno tener in considerazione in caso di forte vento laterale o durante le situazioni di sorpasso, coefficiente che durante la trattazione trascureremo. Per completezza è opportuno

## 1. Aerodinamica delle monoposto da corsa

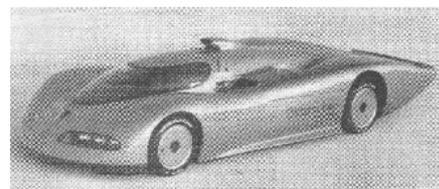
ricordare che questi coefficienti possono essere anche definiti rispettivamente come  $C_z$ ,  $C_x$  e  $C_y$  secondo il tipico orientamento della terna cartesiana sul veicolo (cfr. Ref. [1]). Bisogna inoltre considerare che, poiché l'obiettivo basilare dell'automobilismo è garantire quanta maggior *downforce* (portanza negativa) possibile in modo da incrementare l'aderenza degli pneumatici al terreno, così da poter aumentare la potenza e la coppia generata sugli assi senza slittare, solitamente tutti i grafici relativi alle variazioni del  $C_l$  (come per il coefficiente di pressione totale  $C_p$  definito analogamente con la variazione di pressione statica a numeratore) avranno l'asse delle ordinate diretto verso l'alto secondo il verso negativo.

Definire un intervallo di variazione per tali coefficienti è tanto complicato quanto insignificante poiché spesso i progettisti di macchine da corsa si riferiscono a propri coefficienti rispetto a delle specifiche aree di riferimento e soprattutto la valutazione degli stessi coefficienti può essere sensibilmente variabile in base ai metodi di misurazione utilizzati. Tuttavia, basandoci su quanto delineato da Katz (Ref. [1]), per macchine da corsa prototipo possiamo stimare dei valori massimi (in valore assoluto) del  $C_l$  intorno a -3.00/-4.00 e del  $C_d$  pari a 0.75, valore che può essere anche superiore per le *open-wheel race cars* per via della resistenza generata dalle ruote scoperte, con un contributo che può variare da 0.2 a 0.5.

Poiché l'obiettivo generale della trattazione è lo studio del comportamento aerodinamico dell'alettone posteriore nelle monoposto da corsa (e in particolare in Formula Uno), prima di focalizzarci su di esso occorre valutare le prestazioni aerodinamiche della monoposto nel suo insieme con un breve cenno al ruolo svolto dagli altri componenti.

### 1.2 Aerodinamica base della monoposto completa

L'obiettivo del progettista per una monoposto da corsa è garantire il massimo carico alla vettura data l'incidenza dello stesso nelle prestazioni sui tratti curvilinei del tracciato; questo differisce dall'obiettivo di vetture da record di velocità, dove predominante è la richiesta di una bassa resistenza, che si traduce in una forma del corpo vettura (studiata da Morelli, come cita Katz in Ref. [1]) che segue le linee di corrente del flusso

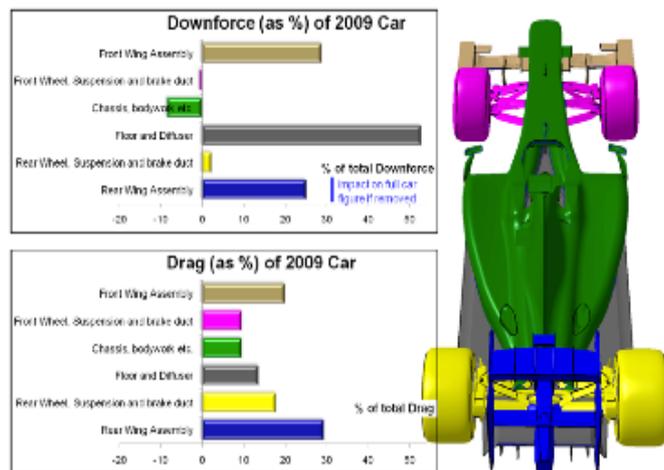


**Fig. 1** Oldsmobile Aerotech Aurora V-8, 1992, Ref. [1]

## 1.2 Aerodinamica base della monoposto completa

senza che queste separino (*streamlined body*) come può essere ad esempio la Fig. 1, dove si possono raggiungere anche  $C_d$  inferiori a 0.1.

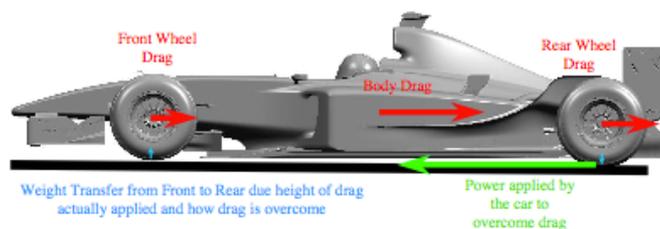
Tuttavia non tutte le superfici di una monoposto da corsa contribuiscono singolarmente a generare deportanza (Fig. 2), se queste fossero prese isolate. Ad esempio, la sospensione anteriore è tipicamente portante, come anche il telaio della monoposto.



**Fig. 2** Contributo dei componenti in percentuale di  $L$  e  $D$ , Ref. [6]

Comunque, come riporta Willem Toet (cfr. Ref. [6]), seppur fosse possibile ridurre l'effetto portante della sospensione anteriore, questa in tal modo influenzerebbe il flusso cosicché il contributo totale sulla vettura consisterebbe in una perdita di deportanza.

Per quanto riguarda la resistenza e la sua natura per le monoposto di Formula Uno, questa differisce dal caso aeronautico in cui metà di questa è dovuta agli effetti viscosi di strato limite e metà è indotta dalla portanza: infatti il contributo della resistenza di forma e indotta è pari al 90% della totale (cfr. Ref, [6]). La resistenza viene vinta dalla coppia applicata agli pneumatici posteriori, facenti parte dell'unico asse motrice della



**Fig. 3** Forze lungo l'asse  $x$  della monoposto, Ref. [4]

vettura (Fig. 3).

Una tipica monoposto da Formula Uno degli anni 2000 arriva totalmente a generare circa 8000 N a 200 km/h di *downforce*, il cui rapporto rispetto alla resistenza totale (*lift-to-drag ratio*) è pari a tre a uno; le monoposto, grazie agli evoluti codici CFD tridimensionali, hanno un lieve margine di miglioramento con ad esempio un aumento di tale rapporto del 5% (cfr. Ref. [4]).

Per le vetture che prendiamo in esame, il *trend* degli anni 2000 ha confermato un telaio che, a parte le appendici aerodinamiche discusse in seguito, presenta una forma “a Coca-Cola”, ovvero con le pance estremamente rastremate verso il posteriore a partire dalle prese d'aria laterali tramite le quali si raffreddano i radiatori ad acqua posti in vicinanza del motore. Tale forma rispecchia quanto menzionato per le vetture prototipo, dove si ricerca un corpo vettura che permetta alle linee di corrente di seguire in modo adeguato la superficie del corpo, dato che queste tendono a seguire lo stesso in virtù dell'effetto Coanda (cfr. Ref. [3]). Questo consiste in una particolare tendenza del fluido reale a subire le variazioni dei campi di pressione in virtù della geometria del corpo considerato, cosa che può essere riassunta dall'equilibrio radiale di una particella fluida lungo la sua linea di corrente:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\rho V^2}{r} \quad (4)$$

dove  $r$  è la distanza rispetto alla circonferenza osculatrice della geometria del corpo, mentre le altre grandezze si riferiscono allo strato limite lungo questa.

Di particolare importanza, a differenza dei velivoli in condizioni a regime di crociera, è il cosiddetto *ground effect* o effetto suolo, dovuto all'interazione del flusso al di sotto della vettura in dipendenza dall'altezza della stessa rispetto al terreno, cosa che può portare ad un comportamento simile al tubo di Venturi, generando elevati carichi di deportanza con trascurabili effetti sulla resistenza totale del velivolo (cfr. paragrafo 2.2), cosa che non si può dire altrimenti per le velature.

Questo ha influenzato enormemente il telaio attuale delle monoposto che tendono a modellare la sua forma di modo che quanta più aria possibile possa essere accelerata o addirittura aspirata al di sotto della vettura: ciò ha delle conseguenze sulla progettazione di ogni componente, dal diffusore all'ala posteriore fino anche al muso dell'ala anteriore

## 1.2 Aerodinamica base della monoposto completa

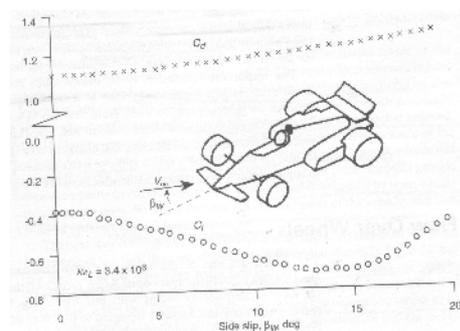
e ai gas di scarico o di raffreddamento.

### 1.2.1 Dimensioni che influenzano l'aerodinamica del telaio

A telaio fissato, tre parametri in particolare possono differenziare il comportamento dei flussi intorno al veicolo.

In primo luogo, l'angolo di incidenza rispetto all'asse longitudinale lungo la vettura (asse x secondo il già citato sistema di riferimento) sul piano x-y, altrimenti detto angolo di incidenza laterale (angolo di imbardata) o *side-slip angle*: seppur la variazione sia trascurabile ad angoli non elevati, ad angoli maggiori il flusso dalla condizione di monte indisturbata arriva sulla vettura con un'area frontale maggiore rispetto a quella presa da riferimento e soprattutto risulta più difficile mantenere la condizione attaccata a parete, per cui è maggiormente probabile la separazione della linea di corrente sia ai lati che dietro la vettura in virtù di un maggiore gradiente di pressione avverso. Se il  $C_d$  quindi subisce un continuo aumento con l'angolo, il  $C_l$  ha un comportamento diverso: ad angoli non elevati, la bolla di separazione creata a valle accelera il flusso al di sopra della vettura e genera un effetto portante, mentre ad angoli elevati la quantità di moto che ha il flusso laterale permette alle linee di corrente di ridurre la portanza del veicolo, con un'area di separazione minore nella zona posteriore della vettura. Per le monoposto in particolare, l'effetto delle ruote esposte non blocca l'aria tra le stesse e l'area frontale aumenta in misura minore rispetto alle utilitarie. Allo stesso modo il  $C_l$  risente in maniera minore dell'effetto dell'angolo di incidenza laterale, in quanto la componente di flusso laterale accelerata al di sotto della vettura permette di dare una sufficiente quantità di moto per aumentare la deportanza complessiva della monoposto (tuttavia, come sottolinea Katz in Ref.[1], la presenza di paratie laterali sull'alettone posteriore può ostacolare questa componente di flusso sull'alettone quindi ridurre la deportanza e la resistenza indotta generata, diversamente da Fig. 4).

In secondo luogo, occorre considerare l'angolo di incidenza rispetto all'asse x sul piano x-z, il

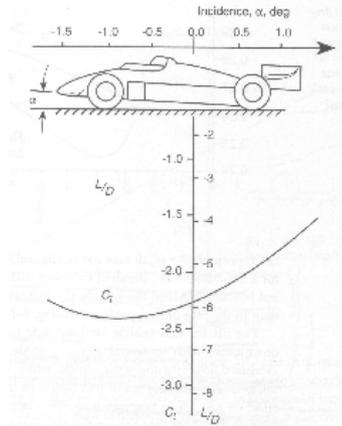


**Fig. 4** Andamento dei coefficienti per diverso angolo laterale, Ref. [1]

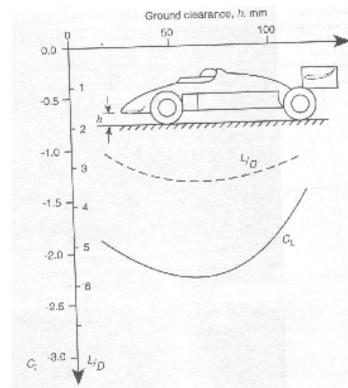
## 1. Aerodinamica delle monoposto da corsa

corrispettivo dell'angolo di beccheggio per il veicolo. Il suo effetto va considerato di pari passo col terzo parametro, ovvero l'altezza della monoposto dal terreno. Questo può avere un effetto cruciale nel valutare la stabilità longitudinale rispetto alla sensibilità al beccheggio a causa di oscillazioni indotte da una variazione sull'asse posteriore e anteriore del carico, così come richiamato nel paragrafo 2.2 in merito al *poirposing effect*. Se un disturbo causa un beccheggio negativo alla monoposto portandola a picchiare, l'altezza dell'ala anteriore dal terreno diminuisce e un effetto Venturi con gola al di sotto dell'alettone accelera il flusso indisturbato così da generare maggior carico per via dell'effetto suolo. In questo modo, questa perturbazione (cfr. Ref. [20]) rispetto al punto di equilibrio rispecchia una situazione instabile per il sistema monoposto dato che la riduzione dell'altezza da terra aumenta la deportanza e porta il veicolo a beccheggiare vistosamente fino a che, il ritorno dovuto alle sospensioni anteriori che agiscono secondo uno schema molla-smorzatore non portano la vettura a cabrare e, una volta che la deportanza dell'ala ritorni predominante, a picchiare nuovamente con oscillazioni consecutive. Incrementando l'effetto smorzante delle sospensioni e soprattutto valutando attentamente la posizione del centro di pressione della monoposto intera di modo che la maggior deportanza sia sul retrotreno, cosa che garantisce una miglior stabilità in curva e minor possibilità di sovrasterzo, è possibile ridurre il fenomeno. Tuttavia è bene ricordare che l'aumento di incidenza allo stesso modo aumenta la portanza anteriore in mancanza di un adeguato effetto

suolo, quindi la deportanza posteriore e la forza di inerzia del baricentro sopraelevato possono creare momento a cabrare rispetto al polo del contatto tra pneumatici posteriori e terreno. In conclusione comunque, è preferibile un veicolo con effetto sottosterzante naturale piuttosto che uno sovrasterzante. Per approfondimento sulla sensibilità al



**Fig. 5** Andamento dei parametri in funzione dell'incidenza, Ref. [1]



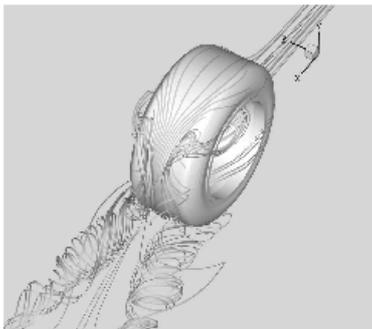
**Fig. 6** Andamento dei parametri in funzione dell'altezza da terra, Ref. [1]

## 1.2 Aerodinamica base della monoposto completa

beccheggio e la sua influenza sulle prestazioni, confrontare Ref. [4] e Ref. [1].

Per quanto riguarda l'altezza da terra, non bisogna dimenticare che seppur una ridotta altezza aumenta il  $C_1$  della vettura, esiste un limite critico oltre il quale ciò non è più valido poiché il flusso potrebbe essere unicamente nelle condizioni di strato limite con alta viscosità nella gola creatasi così da ridurre drasticamente la portata di flusso inferiore e di conseguenza l'effetto suolo. Per le monoposto da Formula Uno tale limite critico è inferiore ai 10 cm. Rispetto a quanto detto, si considerino gli andamenti di Fig. 5 e 6.

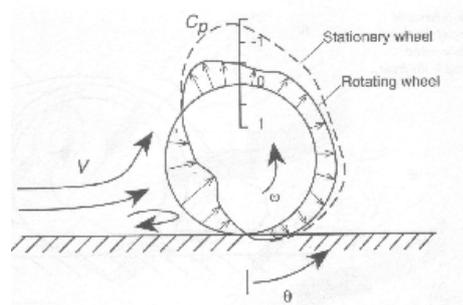
### 1.2.2 Gli pneumatici



**Fig. 7** Analisi CFD condotta da Frackel e Harvey, citata in Ref. [5]

Senza dubbio gli pneumatici sono l'elemento che influenza maggiormente l'andamento del flusso aerodinamico su una monoposto, e che inoltre hanno condizionato radicalmente le prestazioni nel corso degli ultimi anni sulla base delle mescole realizzate dal costruttore o costruttori incaricati. Considerando una ruota isolata rispetto alla vettura in condizione stazionaria, questa si comporta come un cilindro e genera, al netto delle turbolenze, una scia periodica che anche per elevati numeri di Reynolds è vicina nel suo primo modo di oscillazione alla scia di Von-Kármán (cfr. Ref. [3]). Posta in vicinanza al terreno, la ruota ha una scia ridotta in intensità seppur sia ancora presente questa larga zona di separazione (Fig. 7). La presenza del terreno e la condizione di aderenza per cui la velocità locale nel punto di contatto debba essere nulla impone un comportamento del flusso (se considerassimo il solo caso inviscido) simile a quello del cilindro rotante della trasformazione di Kutta-Zhukovsky, quindi la ruota isolata con la presenza del solo terreno ha un comportamento portante. Considerando la ruota in rotazione, ed essendo

Senza dubbio gli pneumatici sono l'elemento che influenza maggiormente l'andamento del flusso aerodinamico su una monoposto, e che inoltre hanno condizionato radicalmente le prestazioni nel corso degli ultimi anni sulla base delle mescole realizzate dal costruttore o costruttori incaricati. Considerando una ruota isolata rispetto alla vettura in condizione stazionaria, questa si comporta come un cilindro e genera, al netto delle turbolenze, una scia periodica che anche per elevati numeri di Reynolds è vicina nel suo primo modo di oscillazione alla scia di Von-Kármán



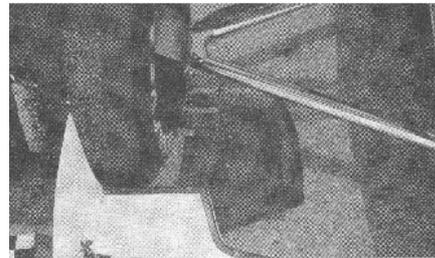
**Fig. 8** Campo di pressioni per ruota ferma e rotante, Ref. [1]

questa necessariamente in verso opposto rispetto alla velocità del flusso, il punto di separazione si sposta più a monte rispetto alla condizione stazionaria portando ad un campo di pressioni simile alla Fig. 8. Questo comportamento portante delle ruote, conseguenza del ben noto effetto Magnus, viene attenuato dalla velocità angolare controrotante che genera un campo di pressioni pressoché costante: il risultato non consiste solo in una minor portanza, ma anche in una minor resistenza. Nella zona anteriore, le ruote presentano un campo di pressioni relative positive, essendo in vicinanza del punto di arresto (*stagnation point*). Tale sovrappressione può essere sfruttata con conseguenze deportanti, montando una superficie parallela al terreno in tale area come viene fatto davanti alle ruote posteriori (cfr. Fig. 9).

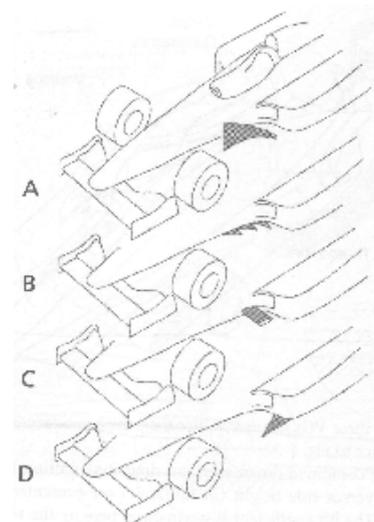
L'elevata resistenza generata dagli pneumatici può essere ridotta con l'uso di diverse superfici. In prima istanza notiamo in Fig. 11 (A) i deflettori che indirizzano la scia creata dalle ruote anteriori al di fuori della vettura, consentendo ad un fluido più pulito ad alta pressione di essere rallentato entrando nelle bocche del sistema di raffreddamento; inoltre la superficie orizzontale di attacco che regge il deflettore sperimenta al di sopra di essa una pressione maggiore rispetto a quella della zona inferiore, motivo per cui genera anche deportanza. Negli anni 2000 questi deflettori hanno assunto la forma trapezoidale rappresentata in figura che permette di generare vortici, quindi *downforce*, al limite inferiore. Per limitare la resistenza generata dalla ruota è possibile inoltre indirizzare il flusso indisturbato a valle della stessa nella sua zona di separazione, come accade



**Fig. 9** Ferrari F2012, 2012, Ref. [19]



**Fig. 10** Paratia per direzionare vortice su ala anteriore, 1993, Ref. [1]



**Fig. 11** Generatori di vortici e deflettori, Ref. [1]

## 1.2 Aerodinamica base della monoposto completa

nella superficie laterale dell'alettone anteriore di Fig. 10, che condiziona drasticamente la direzione dei larghi vortici di estremità generati dall'ala, motivo per cui furono poi vietati dalla Federazione nel 1994. Diverse funzioni aerodinamiche, bisogna ricordare, vengono svolte anche dai cerchioni che, oltre al raffreddamento del sistema frenante, possono pompare aria dalla zona inferiore del veicolo aumentando l'effetto suolo, con un funzionamento simile ai mozzi soffiati sperimentati negli ultimi anni 2012-2014 dalle scuderie, che prelevano aria dalla zona interna dello pneumatico sia per questioni di raffreddamento che per diminuire la turbolenza dello pneumatico stesso.

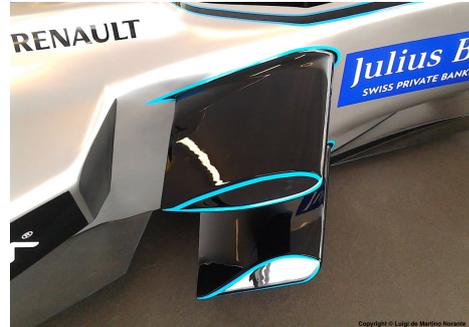
Per un approfondimento dei risultati sperimentali degli studi effettuati sull'aerodinamica degli pneumatici, si confronti Ref. [5].

### 1.2.3 Generatori di vortici

In campo aerospaziale i generatori di vortici vengono utilizzati per controllare il flusso nello strato limite sulle superfici del velivolo inducendo ove necessario la transizione da laminare a turbolento. Per queste ragioni l'altezza di questi generatori è solitamente dello stesso ordine di grandezza dello spessore di strato limite in quel punto. In campo automobilistico invece, seppur la forma sia simile, le funzioni sono differenti e lo stesso si può dire per le dimensioni. In Indy Car, dove l'altezza da terra non è fissa per tutta la zona inferiore del telaio, permettendo quindi ai progettisti di porre due canali che si comportano come tubi di Venturi, solitamente dei generatori di vortici sono posizionati al di sotto della zona anteriore della vettura. Quando l'altezza da terra è sufficientemente bassa, i vortici creati non interagiscono l'un l'altro con l'effetto di accavallarsi in quanto filamenti vorticosi (a causa delle forze reciproche descritte dalla Legge di Biot-Savart che si trasmettono, cfr. Ref. [3]), ma rimangono incanalati in sezioni longitudinali descritte dai generatori di vortici stessi. In questo modo, una caduta di pressione generata dai filetti vorticosi aumenta la deportanza ma altresì la resistenza per la vicinanza col terreno, cosa che raggiunge una condizione massima quando l'altezza è tale da rompere la struttura dei vortici stessi.

In Formula Uno questi hanno applicazione di diversa forma e natura, di cui già se ne è richiamato un esempio in merito ai deflettori trapezoidali (*bargeboard*) posti in posizione anteriore rispetto alle bocche del sistema di raffreddamento (Fig. 11 A); questi sono senza dubbio i generatori di vortici più usati tuttora in Formula Uno. Altri esempi

di generatori di vortici sono gli altri in Fig. 11 come il dente di sega (B) in cui le generazioni di deportanza e di vortici sono strettamente collegate secondo i principi di funzionamento di un'ala a delta che genera vortici lungo i suoi bordi d'attacco (cfr. Ref. [3]), oppure, come nel caso C, i vortici possono essere quelli generati all'estremità di un profilo, cosa che accade ad esempio nelle monoposto progettate da Spark Technology e Dallara per il primo campionato di Formula E, partito nel 2015 (cfr. Fig. 12).



**Fig. 12** Generatori di vortici su Spark-Renault SRT\_01E, 2015

Per i generatori di vortici usati sull'alettone anteriore, si veda il paragrafo dedicato 1.2.5.

#### 1.2.4 Flusso interno

Nella scelta dell'orientamento dei filetti vorticosi generati dalle diverse superfici, alari e non, della monoposto, occorre porre l'attenzione non solo alle fortissime turbolenze dovute agli pneumatici, ma anche all'esigenza di alimentare il sistema turbocompressore che da anni caratterizza le unità di potenza delle monoposto, come anche di raffreddare le stesse. Le influenze aerodinamiche in termini di orientamento delle linee di corrente e dei vortici hanno delle conseguenze notevoli a livello di  $C_d$  come anche di  $\Delta C_p$ . Un sistema di raffreddamento solitamente tende ad aumentare la resistenza della monoposto. Tuttavia, con progetti appropriati delle prese del sistema e sfruttando la quantità di moto del flusso caldo, è possibile ridurre considerevolmente questi apporti di resistenza. La logica conclusione che se ne desume è che spesso risulta molto più significativo integrare tutti questi sistemi, piuttosto che concentrarsi nell'ottimizzazione delle prestazioni dei singoli componenti. Inoltre è bene considerare che le prese d'aria possono avere un comportamento drasticamente differente in funzione della velocità del fluido, cosa che in campo aeronautico ha ad esempio portato a progetti sempre più disparati per prese su velivoli subsonici e supersonici (cfr. Ref. [21]).

Considerando fissa l'area di entrata della presa, questa può infatti risultare troppo estesa per un flusso ad elevata velocità che, avendo quindi un'elevata portata in entrata risultante, tenderebbe a separare sulle superfici esterne della presa, aumentando lo

## 1.2 Aerodinamica base della monoposto completa

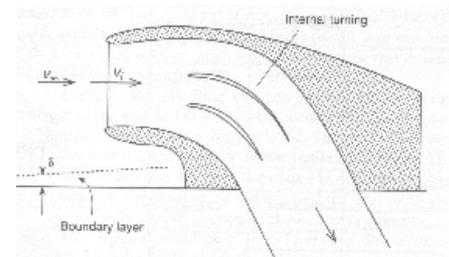
spessore di strato limite. Nel caso il flusso sia più lento della velocità di progetto, il flusso deve accelerare all'interno della presa per soddisfare le richieste del sistema di raffreddamento, cosa che su alcune vetture prototipo è accentuata con l'uso di ventole aspiranti poste a valle degli scambiatori di calore: come conseguenza il flusso interno può separare a valle della presa, non influenzando particolarmente la resistenza della monoposto ma piuttosto l'efficienza del sistema di raffreddamento. Due sembrano essere le possibili strade da seguire nella progettazione delle prese d'aria: o vengono sacrificate le *performance* della monoposto a causa dell'incremento di resistenza, o quelle del sistema di raffreddamento, tenendo bene a mente che le richieste del sistema sono quanto più esigenti quanto più aumenti la velocità delle vetture.

Tra le prese d'aria notevoli della monoposto, un'attenzione particolare merita quella posta al di sopra dell'abitacolo (Fig. 13). Come riporta Katz (Ref. [1]), questa deve essere posta al di sopra dello strato limite antecedente la presa, di modo che l'andamento del flusso interno sia più controllabile in funzione di quello esterno, supposto in questo modo quanto più indisturbato possibile. Come da Fig. 14, dei profili interni possono evitare la separazione del fluido direzionando lo stesso in opportuni vani tra i profili stessi.

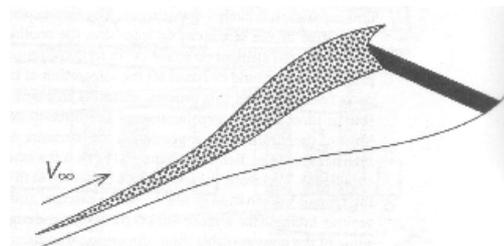
La presa NACA (Fig. 15) è altresì un caso di interesse, che può essere considerata opposta rispetto alla presa d'aria al di sopra dell'abitacolo. Questo perché lo strato limite del fluido entra interamente nella presa, motivo per cui fattori dominanti sono l'area della presa e la velocità del fluido, nell'economia del comportamento del flusso. Sembra logico che, per ridurre il rischio di separazione e le perdite di carico, sia preferibile posizionare tali prese nelle zone più



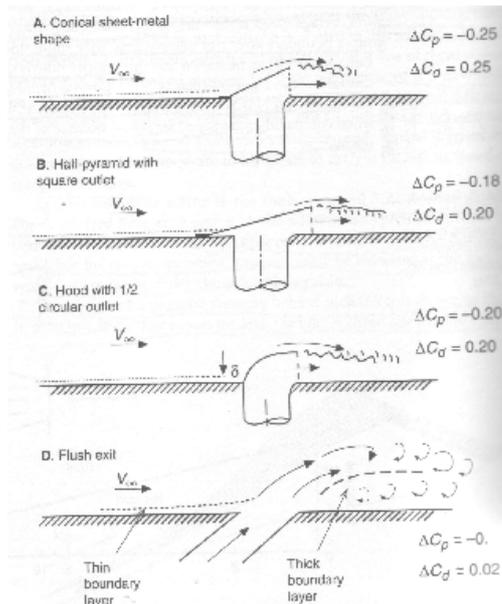
**Fig. 13** Presa d'aria su McLaren MP4-24, 2009, Ref. [11]



**Fig. 14** Vani interni alla presa d'aria, Ref. [1]



**Fig. 15** Presa NACA, Ref. [1]



**Fig. 16** Diverse geometrie per l'uscita del flusso, Ref. [1]

investe l'ala posteriore, in quanto l'aria calda in uscita dal sistema di raffreddamento ha una densità inferiore e può portare alla perdita di *downforce* all'ala.

Infine, i principi di funzionamento del getto immesso in una corrente diventano particolarmente utili integrando il flusso in uscita dal diffusore della vettura con lo scarico:

l'aumento della quantità di moto totale condiziona la circuitazione del fluido nell'ipotesi inviscida e di conseguenza influisce sulla deportanza generata dall'ala posteriore, come si sottolinea nel paragrafo 2.2.

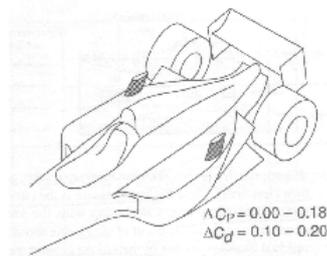
### 1.2.5 Ali ed alettone anteriore

Cruciali, specificatamente per la nostra analisi, sono le ali. Rispetto alle ben note teorie per profili e ali tridimensionali in ambito aerospaziale (cfr. Ref. [3]), le ali nelle vetture da corsa sono caratterizzate da:

- un basso allungamento alare, cosa che allontana il comportamento del fluido

avanzate del veicolo, dove lo strato limite è particolarmente sottile. Una presa simile è stata usata nel recentissimo S-Duct, di ispirazione Red Bull.

Per quanto riguarda l'uscita dai sistemi di raffreddamento o alimentazione, diversa può essere la geometria e dunque l'influenza sulle prestazioni, come si può notare in Fig. 16. In particolare in Formula Uno, popolari fin dagli anni '90 furono le "uscite a camino" del sistema di raffreddamento (Fig. 17), che hanno un'uscita simile al caso D della figura precedentemente citata: non solo differenti sono i livelli di carico in base all'angolo di uscita, ma inoltre può essere opportunamente direzionata la corrente che



**Fig. 17** "Uscita a camino", Ref. [1]

## 1.2 Aerodinamica base della monoposto completa

tridimensionale dal caso bidimensionale (cfr. paragrafo 3.2);

- un uso di profili *multi-element* che permettono di aumentare l'angolo di incidenza delle ali, con stallo ritardato;
- la sensibilità all'effetto suolo e quindi all'altezza da terra;
- una sostanziale invarianza delle condizioni di operatività dell'ala, vicina al  $Re$  pari a  $0.2 \times 10^6$ , nei test su piccola scala in galleria del vento.

Definita la struttura del telaio di una monoposto a ruote scoperte, la scelta più conveniente per il posizionamento delle ali, a causa delle repentine variazioni di geometria dovute al pilota o a causa delle turbolenze dovute agli pneumatici, è riscontrabile nelle attuali vetture: un'ala anteriore, posta anteriormente rispetto agli pneumatici anteriori, e un'ala posteriore, posta posteriormente rispetto agli pneumatici posteriori.

Per quanto riguarda l'ala anteriore, la sua presenza non è tanto importante per la dinamica del veicolo in base ai suoi effetti deportanti e sottosterzanti, quanto piuttosto nel direzionare corrente e vortici; infatti, è il primo elemento che la corrente supposta indisturbata incontra. Come riporta Zhang in Ref. [5] e come descritto in precedenza, gioca inoltre un ruolo fondamentale l'altezza da terra dell'ala e le problematiche di stabilità del veicolo associate.

Per quanto riguarda la geometria dell'ala, la superficie alare dell'elemento principale è stata fino ai primi anni duemila rettangolare, e la sua larghezza è stata sempre più ridotta a causa dell'aumento di resistenza di cui i vortici di estremità caricavano gli pneumatici anteriori. La somiglianza con un profilo bidimensionale è quanto di più lontano possa essere concepito: infatti, come afferma Toet in Ref. [6], l'ala anteriore è completamente tridimensionale, nel senso che ogni profilo ha sia uno svergolamento geometrico che aerodinamico. L'aggiunta di elementi secondari o *flap*, ha permesso inoltre l'aumento di *downforce* generata, ma allo stesso tempo ha portato alla creazione di nuovi vortici alle loro estremità: la necessità di evitare che questi entrassero nelle bocche del sistema di raffreddamento poste sulle pance laterali spiega la ragione per cui la loro lunghezza è ridotta in funzione della loro altezza rispetto all'elemento principale. Infine è bene notare che la lunghezza di ala principale e *flap* influenza considerabilmente la deportanza dell'alettone posteriore e quindi la posizione del centro di pressione totale della monoposto. Oltre ai citati vortici d'estremità, una scia turbolenta all'uscita dai bordi di fuga del complesso dell'ala influenza tutti i punti di separazione sulle superfici

del corpo vettura, in funzione anche della mobilità (ridotta) che possono avere i *flap* a causa di impercettibili deflessioni.

Se si parla di ala anteriore, non si può trascurare la presenza del muso, che modifica l'andamento del carico lungo l'apertura alare riducendolo al centro della stessa, proprio come fa una fusoliera nell'analogo aeronautico. Dagli anni 2000, il muso è stato rialzato rispetto all'ala, sostenuta da questo tramite piloni di sostegno. L'idea è di creare un canale di fluido nel vano tra muso, ala e piloni di sostegno, che corra sia fin sotto al corpo della vettura, massimizzando la portata e l'effetto suolo dello *chassis*, sia verso il sistema di raffreddamento.

Infine, gli enormi vortici di estremità all'ala anteriore richiedono particolare attenzione nell'orientamento: questi non possono essere annullati in nessun modo, nemmeno incrementando l'allungamento alare fittizio tramite paratie laterali. Se in passato alcuni deflettori posti sotto le estremità dell'alettone permettevano di accompagnare i filetti vorticosi al di fuori dell'area frontale della vettura, vietati in seguito dal regolamento, l'approccio più comune è quello, come afferma J. Katz, di "*fight vortex with vortex*" (cfr. Ref. [1]). Ad esempio tramite generatori di vortici posti perpendicolarmente o parallelamente sull'ala, di forma differente, si può alterare la direzione dei vortici principali dell'alettone, o perfino diminuirne l'intensità, nel caso si usino dei generatori a denti di sega che creino vortici con opposta velocità angolare, diminuendo inoltre la pressione a valle dell'ala e quindi aumentando velocità del fluido che la investe e la deportanza così generata.

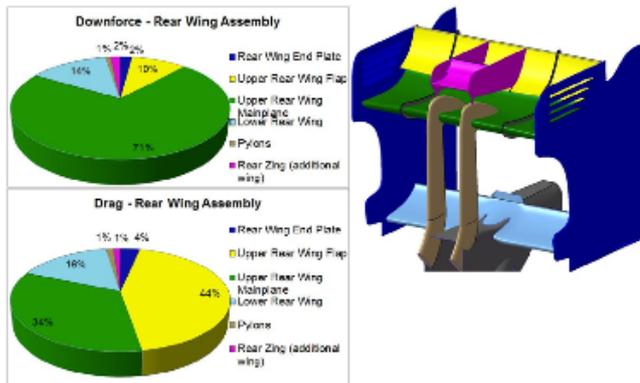
### 1.3 Aerodinamica dell'alettone posteriore

Sulla base di quanto descritto da Toet in Ref. [6], il contributo di deportanza dovuto alla singola ala posteriore può essere considerato pari ad un quarto della totale generata dalla monoposto. Tuttavia, vista l'integrazione dell'ala con il flusso proveniente dalla zona inferiore della monoposto e col diffusore, e considerando tutti i condizionamenti esercitati sul progetto delle altre superfici, come descritto in precedenza, il suo peso è pari ad un terzo della *downforce* totale, e maggiore è allo stesso modo il contributo alla resistenza (Fig. 2).

Per quanto riguarda il menzionato equilibrio longitudinale della monoposto, l'ala posteriore svolge un ruolo cruciale in quanto riduce la possibilità di effetti

### 1.3 Aerodinamica dell'alettone posteriore

sovraasterzanti: sarebbe infatti possibile per un pilota guidare senza ala anteriore con un tempo sul giro superiore di circa dieci secondi, ma sarebbe impossibile riportare la monoposto ai box senza l'apporto dell'ala posteriore.



**Fig. 18** Contributi degli elementi isolati a  $L$  e  $D$ , Ref. [6]

La struttura generale di un'ala posteriore è presentata in Fig. 18: il profilo principale, che sfrutta un flusso maggiormente indisturbato, è quello che dà il maggior contributo in termini di deportanza, mentre il *flap* secondario contribuisce maggiormente alla resistenza dell'ala. Senza quest'ultimo, tuttavia, non sarebbe possibile aumentare l'angolo di incidenza dell'ala principale senza che

questa stalli: la presenza del soffiaggio infatti permette al fluido di rimanere attaccato ai profili, con conseguente maggior deportanza. Per sicurezza strutturale, il complesso delle due ali è tenuto da dei piloni centrali, ma allo stesso tempo da paratie laterali che ne evitino una deflessione accentuata all'estremità. Le paratie, *end plates*, hanno lo scopo principale di isolare il flusso che investe l'ala posteriore dalle turbolenze causate dagli pneumatici antistanti, così come di ridurre l'intensità dei vortici di estremità creatisi, motivo per cui sono presenti anche le caratteristiche fessure, originariamente a forma di U (cfr. paragrafo 2.2).

Da regolamento 2009, è concessa anche l'introduzione di una seconda ala posta in posizione inferiore per sfruttare l'effetto suolo generato dal diffusore, che accelera il flusso sul dorso dell'ala invertita, incrementandone la *downforce*. Presente anche un piccolo profilo, attualmente posto al di sopra dello scarico, noto come *Monkey seat* (cfr. paragrafo 2.3.5).

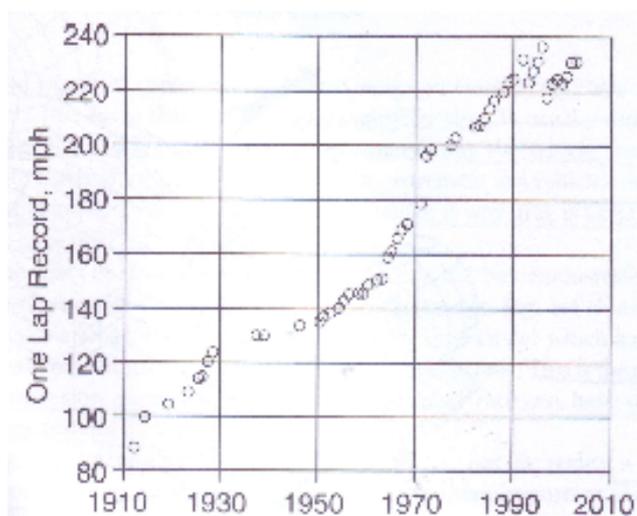
*1. Aerodinamica delle monoposto da corsa*

### 2.1 Prime comparse su vetture da corsa (la Chaparral del 1966)

## 2. Evoluzione storica dell'alettone posteriore

### 2.1 Prime comparse su vetture da corsa (la Chaparral del 1966)

Seppur la scoperta dell'esistenza di carichi aerodinamici che influiscano sensibilmente sulle autovetture sia da ricondurre agli anni precedenti la Seconda Guerra Mondiale (carichi a portanza positiva generata dalle vetture, in base a quanto osservato dalla Daimler-Benz durante le sfide per i record di velocità al German Autobahn nel 1936-



**Fig. 1** Trend di velocità record in un giro all'Indianapolis speedway, Ref. [1]

delle prestazioni delle vetture da corsa è esclusivamente da ricondurre a progressi tecnologici quali l'ottimizzazione delle mescole per pneumatici da strada, l'attenzione rivolta alle scelte strutturali dello *chassis*, ed in particolare alla geometria delle sospensioni, le modifiche apportate in seguito ad analisi sempre più specifiche nel campo dei motori alternativi e nella scelta del combustibile.

Tuttavia, possiamo evidenziare nuovamente l'enorme apporto in termini di *performance* che l'applicazione aerodinamica ha avuto, con l'introduzione delle ali invertite e con gli sviluppi basati sui principi fisici di cui si è discusso nel precedente capitolo, focalizzando la nostra attenzione sulla drastica variazione di trend presentata dalla Fig.1 dalla fine degli anni '60 in poi.

1939, cfr. Ref. [2]), la loro effettiva applicazione nel *motorsport* è decisamente successiva. Questo è dovuto al fatto che, come ben sottolinea Ref.[1], le scuderie si siano interessate nei primi anni del *motorsport* alle migliori meccaniche delle vetture stesse, di pari passo con lo sviluppo tecnologico dovuto ai progressi in ambito motoristico e industriale in senso lato. Infatti, come mostra la Fig.1, fino alla fine degli anni '60, l'evoluzione

## 2. Evoluzione storica dell'alettone posteriore

La prima vettura da corsa degna di nota (seppur antecedenti sono sia la Porsche 550 Spyder del 1956 che le sperimentali Opel RAK del 1928, cfr. Ref.[9]) sulla quale è comparso un alettone posteriore fu sviluppata nel 1966 dal team Chevrolet-Chaparral da Frank Winchell e dal pilota Jim Hall. La scuderia, che partecipava al campionato CanAm, fiorente in quegli anni in virtù di regole meno restrittive e quindi aperto a qualsiasi tipo di innovazione, basandosi sul telaio in alluminio della precedente 2C, realizzò la vettura 2E (Fig.3 e Fig.4) che presentava una novità per



**Fig. 2** Chaparral 2A (primo piano) e 2E, Ref. [8]

l'intero mondo delle corse. Sebbene anche le precedenti versioni 2C e 2D presentassero una velatura posteriore come *spoiler*, la 2E rappresenta una vera e propria rivoluzione nel settore per le motivazioni di seguito esposte. L'appendice aerodinamica era montata su due piloni di sostegno nella zona posteriore della vettura ed era costituita da un'ala invertita con sezione che, come descrive Ref. [2], è molto simile ad un profilo NACA 0008-0009 (cfr. Capitolo 3).

Tramite trasmissione automatica comandata dal piede sinistro del pilota su un terzo pedale nell'abitacolo, un attuatore oleodinamico permetteva la variazione dell'angolo di incidenza del profilo per due differenti configurazioni. La prima, con un'incidenza geometrica di  $0^\circ$ , garantiva la minima resistenza di forma del profilo e risultava particolarmente utile sui rettilinei del tracciato; la seconda, con un angolo di incidenza elevato pari a  $-12^\circ$ , permetteva la creazione della massima deportanza e di conseguenza un aumento della resistenza totale, dovuto sia all'aumento della resistenza di forma del profilo che, come conseguenza della generazione di portanza su ala ad allungamento finito, alla generazione di resistenza indotta per effetto dei vortici di estremità.

Come afferma il Ref. [2], tre furono i principali criteri progettuali che permisero alla Chaparral 2E di essere una vettura vincente:

- la posizione sopraelevata dell'alettone posteriore (4.75 ft, approssimativamente 1.448 m);
- la possibilità per il pilota di variare l'angolo di incidenza dell'ala;

### 2.1 Prime comparse su vetture da corsa (la Chaparral del 1966)

– l'applicazione di *downforce* direttamente sui mozzi delle ruote posteriori.

A parte le già citate motivazioni che hanno permesso vantaggi importanti dovuti al secondo punto, la posizione sopraelevata dell'alettone rifletteva l'idea originaria che fosse più performante ricevere una corrente quanto più pulita e uniforme possibile, evitando un flusso distorto e le turbolenze generate dalla transizione dello strato limite sullo *chassis* (credenza errata, come spiegato nel paragrafo 1.2.5). Per quanto riguarda il terzo vantaggio, invece, questo è da ricondurre principalmente a motivazioni strutturali, in quanto il carico aerodinamico non ha in questo modo deflesso eccessivamente le zone ammortizzanti delle sospensioni e caricato di energia elastica le stesse oltre il primo comportamento lineare della curva *stress-strain* (Ref. [10]). Tuttavia, come ricorda Ref. [8], la 2E non vinse il campionato CanAm nel 1966, conquistando una sola vittoria nel corso della stagione, a causa di problemi di affidabilità. Alla 2E, seguirono migliorie della vettura in questa direzione, per garantire flussi più puliti che sfruttassero meglio la generazione della deportanza, con le successive 2G e 2H, insieme all'innovativa 2J (cfr. paragrafo 2.3.1). Comunque, le innovazioni apportate non permisero alla Chaparral di ottenere risultati complessivamente considerevoli, e all'interno del campionato CanAm non si annoverarono in quegli anni altre vetture che sfruttarono l'installazione di superfici aerodinamiche sopraelevate. Eppure, la Chaparral 2E fu la pietra miliare di una rivoluzione motoristica alla quale si affacciarono le altre vetture del *motorsport*.



**Fig. 3** La Chaparral 2E, Ref. [8]



**Fig. 4** La Chaparral 2E vista posteriormente, Ref.[8]

## 2.2 Alettoni posteriori in Formula Uno

Pochi anni dopo l'esempio della Chaparral, nella massima serie del *motorsport* la prima vettura ad aver utilizzato velature posteriori fu la Ferrari 312F1 (Fig.5) durante il Gran Premio del Belgio 1968, il cui esempio fu seguito successivamente dalla Brabham e dalla Lotus. La scelta della posizione dell'alettone posteriore riflette nuovamente i dati disponibili all'epoca per quanto concerne i profili aerodinamici, motivo per cui una posizione sopraelevata venne allora preferita. Per la stessa ragione elencata nel caso della Chaparral 2E, nuovamente i piloni di sostegno degli alettoni sono montati sui componenti rigidi della sospensione o della ruota stessa (cfr. Fig.6), e non sui componenti più elastici, per evitare un aumento di rigidità delle sospensioni a seguito dei carichi applicati (cfr. Ref.[10]) e una situazione di instabilità in base alla conformazione del tracciato.



**Fig. 5** Ferrari 312F1 al Gran Premio del Belgio del 1968, Ref. [11]



**Fig. 6** Lotus Type 49B, 1968, Ref. [11]

Come possiamo notare in Fig.5, l'ala invertita della Ferrari 312F1, a differenza della Chaparral e della stessa Lotus in Fig.6, non è semplicemente un'ala ad allungamento finito con profilo costante, ma presenta alle estremità i primi accenni di appendici aerodinamiche poste in posizione normale rispetto all'ala stessa. La ragione progettuale riflette le stesse motivazioni che hanno portato all'applicazione di *winglet* in campo aeronautico, ovvero la riduzione dei vortici di estremità e quindi della resistenza indotta. La resistenza indotta  $D_i$  dell'ala, dovuta alla presenza di vorticità alle estremità dell'ala (conseguenza dei teoremi di Helmholtz) secondo la teoria di Prandtl, può essere scritta sulla base del teorema di Kutta-Zhukovsky come:

## 2.2 Alettoni posteriori in Formula Uno

$$D_i = \int_{-s/2}^{s/2} \rho w \Gamma dz$$

dove  $\rho$  è la densità dell'aria,  $w$  la velocità indotta dal vortice di estremità, o *downwash*, calcolata secondo il teorema di Biot-Savart, e  $\Gamma$  la circuitazione intorno al profilo, integrando su un'ala di apertura alare  $s$  (cfr. Ref. [3]).

La presenza di tali appendici aerodinamiche rappresenta un precursore dell'integrazione tra ali e *monocoque* tipico degli anni a venire. Va sottolineato che anche in questo caso il pilota aveva la possibilità di variare l'angolo di incidenza delle ali tramite attuatore oleodinamico.

Fu proprio la possibilità di variare l'assetto dell'ala la ragione per la quale dal 1969 in poi la FIA (Federazione Internazionale dell'Automobile), in passato CSI (*Comité Sportif International*), fu l'ago della bilancia nelle prestazioni delle monoposto, imponendo di anno in anno regole sempre più stringenti, limitando difatti la libertà innovativa proprio in materia aerodinamica, ma garantendo standard sempre maggiori di sicurezza.

Gli incidenti occorsi durante il Gran Premio di Spagna del 1969 portarono alle seguenti restrizioni regolamentari (cfr. Ref. [12]):

- proibizione di parti mobili;
- abolizione della pratica consistente nel fissaggio dei piloni direttamente sui mozzi delle ruote o sulle sospensioni;
- limitazione dell'ala e *chassis* all'altezza massima di un metro.

La prima limitazione enunciata, valida tuttora a dispetto di alcune eccezioni concesse dal regolamento, diverrà nel corso degli anni occasione di profondo dibattito, fino a casi lampanti dei nostri giorni (cfr. Red Bull 2011-2013), sulla determinazione del concetto di “parte mobile”. Questa restrizione infatti prende in considerazione anche quegli elementi aerodinamici che, pur non variando il proprio assetto, sono dotati intenzionalmente di una certa elasticità che permette loro un diverso adattamento alle condizioni esterne.

Poiché il quantitativo di *downforce* dovette essere limitato, non potendo variare l'assetto e dunque la deportanza generata, dagli anni '70 in poi si assistette a diverse soluzioni in pista. Uno dei maggiori fenomeni fisici che caratterizzava la perdita di carico era dovuto agli stessi assetti esageratamente picchianti delle ali, cosa che portava frequentemente

## 2. Evoluzione storica dell'alettone posteriore



**Fig. 7** Ferrari 312B, 1970, Ref. [13]

alla formazione di bolle di separazione sul dorso dell'ala invertita, in virtù di un gradiente di pressione sfavorevole nell'avvicinamento al bordo di fuga dell'alettone. Questo implicava una perdita di efficienza generale della velatura, sia come aumento di resistenza di forma, che come diminuzione della componente di forza aerodinamica perpendicolare al flusso. Per queste ragioni si cominciarono ad usare ali non più *single-element* ma *multi-element* (cfr. Fig. 7) in cui, come accade negli odierni *slat* per i velivoli civili, le fessure presenti tra le velature permettono la creazione di una pressione inferiore a valle del profilo e, di conseguenza, mantengono il flusso più attaccato alla superficie, con un aumento di efficienza generale. L'utilizzo di un numero maggiore di elementi permette inoltre di diminuire la lunghezza dei singoli, evitando il raggiungimento della condizione di separazione, in quanto le scale del fenomeno sono ridotte. Oltre alla condizione di separazione, è possibile la formazione di bolle di separazione che portano ad un rimescolamento vorticoso del fluido nello strato limite in una zona altamente instazionaria fino al *reattachment* dello stesso, divenuto ora turbolento. Secondo il criterio di Owen-Klanfer, in base al numero di Reynolds locale  $Re_{\delta^*} = U_e \delta^* / \nu$ , si può determinare la dimensione di tali bolle (cfr. Ref.[3]).



**Fig. 8** Ferrari 312B2, 1971, Ref. [13]

Inoltre, sempre prendendo in considerazione la Fig.7, possiamo notare la comparsa di un elemento perpendicolare all'ala posto in posizione centrale rispetto alla stessa, che permette al flusso un comportamento quanto più bidimensionale possibile, sfruttando al massimo le caratteristiche deportanti dei singoli profili. Questa scelta progettuale è accentuata successivamente, come mostra la Fig.8, integrando tale superficie con la scocca.

Un'altra soluzione estremamente economica per evitare la separazione del flusso sul dorso del profilo fu ideata da Dan Gurney nel 1971 e prende il nome di *Gurney flap* (Fig.9). Una piccola superficie viene posta perpendicolarmente sul bordo di fuga

## 2.2 Alettoni posteriori in Formula Uno

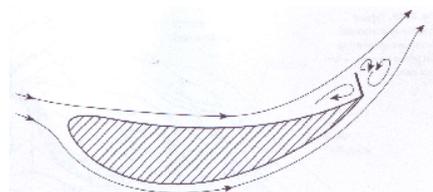


**Fig. 9** Gurney flap, Ref. [11]

dell'ala, di modo che si generi una scia di von Kármán a valle del profilo (Fig.10), alterando la condizione di Kutta. Il flusso, stallando sulla superficie e creando i vortici controrotanti della scia nominata, subisce un abbassamento repentino di pressione al bordo di fuga, quindi contorna la superficie del dorso ritardando la separazione al bordo di fuga stesso. A fronte di un piccolo aumento di resistenza, questa soluzione aumenta complessivamente il  $C_L$  dell'ala permettendo di incrementare l'angolo di incidenza del profilo a picchiare, come anche il  $C_M$  di beccheggio negativo. In base a quanto riporta J. Katz (Ref. [1]), l'incremento di deportanza diviene secondario rispetto a quello di resistenza una volta che l'altezza del flap ha superato i 20 mm. Questa soluzione originariamente utilizzata per le IndyCar, divenne popolare anche in Formula Uno sia per l'alettone posteriore che successivamente per quello anteriore; l'invenzione ebbe applicazione in campo aeronautico per i velivoli McDonnell Douglas e per lo stabilizzatore degli elicotteri.

Viste le poche restrizioni regolamentari nel campo, non mancarono idee di ottimizzazione piuttosto bizzarre con l'aggiunta di ulteriori superfici posteriori. È il caso del doppio alettone posteriore, usato nelle prime gare del 1974 dalla Lotus JPS9 (Fig.11) e in anni successivi rivisitato in via sperimentale (Fig.13), con differenti applicazioni, non così prolifiche e fortunate, fino all'era moderna (Fig.14). Le due superfici interagiscono tra di loro

di modo che in realtà la portanza complessiva sia inferiore alla somma delle due prese singolarmente. Tuttavia, poiché le superfici non sono isolate rispetto al corpo vettura, quella inferiore interagisce con l'effetto suolo generato dal corpo vettura (non è il caso della Lotus JPS9 tuttavia, in quanto le potenzialità di tale effetto non avevano ancora trovato applicazione in Formula Uno), mentre quella superiore beneficia di un flusso

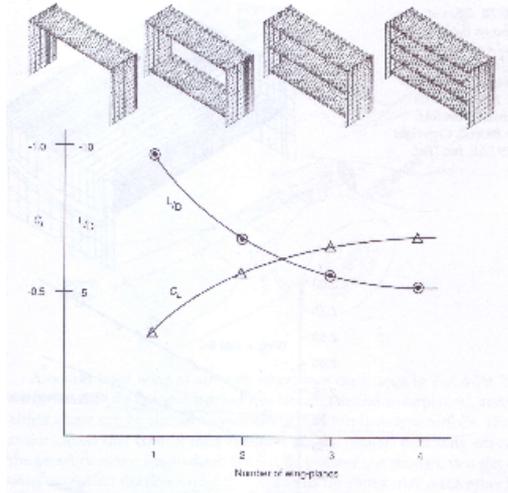


**Fig. 10** Andamento del flusso attorno a profilo con Gurney flap, Ref. [1]



**Fig. 11** Lotus JPS9, 1974, Ref. [14]

## 2. Evoluzione storica dell'alettone posteriore



**Fig. 12** Effetto dell'aumento del numero di superfici alari posteriori, Ref. [1]

maggiormente indisturbato, adoperando la funzione classica di alettone così come concepito agli albori (cfr. paragrafo 2.1). In conclusione, l'applicazione di un numero maggiore di ali ha effettivamente una sua utilità nell'aumentare il  $C_L$  complessivo, ma riduce l'efficienza del retrotreno con un contributo di resistenza sempre maggiore. Per questo, come mostra la Fig. 12 (analisi con ali isolate, e coefficienti calcolati rispetto all'area di riferimento del veicolo) e sulla base di quanto descritto in Ref.[1], risulterebbe più conveniente l'uso di un numero massimo di due velature; tuttavia, se si optasse per un'ala *multi-element*, l'effetto detto *cascade* dovuto all'interazione di un numero maggiore di

superfici garantirebbe una separazione del flusso ritardata, quindi la possibilità di incrementare l'angolo di incidenza dell'ala e di conseguenza il  $C_L$ .

Ulteriore caso particolare è la Williams FW09 versione B del 1984, in cui la necessità di rendere più stabile il retrotreno ed evitare fenomeni di sovrasterzo ha richiesto un aumento del carico posteriore con velature secondarie in posizione laterale rispetto all'alettone principale, soluzione adoperata contemporaneamente dalla Ferrari 126 C4. Nel caso della Williams, la scelta di aumentare il carico, quindi l'aderenza degli pneumatici posteriori, era dovuta all'utilizzo di un biturbo Honda che sviluppava maggior potenza rispetto al passato (Fig. 15).



**Fig. 13** Ferrari 88A, 1988, Ref. [14]



**Fig. 14** McLaren MP 4/18, 2003, Ref. [14]



**Fig. 15** Williams FW09, 1984, Ref. [15]

## 2.2 Alettoni posteriori in Formula Uno

Come riporta Ref.[1], la prima vettura a comprendere i vantaggi derivanti dall'abbassamento della posizione dell'ala fu la Lotus Tipo 78, che nel 1977 sfruttò per



**Fig. 16** Lotus Tipo 78, 1977, Ref. [15]



**Fig. 17** Lotus Tipo 78 con minigonne smontate, 1977, Ref. [1]

prima l'effetto suolo e la sua integrazione con le superfici aerodinamiche. Le pance laterali (Fig.17) del corpo vettura vennero progettate con un andamento simile ad un profilo aerodinamico invertito che indirizzava il flusso sul retrotreno. Le paratie verticali esterne montate sulle pance laterali presentavano delle bandelle originariamente in nylon, note come “minigonne” (visibili in Fig.16), che avevano l'intento di isolare il flusso sotto la vettura affinché si comportasse quanto più bidimensionalmente possibile, cosicché le pance condividessero le stesse caratteristiche aerodinamiche del corrispettivo profilo. L'effetto suolo causato sia dal corpo vettura che da tali pance, basato sul principio dei tubi di Venturi (cfr. paragrafo 1.2 e 2.3.2), generava un flusso a bassa pressione che passava poi sotto il dorso dell'ala a valle, aumentando in valore assoluto l'andamento del  $\Delta C_p$  della stessa. Le minigonne, sostituite con materiale ceramico, portarono enormi vantaggi in termini di prestazioni rendendo più veloci e meno sicure le monoposto; inoltre, la variabilità dell'altezza del suolo del tracciato, e quindi dello spazio tra questo e le minigonne, divenne un serio problema in termini di attrito e di sicurezza della vettura. Per tali ragioni furono dunque bandite dal 1983.

Gli anni '80 non videro sostanziali differenze progettuali in materia di velature posteriori. Con cadenza differente e seguendo la moda della scuderia vincente del momento, in virtù di un regolamento sempre mutevole, le soluzioni precedentemente descritte di ala *multi-element* o uno stesso numero maggiore di ali non subirono

## 2. Evoluzione storica dell'alettone posteriore

sostanziali variazioni. La vera novità nell'aerodinamica complessiva delle monoposto era stata appunto introdotta con la Lotus Tipo 78, dunque, con o senza minigonne, i maggiori sforzi delle scuderie furono rivolti a un'estensione sempre maggiore dell'effetto suolo: le motivazioni di tali scelta sono da riscontrare nel fatto che un miglioramento nella depressione generata al di sotto della vettura garantisce difatti un aumento della deportanza con un'incidenza sulla resistenza trascurabile, cosa che non si può affermare parimenti per le ali. Degno di nota risulta però il caso della Lotus 80 e della successiva versione 88, in cui il concetto di integrazione dello *chassis* con l'ala posteriore e le sue paratie verticali viene esasperato. Le estensioni delle superfici laterali dell'ala svolgono ora funzioni ulteriori rispetto alla semplice limitazione della resistenza indotta. In primo luogo queste aumentano la stabilità latero-direzionale del veicolo, riducendo effetti di sottosterzo e sovrasterzo in curva. In secondo luogo, come si è cercato di isolare il flusso sotto la vettura dall'ambiente esterno, così si vuole isolare l'interazione dello stesso flusso con l'ala posteriore rispetto agli effetti disturbanti causati dagli pneumatici posteriori. Queste interferenze sono un problema particolarmente sentito, specialmente in serie come IndyCar Series e Formula Uno, in cui le monoposto sono *open-wheel race cars*.

Per quanto riguarda la Lotus Tipo 80 del 1979, nelle intenzioni originarie dell'ingegnere Colin Chapman, la vettura avrebbe dovuto essere talmente rivoluzionaria da generare deportanza unicamente tramite l'aspirazione dell'effetto suolo, creando una zona di bassa pressione fin dall'avantreno e non utilizzando nemmeno superfici aerodinamiche. A detta del pilota Mario Andretti, tuttavia, la vettura aveva un comportamento strano in curva per cui perdeva carico aerodinamico improvvisamente, causando evidenti effetti di instabilità, per poi riacquistarlo con un effetto intermittente. Questo è chiamato *porpoising effect*, che letteralmente può essere descritto come il comportamento in acqua delle focene, cetacei simili ai delfini, con riferimento all'immersione e emersione dalle acque (cfr. Ref.[15]). L'area di bassa pressione sotto la vettura subiva una variazione considerevole col centro di gravità della stessa, e in funzione della sua velocità e della distanza da terra il centro di pressione dei profili sulle pance variava la sua posizione. L'effetto influenzava considerevolmente la stabilità al beccheggio dell'intera monoposto, così come descritto nel paragrafo 1.2.1. Alle basse velocità, queste forze si scaricavano in maniera preoccupante sul sistema di sospensioni creando effetti risonanti che generavano lo sbandamento generale descritto. A causa delle

## 2.2 Alettoni posteriori in Formula Uno

lamentele dei piloti, la monoposto fu successivamente equipaggiata con alettoni (Fig.18) che dovessero garantire una maggiore uniformità in termini di *downforce*, ma senza successo.



**Fig. 18** Lotus Tipo 80, 1979, Ref. [15]



**Fig. 19** Lotus Tipo 88, 1981, Ref. [16]

L'idea di rendere l'intera vettura un corpo deportante fu dunque rivisitata e riproposta da Chapman sulla Lotus Tipo 88 nel 1981 (Fig.19): lo *chassis* era composto da due telai differenti posti l'uno dentro l'altro, con un telaio esterno che svolgeva la funzione di “sistema effetto suolo”, scaricando elasticamente il carico aerodinamico sul telaio interno, che aveva scopi principalmente meccanici, oltre a contenere l'abitacolo per il pilota. Per quanto riguarda la gestione del carico, il passaggio dalla *monocoque* in alluminio a quella in fibra di carbonio fu fondamentale; parlare di alettoni posteriori inoltre potrebbe risultare impreciso, quanto piuttosto il telaio esterno agiva complessivamente come un'unica struttura, variando peraltro l'altezza da terra in virtù delle proprietà della fibra (cfr. Ref.[10]). Per tali ragioni, e per quanto descritto a inizio paragrafo, la Lotus Tipo 88 non vide mai la luce in corsa poiché la Federazione, sotto sollecito degli altri team, la considerò illegale per via del dibattito sulla sua mobilità causata da carichi aerodinamici.

Dopo il 1983 e l'abolizione delle minigonne e l'obbligo di un fondo piatto per le monoposto, difatti scomparirono le auto ad effetto suolo, soprannominate anche *wing car*. Di conseguenza l'ala posteriore separata dal corpo vettura come in passato rimase per anni la soluzione maggiormente affermata. Parallelamente, la Federazione modificò ripetutamente i limiti di altezza e dimensioni delle ali posteriori con l'obiettivo di ridurre le turbolenze a cui erano soggette le monoposto avversarie in fase di sorpasso, affinché lo spettacolo ne fosse favorito. Se la geometria dell'ala e il suo posizionamento non subì innovazioni significative ma si adeguarono al regolamento, lo stesso non si può dire per

## 2. Evoluzione storica dell'alettone posteriore

tutti quegli accorgimenti che durante gli anni le scuderie hanno adottato per massimizzare le caratteristiche dell'ala. Prima di soffermarsi su tali dispositivi, occorre innanzitutto tener presente dell'ultimo *trend* registrato sull'evoluzione delle paratie verticali, che hanno introdotto fessure laterali a forma di U (dette



**Fig. 20** Ferrari F14T, 2014, Ref. [16]

U-cutout, ma dalla forma variabile in base al diverso progetto di ogni scuderia, di cui è un esempio la Fig.20).

Le ali posteriori sono caratterizzate da un bassissimo rapporto (*aspect ratio* o allungamento alare) tra l'apertura alare dell'alettone e la corda del profilo quindi i vortici d'estremità hanno dimensioni estremamente significative. L'uso delle paratie d'estremità garantisce come detto una riduzione dei vortici d'estremità, ma rilevante rimane ancora la differenza di pressione tra ventre e dorso del profilo.

Per ridurre l'incidenza che hanno i vortici in termini di resistenza indotta, i progettisti hanno riscontrato un'impossibilità di agire in tal senso senza avere una corrispettiva perdita della massima efficienza di cui potrebbe beneficiare la vettura. Le fessure laterali a forma di U permettono all'aria ad alta pressione sul ventre dell'alettone di interagire col flusso a bassa pressione esterno rispetto alle superfici di estremità,



**Fig. 21** McLaren MP4-27, 2012, Ref. [16]

riducendo l'entità della differenza di pressione che inficerà al bordo di fuga dell'ala con la formazione dei menzionati vortici di estremità. L'interazione tra i diversi flussi porta alla creazione di vortici visibili ad occhio nudo principalmente su ali posteriori moderne, in virtù del maggior carico aerodinamico permesso dalle soluzioni *multi-element* non stallate di questi ultimi anni, come è possibile riscontrare sulla McLaren MP4-27 (Fig. 21).

### 2.3 Dispositivi che influenzano il flusso intorno all'alettone

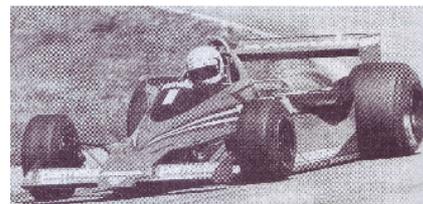
Seppur la formazione dei vortici sia inevitabile, questi non sono soltanto ridotti nelle dimensioni ma anche ritardati.

A questo punto occorre porre l'attenzione su quei dispositivi che, di anno in anno, le scuderie hanno adottato per aggirare le limitazioni imposte dal regolamento sulle appendici aerodinamiche, o quelli che hanno preso piede durante un certo *trend* progettistico, dovendosi adeguare a limitazioni e specifiche imposte o dominanti durante la storia della Formula Uno.

## 2.3 Dispositivi che influenzano il flusso intorno all'alettone

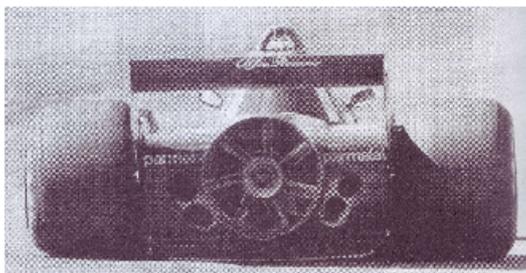
### 2.3.1 Il Fan

La prima comparsa di un *fan* in Formula Uno è datata 1978, anno in cui partecipò al campionato la Brabham BT46B (Fig. 22). Dalla Fig. 23 possiamo notare la presenza di una ventola montata sul retrotreno della vettura, una soluzione adottata per la prima volta nel mondo delle corse sulla vettura CanAm Chaparral 2J del 1969 (Fig. 24). Se nella

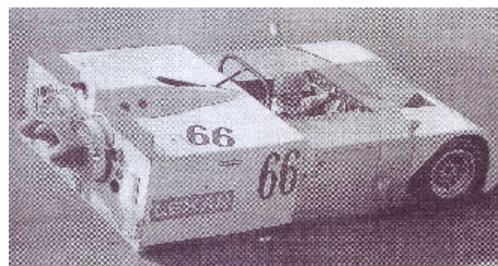


**Fig. 22** Brabham BT46B, 1978, Ref. [1]

Chaparral le due ventole mostrate erano trascinate da un motore ausiliario per cui la sua coppia e velocità angolare erano indipendenti dal rapporto di trasmissione scelto sul motore principale, la Brabham adottò un singolo *fan* trascinato dal motore stesso. Come si può notare in Fig. 22 e 23, la vettura correva ancora nel periodo in cui erano ammesse le minigonne, e se in quegli anni cominciavano le prime sperimentazioni sulle vetture effetto suolo (cfr. Fig. 16), la Brabham virò su una soluzione tanto inusuale quanto



**Fig. 23** Brabham BT46B, 1978, Ref. [1]



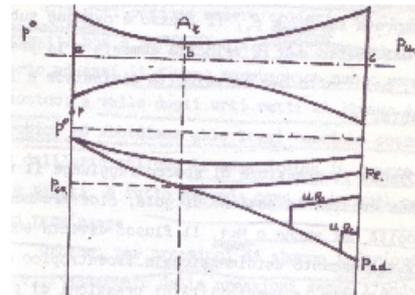
**Fig. 24** Chaparral 2J, 1969, Ref. [1]

## 2. Evoluzione storica dell'alettone posteriore

efficiente. L'idea era basata su quello che viene chiamato *vacuum-traction* (cfr. Ref.[2]): la ventola aspirava aria dalla zona inferiore della vettura, riducendone dunque la pressione e aumentando la deportanza del telaio, cosa che risultava ancora più efficiente per via della presenza delle minigonne. Tale aspirazione permetteva inoltre di far passare aria fredda attraverso i radiatori dell'acqua posti sopra il motore fino a spingerla nella bolla di separazione formatasi dietro la vettura. L'alettone posteriore beneficiava inoltre di questo flusso a bassa pressione, incrementando il suo  $\Delta C_p$  in valore assoluto. Ancora più importante era la possibilità di ridurre la resistenza di forma dell'intera monoposto proprio grazie al flusso passante attraverso la bolla di separazione, come sottolinea Ref.[1]. La scelta della Brabham non ebbe però vita lunga durante il campionato a causa delle pressioni esercitate dalle altre scuderie, cosa che portò al divieto di utilizzo del *fan* da parte della Federazione, in quanto superficie aerodinamica mobile, come prescritto dal regolamento.

### 2.3.2 Il diffusore e il doppio diffusore Brawn

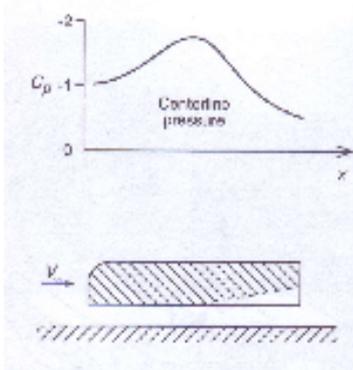
Poiché le limitazioni regolamentari proibirono un fondo di altezza variabile dopo l'avvento delle vetture ad effetto suolo e il divieto di utilizzo di minigonne, un approccio diverso venne adottato in seguito e negli anni a venire su ogni veicolo sportivo al fine di massimizzare tale effetto suolo. Un comportamento simile al tubo di Venturi fu perciò la motivazione addotta per giustificare l'adozione di una variazione dell'altezza della vettura nella zona degli scarichi, tramite aperture incanalate che vengono definite in gergo automobilistico diffusori. Ciò, affinché l'adozione risultasse conforme al regolamento, fu però possibile tramite l'applicazione dei diffusori stessi in una zona a valle dell'asse delle ruote posteriori. Tali diffusori corrispondono alla sezione di un condotto divergente adottato sul retrotreno della monoposto, che rispecchiano la realizzazione concettuale di un ugello nella zona inferiore del veicolo, in cui la superficie inferiore funge da gola dell'ugello stesso. Parallelamente al



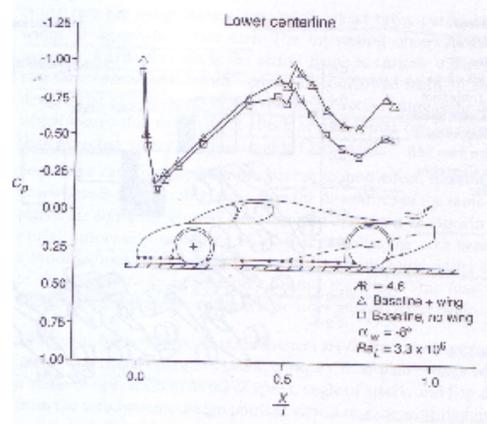
**Fig. 25** Andamento del rapporto tra pressione statica e pressione totale a monte lungo un ugello di De Laval, Ref. [17]

### 2.3 Dispositivi che influenzano il flusso intorno all'alettone

comportamento del flusso di un ugello di De Laval in condizioni subsoniche come descritto da Ref. [17], la sezione divergente, in condizioni di flusso subsonico a monte della gola e nella gola stessa (Fig.25), si comporta decelerando il flusso ed aumentandone la pressione statica, ma garantendo di conseguenza una generale accelerazione del flusso nella zona piatta del corpo vettura e un abbassamento di pressione, quindi la creazione di *downforce* per la differenza di pressione rispetto al flusso sopra la vettura. L'andamento geometrico del diffusore corrisponde a quello del dorso di un'ala invertita, inclinata con un angolo di incidenza sufficientemente alto. L'effetto della resistenza di forma della vettura provoca una zona a bassa pressione a valle della vettura stessa, e si verifica un abbassamento più marcato di tale pressione se si considera la presenza dell'ala posteriore disposta ad un'altezza sufficiente dal suolo, in prossimità del diffusore. La zona di bassa pressione a valle permette di aumentare la portata del fluido al di sotto della monoposto, mentre la zona di bassa pressione al di sotto della vettura raggiunge il suo picco poco prima dell'inizio del condotto divergente (Fig. 26).



**Fig. 26** Andamento del  $C_p$  per un corpo con condotto divergente finale, Ref. [1]



**Fig. 27** Andamento del  $C_p$  con e senza l'effetto di ala posteriore, Ref. [1]

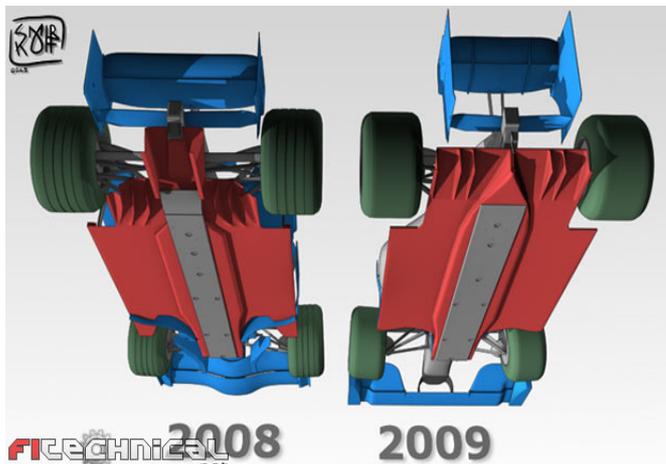
Come ampiamente trattato nel primo capitolo e qui richiamato nella Fig. 27, la presenza dell'ala posteriore e la sua interazione col retrotreno e il diffusore permette un abbassamento significativo del  $C_p$  principalmente nella sezione divergente, in virtù della più bassa pressione a valle, con un conseguente aumento di *downforce* totale non dovuto

## 2. Evoluzione storica dell'alettone posteriore

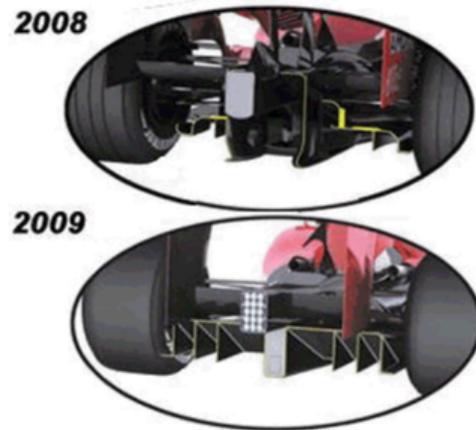
unicamente alla singola ala. Questo dispositivo si comporta in maniera simile ma non identica ad un tubo di Venturi, non essendo questo un caso di fluido interno isolato dall'ambiente, e viene utilizzato nella IndyCar Series dove i regolamenti permettono soluzioni meno restrittive. Tuttavia, per quanto riguarda la sua nomenclatura, ancora è comune sentir chiamare tali dispositivi come venturi o diffusori, quando, come afferma Ref. [1], sarebbe più corretto identificarli come *underbody tunnels* o *channels*.

Nelle monoposto da Formula Uno, storicamente la zona del diffusore ha presentato condotti separati con superfici

verticali, angolate o meno, di altezza maggiore nella zona centrale al di sotto del cambio e del motore, e di altezza inferiore nella zona laterale (Fig. 28). Tuttavia occorre notare quanto fatto dalle scuderie in seguito alle variazioni regolamentari del 2009 (Fig. 29),



**Fig. 29** Variazioni monoposto per alettone posteriore e diffusore nel 2009, Ref. [16]



**Fig. 28** Variazione della geometria del diffusore in seguito al regolamento 2009. In alto Ferrari F2008, in basso Ferrari F60, Ref. [11]

che videro l'imposizione di un'altezza massima uguale per ogni condotto nella zona di uscita del diffusore. Come illustra Ref. [11], se alcune scuderie interpretarono alla lettera le nuove disposizioni come la Ferrari F60 (Fig. 28), altre, ed in primo luogo la neonata Brawn GP, sfruttarono a loro favore i cavilli regolamentari con l'introduzione del doppio diffusore (*Double deck diffuser DDD* Fig. 30).

### 2.3 Dispositivi che influenzano il flusso intorno all'alettone



**Fig. 30** Doppio diffusore Brawn GP, 2009, Ref. [11]

Mentre i canali secondari si comportano come diffusori veri e propri, lo sfogo centrale è collegato tramite dei canali fino alla zona laterale contigua con le pance della monoposto, dalle quali prende l'aria e dunque aumenta il flusso aerodinamico in uscita dalla vettura, indirizzando lo stesso verso l'alto. Il flusso segue le pance modellizzate secondo la moderna forma a Coca-Cola che caratterizza le monoposto attuali, in accordo con quanto spiegato nel paragrafo 1.2 in merito all'effetto Coanda.

L'aumento di flusso all'uscita non solo riduce la resistenza di forma del profilo, ma condiziona tutto il comportamento dello stesso sotto la vettura, riducendone ancora la pressione. Per la conservazione della quantità di moto, lo stesso direzionamento del flusso verso l'alto permette al retrotreno di sperimentare una maggiore deportanza. Superata l'approvazione dalla Federazione, la soluzione sperimentata per prima su Toyota, Williams e Brawn fu in seguito copiata dalle altre scuderie e adottata anche nel 2010, fino a che nel 2011 non venisse vietato il doppio diffusore.

#### 2.3.3 L'F-Duct

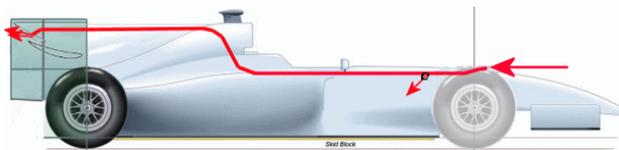


**Fig. 31** McLaren MP4-25, 2010, Ref. [15]

Nel 2010 la McLaren (Fig. 31) presentò un sistema che avrebbe dovuto non incrementare la deportanza dell'ala posteriore, bensì ridurla. La motivazione era da ricercare nel fatto che, a differenza del caso aeronautico, per il basso *aspect ratio* e per gli elevati carichi generati, il contributo maggiore della resistenza dovuto alle ali non è quello dovuto alla resistenza di forma, bensì a quella indotta. Questo permette dunque di giungere alla paradossale implicazione che far stallare l'ala posteriore pone la stessa in una

## 2. Evoluzione storica dell'alettone posteriore

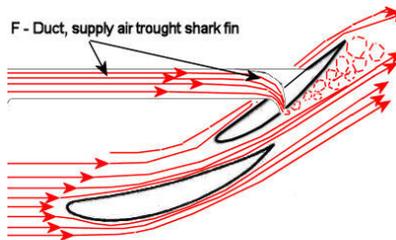
condizione di resistenza minore (con ala stallata, riduzione di carico deportante quindi di vortici di estremità) rispetto alla situazione di ala non stallata. In quest'ottica rientrava l'utilità dell'F-Duct, o “ala soffiata”, costituito da un condotto che correva lungo tutta la monoposto per poi collegarsi all'elemento superiore dell'alettone posteriore (Fig. 32 e Fig. 33). Il condotto presentava un buco nell'abitacolo del pilota, verso il quale era convogliato il flusso. Con un movimento del ginocchio della gamba sinistra, la quale è generalmente usata per azionare il pedale del freno, il pilota chiudeva il buco dello scarico del flusso nell'abitacolo, cosicché questo seguisse la via principale del condotto fino all'elemento superiore dell'ala (denominata in gergo semplicemente *flap*).



**Fig. 32** Andamento del flusso lungo l'F-Duct, Ref. [11]



**Fig. 33** Particolare di F-Duct sulla McLaren MP4-25, Ref. [16]

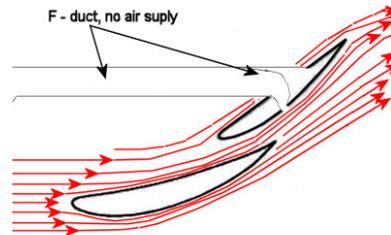


**Fig. 34** Andamento del flusso con F-Duct attivo, Ref. [11]

Questo movimento veniva eseguito su rettilineo, dove la gamba non era impegnata nell'azionamento del freno: quando il ginocchio ostruiva il passaggio dell'aria nell'abitacolo, questa raggiungeva la fine del condotto e veniva incanalata nello spazio presente tra le due superfici alari che componevano l'alettone. La presenza di tale flusso aggiuntivo rispetto a quello che normalmente lambiva la superficie provocava una variazione di pressione sul dorso invertito della seconda superficie di modo che il flusso non rimanesse nella condizione attaccata ma separasse facendo stallare l'ala (Fig. 34). L'aumento della resistenza di forma dell'ala veniva controbilanciato con una significativa diminuzione della *downforce* e dunque una diminuzione della resistenza indotta, con un conseguente aumento della velocità di punta stimato intorno ai 3-7 km/h

### 2.3 Dispositivi che influenzano il flusso intorno all'alettone

(cfr. Ref. [11]). Quando invece la vettura seguiva la sua traiettoria lungo le curve del tracciato, dove un maggior carico è richiesto, il flusso all'interno del condotto aveva funzione refrigerante per il pilota, seguendo il percorso primario fin dentro l'abitacolo. L'ala assumeva dunque il comportamento di progetto in condizioni non stallate (Fig. 35).



**Fig. 35** Andamento del flusso con F-Duct inattivo, Ref. [11]

L'espedito aerodinamico adottato dalla McLaren difatti non viola il regolamento in quanto nessuna superficie è mobile rispetto al flusso dell'aria: esso costituisce un'innovazione in quanto lo stesso pilota diviene parte attiva nell'interazione con le forze aerodinamiche. Risulta infine chiaro perché, per questo stesso motivo, la Federazione abbia vietato il dispositivo F-Duct appellandosi alla sicurezza e alla possibile mancanza di reattività del pilota nell'azionare il freno in caso di emergenza, essendo questi impegnato nel garantire il funzionamento del dispositivo; allo stesso modo tale sicurezza sarebbe compromessa se, come nel caso della Ferrari F10, l'F-Duct si attivasse tramite l'uso della mano, quanto piuttosto della gamba.

#### 2.3.4 Il DRS (Drag Reduction System) e il DDRS (Double DRS)

Con l'abolizione dell'F-Duct, per l'anno 2011 e fino ad oggi, la Federazione stabilì la possibilità di utilizzare per la prima volta nella storia della Formula Uno un dispositivo aerodinamico mobile regolamentato, il DRS o “ala posteriore mobile”. Le motivazioni dietro tale scelta sono da riscontrare in una sempre maggiore necessità di favorire spettacolo in pista, e quindi sorpassi, a causa di una mancanza degli stessi data l'evoluzione per tutte le scuderie di progetti aerodinamici sempre più fini e sempre più disturbanti per l'aerodinamica delle monoposto avversarie. Il DRS può essere attivato infatti in condizioni di gara solo in uno o due punti determinati dalla direzione di corsa, se e solo

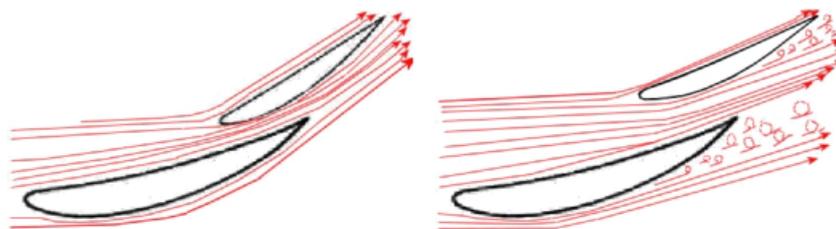


**Fig. 36** Ferrari F138, 2013 Gp Bahrain, Ref. [18]

## 2. Evoluzione storica dell'alettone posteriore

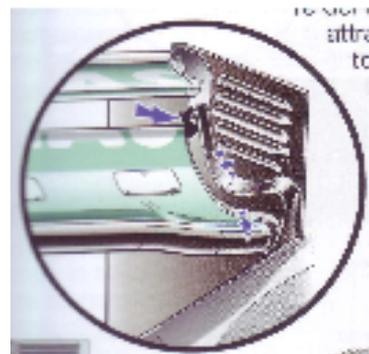
se la vettura in esame ha uno svantaggio rispetto a quella che la precede inferiore al secondo nel momento in cui questa passa per il *DRS Detection Point*. Secondo quanto afferma il regolamento e gli studi condotti dalla FIA e dalle squadre, la sua attivazione garantisce un vantaggio stimato sulla velocità di punta pari a 10 km/h.

Il *flap* dell'ala posteriore subisce una variazione di incidenza che porta l'intera ala a stallare (Fig. 37) e dunque a ridurre la sua resistenza indotta e a risultare particolarmente vantaggiosa sui rettilinei. Il distacco della vena fluida porta come conseguenza una perdita di carico aerodinamico, motivo per cui un suo malfunzionamento potrebbe compromettere l'intera gara come capitato al pilota Fernando Alonso nel Gran Premio del Bahrain 2013, durante il quale l'ala mobile non tornava più in posizione non stallata, causando una perdita di aderenza al posteriore per la F138 (Fig. 36).



**Fig. 37** Comportamento del flusso con DRS disattivato (sinistra) e attivato (destra), Ref. [11]

Interessante è il caso della Mercedes F1 W03 che ha partecipato al campionato di Formula Uno 2012. Questa sfruttava la combinazione dell'attivazione del DRS con un condotto che può essere definito come un F-Duct sull'ala anteriore. A differenza di quanto descritto in 2.3.3, l'F-Duct anteriore era un sistema passivo e sfruttava il diverso angolo di incidenza del *flap* del DRS aperto per convogliare parte del flusso attraverso un foro (Fig. 38) nella paratia laterale lungo un condotto (Fig. 41) fino al *flap* dell'alettone anteriore della monoposto direzionando tramite feritoie (Fig. 39) il flusso al di sotto dell'ala, causando quindi lo stesso

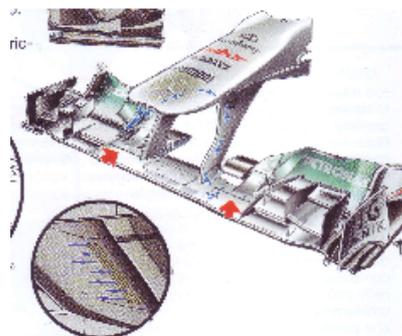


**Fig. 38** Particolare di foro di passaggio aria su DRS, Ref. [7]

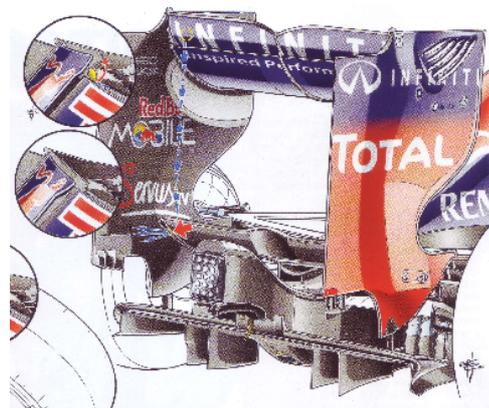
### 2.3 Dispositivi che influenzano il flusso intorno all'alettone

effetto di stallo descritto in precedenza per l'ala posteriore. Quindi, ad una minor resistenza indotta dall'ala posteriore dovuta all'attivazione del DRS, corrispondeva una conseguente minor resistenza indotta sull'ala anteriore, aumentando difatti la velocità di punta della monoposto in maniera più efficiente rispetto alle altre scuderie. Anche in questo caso, poiché il regolamento 2011 prescriveva l'uso del DRS come unico vantaggio aerodinamico in gara attivabile dal pilota, l'implicazione secondaria dovuta all'effetto dell'F-Duct anteriore venne in seguito bandita.

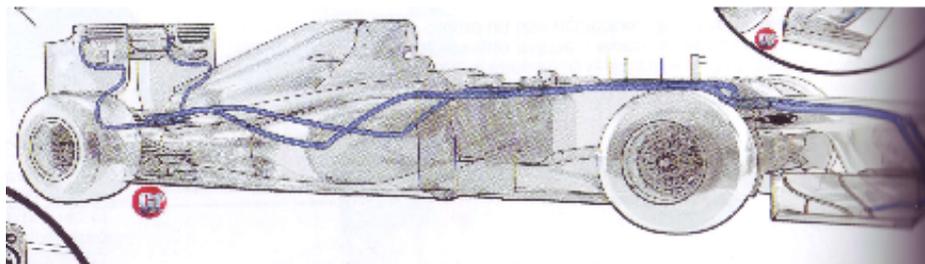
Negli anni successivi, come illustra Ref. [7] per la Lotus e la Red Bull, il DDRS venne riprogettato di modo che, ai limiti di conformità col regolamento, convogliasse il flusso attraverso le paratie laterali dell'alettone posteriore dando allo stesso quantità di moto in uscita, in direzione del flusso uscente dal diffusore. In questo modo, prendendo ad esempio il caso della RedBull RB8, la resistenza di forma della vettura viene ridotta con un concetto differente rispetto al DDRS Mercedes, concetto ammesso nel 2012 dal regolamento (Fig. 40).



**Fig. 39** Alettone stallato dal flusso (frecche blu) proveniente dall'F-Duct Mercedes F1 W03. Nel tondo, particolare delle feritoie (frecche rosse) sul dorso dell'ala anteriore, Ref. [7]

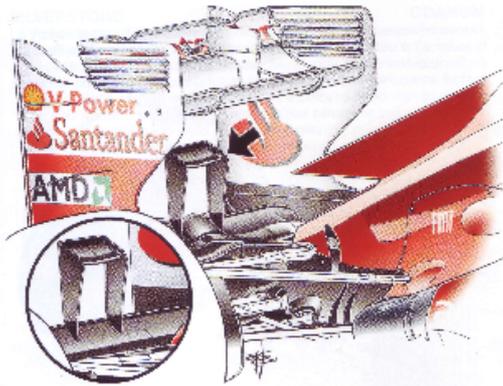


**Fig. 40** DDRS RedBull RB8, 2012, Ref. [7]



**Fig. 41** Sistema F-Duct anteriore o DDRS, Ref. [7]

### 2.3.5 Il Monkey seat



**Fig. 42** Monkey seat adottato sulla Ferrari F2012, 2012, Ref. [7]

l'alto (*upwash*) e la sua integrazione col flusso che lambiva il dorso dell'ala posteriore combinata con una minor resistenza di forma della monoposto, generata in quanto non veniva investita dall'aria nelle condizioni di monte indisturbate.

Sebbene siano chiari i suoi vantaggi, durante gli anni le scuderie non hanno sempre optato per questa soluzione, concentrando i loro sforzi su alettoni posteriori sempre più performanti. Tuttavia, in seguito alle variazioni regolamentari che hanno via via ridotto la deportanza generata dalle superfici alari variandone collocazione e dimensione, la maggior parte delle scuderie ha sopperito a tale mancanza adottando nuovamente il monkey seat, di cui è un esempio la Fig. 42. Questo è diventato cruciale nel 2014, in seguito al passaggio ai motori V6 turbo, caratterizzati da una maggior coppia motrice all'asse posteriore, cosa che in mancanza di un carico sufficiente avrebbe aumentato gli effetti di sovrasterzo per le monoposto.

### 3.1 Il metodo dei pannelli, XFOIL e XFLR5

## 3. Analisi di profilo e di ala rettangolare derivata della Chaparral 2E

### 3.1 Il metodo dei pannelli, XFOIL e XFLR5

Per lo studio aerodinamico del profilo cui siamo interessati ci avvarremo di XFOIL, sviluppato dal gruppo MIT di Mark Drela, programma *open source* multiplatforma che permette di studiare le caratteristiche di profili in condizioni subsoniche sia viscosi che inviscidi.

Il metodo utilizzato da XFOIL è noto come metodo dei pannelli. In base alla teoria dei profili sottili di Glauert, questi possono essere studiati come distribuzione di vortici e sorgenti che rispecchino bene l'effetto dello spessore, dell'inarcamento e dell'incidenza del profilo. Tuttavia ciò è valido in un ristretto intervallo per piccoli angoli di incidenza, piccoli spessori e piccoli inarcamenti che ci permettono di studiare il profilo con una distribuzione di vortici e sorgenti posti sulla linea media dello stesso.

Un passo successivo a questa teoria è rappresentato dal metodo dei pannelli. In questo caso il profilo viene discretizzato in un numero finito di segmenti perché possa avere applicazioni computazionali. In analogia con la teoria di Glauert, il potenziale nel caso di fluido inviscido può essere definito come la somma di una corrente indisturbata di monte e del potenziale perturbato, dovuto alle variazioni geometriche e d'assetto del profilo in questione. Considerando il profilo come una spezzata di segmenti, questi divengono generatori di sorgenti per i quali si può valutare il potenziale indotto ad una certa distanza dagli stessi. In questo modo il potenziale totale comprende sia il contributo del flusso indisturbato di monte che dell'integrale lungo la forma del profilo:

$$\phi_P = Ux + \oint \sigma_Q \ln(R) ds_Q \quad (1)$$

dove  $\sigma_Q$  è l'intensità della sorgente in ogni pannello per un punto Q, R la distanza tra ogni pannello e un punto P in cui si calcola il potenziale  $\phi_P$ , U la velocità della corrente indisturbata.

I punti di congiungimento tra ogni pannello sono chiamati nodi mentre il punto su ogni pannello su cui è posta la sorgente è detto punto di collocazione (cfr. Ref. [3]).

### 3. Analisi di profilo e di ala rettangolare derivata della Chaparral 2E

Applicando successivamente la condizione di velocità tangente al bordo del profilo, quindi annullando la componente normale di velocità per ogni pannello, è possibile scrivere le componenti tangenziali e normali della velocità secondo un sistema di riferimento intrinseco su ciascun pannello; queste componenti risultano indotte e proporzionali all'intensità delle sorgenti degli altri pannelli per mezzo di due coefficienti di influenza, uno normale  $N_{ij}$  e uno tangenziale  $T_{ij}$ . Considerando tutti i pannelli, si possono riassumere i suddetti ragionamenti in forma matriciale.

X-Foil nello specifico considera inoltre una distribuzione di vortici oltre che di sorgenti, aggiungendo la condizione di Kutta al bordo di fuga per chiudere le equazioni.

Nel calcolo viscoso, Xfoil si avvale delle due equazioni di strato limite normalizzate (conservazione della massa e della quantità di moto) con sistema di equazioni differenziali non lineari ellittiche (cfr. Ref. [22]) che tengano conto della condizione di comprimibilità, a differenza di quelle paraboliche di Prandtl per strato limite laminare (2) e per l'analogo turbolento (cfr. Ref. [3]). La resistenza di scia è valutata sulla base dello spessore della quantità di moto (3) a valle del profilo.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

$$\theta = \int_0^{\infty} \frac{u}{U_e} \left(1 - \frac{u}{U_e}\right) dy \quad (3)$$

Nelle equazioni  $u$  e  $v$  sono le velocità nello strato limite rispettivamente lungo  $x$  e  $y$ ,  $p$  la pressione, e  $U_e$  la velocità del fluido al di fuori di questo. La transizione è valutata sulla base del metodo  $e^n$  sviluppato da Smith e Gamberoni, descritto in Ref. [3].

Per il calcolo tridimensionale la seguente analisi ha usufruito di un potenziamento di AVL, estensione di Xfoil sempre sviluppata da Drela, chiamato XFLR5, sviluppato da Deperrois, che integra un metodo ai pannelli per l'intera superficie alare con le polari viscoso calcolate a diversi numeri di  $Re$  desunte da Xfoil (motivo per cui spesso una mancata importazione delle polari ai numeri di  $Re$  d'interesse può portare l'analisi al di fuori dell'involucro di volo). Si ricordi che qualsiasi metodo computazionale non può

### 3.2 Risultati dell'analisi

prescindere da una correlazione con dati sperimentali, tenendo bene a mente gli obiettivi del progetto e i risultati teorici attesi, a causa dell'intrinseca imprevedibilità, o meglio non linearità, del problema aerodinamico.

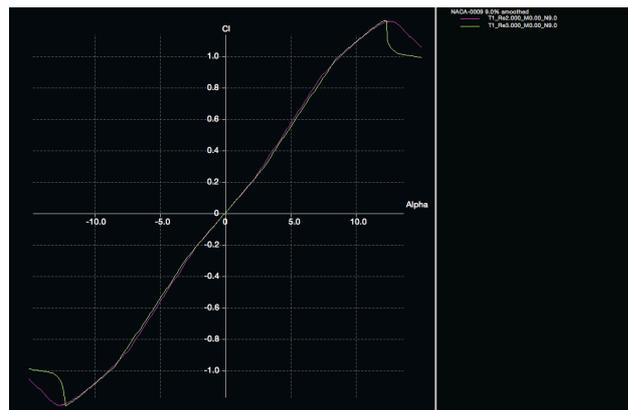
### 3.2 Risultati dell'analisi

Corda	0.661 m
Apertura alare	1.829 m
Superficie alare	1.209 m <sup>2</sup>
Allungamento alare	2.77
Altezza da terra	1.448 m

**Tab. 1:** Specifiche geometriche ala Chaparral 2E

Per l'analisi effettuata, ci si è basati sui dati forniti dai fratelli Milliken in Ref. [2]: l'alettone posteriore della Chaparral 2E descritto nel paragrafo 2.1 del presente elaborato presenta le stesse specifiche della successiva Chaparral 2G della quale erano forniti i dati. L'ala è un'ala rettangolare desunta da un profilo molto vicino al NACA 0008-0009, e veniva posta ad angolo di incidenza nullo nel caso di condizione a minima resistenza, mentre con un angolo negativo di 12° per la massima deportanza. Le specifiche geometriche dell'ala sono riportate nella Tabella 1.

L'analisi effettuata ha il compito di confrontare la variazione delle caratteristiche aerodinamiche tra il profilo NACA 0009 e l'ala rettangolare della Chaparral costruita con XFLR5 secondo queste specifiche. Per lo studio del profilo ci si è valse dell'uso combinato di Xfoil e XFLR5, che utilizza per il caso bidimensionale la stessa routine di calcolo di Xfoil. Sulla scia di quanto fatto in Ref. [2], il numero di Reynolds scelto è pari a  $3 \times 10^6$ . I dati sperimentali di cui discutono i fratelli Milliken sono da attribuirsi a un test condotto nel Midland a una velocità di 100mph, che corrisponde orientativamente a un Re di  $2 \times 10^6$ . Tuttavia, come conferma lo stesso Ref. [2], e come



**Fig. 1** Confronto  $C_l$ -alfa per  $Re 2 \times 10^6$  e  $3 \times 10^6$

### 3. Analisi di profilo e di ala rettangolare derivata della Chaparral 2E

prova la Fig. 1, questa diversa scelta del numero di Re non modifica in alcun modo la pendenza della curva  $C_l$ -alfa. Inoltre occorre sottolineare che un Re di  $3 \times 10^6$  rientra nell'intervallo tipico per i profili alari in ambito motoristico, così come ricorda J. Katz in Ref. [1].

Come nota a margine, si ricordi che i grafici presentati sono stati ricavati da Xfoil o XFLR5 stessi, mentre alcuni sono stati realizzati su MATLAB tramite lettura dei file di testo prodotti dalle analisi sui due programmi precedentemente menzionati, al fine di confrontare le diverse tendenze in esame.

#### 3.2.1 Analisi bidimensionale di NACA 0009

Il NACA 0009 rientra nella famiglia dei profili NACA a 4 cifre sviluppati dalla NASA. Le cifre indicano che il massimo inarcamento percentuale della linea media del profilo è nullo e nulla è la posizione decimale di tale massimo inarcamento; mentre lo spessore massimo del profilo è pari al 9% della corda. Pertanto si tratta di un profilo simmetrico, quindi con direzione di portanza nulla a  $0^\circ$ .

Poiché il caso a  $0^\circ$  è di scarso interesse, i risultati mostrati sono per il caso con incidenza di  $-12^\circ$ . La Fig. 2, mostra l'andamento del  $C_p$  lungo la corda normalizzata del profilo nel caso inviscido e nel caso viscoso. Come prima cosa possiamo notare un abbassamento (in valore assoluto) del picco del coefficiente di pressione minimo, a



Fig. 2  $C_p$ -x di NACA 0009, caso inviscido (tratteggiato) e viscoso

### 3.2 Risultati dell'analisi

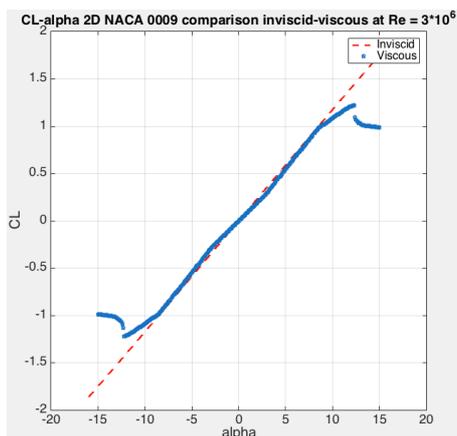
causa della separazione al bordo d'attacco della vena fluida che contorna il profilo sul ventre. Questo è uno degli effetti principali causati dall'avvicinamento alla condizione di stallo del profilo, che riduce sensibilmente il  $C_l$  dello stesso, mentre ne aumenta il  $C_d$ . Nel nostro caso, se lo stallo fosse avvenuto, si parlerebbe di stallo brusco, poiché la separazione ha inizio fin dal bordo d'attacco del profilo.

Un altro dato importante da valutare è la pendenza della curva. Infatti sia nel caso viscoso che in quello inviscido, dopo il picco menzionato, il coefficiente di pressione aumenta lungo la corda normalizzata,

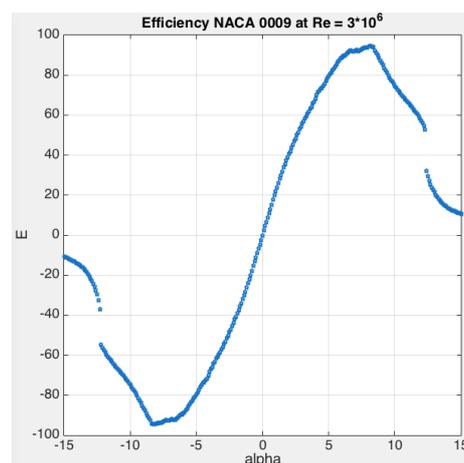
quindi per la maggior parte della corda stessa. Questa è la tipica condizione di gradiente di pressione sfavorevole, in quanto il profilo di velocità di strato limite subisce un rallentamento per effetto della pressione e ne varia la propria forma fino alla condizione critica di transizione a regime turbolento o addirittura a separazione completa. Questo comportamento prova che il NACA 0009 non è un profilo adatto per essere utilizzato ad una così elevata incidenza, cosa che non ci deve stupire per due motivi: innanzitutto l'applicazione per cui era destinato inizialmente era prettamente aeronautica, campo in

Alfa (deg.)	- 12.0°
$C_l$	- 1.2130
$C_d$	0.0211
$C_m$	- 0.0182
$C_{pmin}$	- 12.6808
$X_{tr}/c$ (ventre)	0.0016
$X_{tr}/c$ (dorso)	1.0000
E	57.4981

**Tab. 2:** Parametri NACA 0009



**Fig. 3**  $C_l$ -alfa NACA 0009 viscosa e inviscida



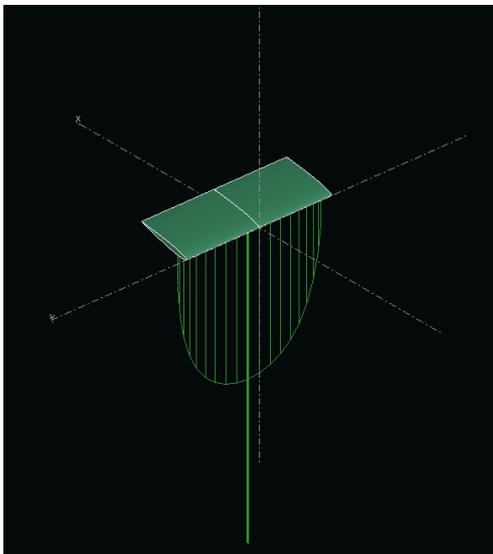
**Fig. 4** Efficienza NACA 0009 a  $Re = 3 \times 10^6$

### 3. Analisi di profilo e di ala rettangolare derivata della Chaparral 2E

cui un'incidenza di  $12^\circ$  è nettamente superiore rispetto alle condizioni di normale operatività; in secondo luogo, si tratta comunque del primo profilo usato per un alettone posteriore nel mondo delle corse. Infine urge una considerazione sullo spessore. Uno spessore massimo pari al 9% della corda non rientra propriamente nel caso di profilo molto sottile, ma nemmeno troppo spesso: un elevato spessore può variare la pendenza teorica della curva  $C_l$ -alfa, aumentandola, ma un profilo sottile permette uno stallo ritardato e valori più elevati del  $C_{lmax}$ .

Per quanto riguarda la curva  $C_l$ -alfa, la Fig. 3 mostra nuovamente il confronto tra caso viscoso e pendenza teorica inviscida, pari a  $2\pi$ . Per gli angoli negativi di nostro interesse, lo stallo viene raggiunto per un valore di  $-12.2^\circ$ , angolo molto vicino al nostro  $-12^\circ$ . Nella condizione operativa che stiamo considerando inoltre, la Tabella 2 riassume i valori dei principali parametri aerodinamici. A giustificare il possibile campo di operatività del profilo a  $-12^\circ$  interviene la Fig. 4, che mostra l'efficienza (rapporto tra  $C_l$  e  $C_d$ ) rispetto all'angolo alfa.

#### 3.2.2 Analisi dell'alettone posteriore della Chaparral 2E

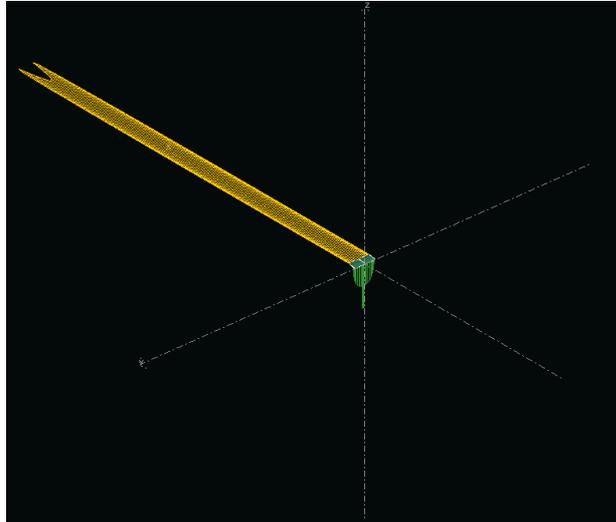


**Fig. 5** Distribuzione di deportanza sull'ala

L'ala considerata ha una superficie alare rettangolare, angolo di diedro nullo e svergolamento nullo. Essa è l'estensione del profilo NACA 0009 con un allungamento alare o *aspect ratio* pari a 2.77 e investita da una corrente indisturbata a velocità pari a 68.1 m/s, ovvero con un  $Re$  di  $3 \times 10^6$ . La distribuzione di deportanza dell'ala è mostrata in Fig. 5, ma questa sembra quasi trascurabile se confrontata con la resistenza indotta, visibile in Fig. 6. I dati mostrati si basano sul metodo di calcolo di XFLR5 derivato dalla teoria della linea portante (LLT) di Prandtl, per cui il filamento vorticoso analogo alla teoria dei profili sottili di Glauert debba richiudersi su se stesso (per rispettare i teoremi di Helmholtz) generando

### 3.2 Risultati dell'analisi

all'estremità dell'ala dei vortici di estremità che chiuderanno il filamento all'infinito (cfr. Ref. [3]). La resistenza indotta è, in queste ali a basso allungamento alare tipiche del *motorsport*, la componente di resistenza principale e quindi molto spesso condiziona il progetto come evidenziato nei paragrafi 2.3.3 e 2.3.4 del presente elaborato. L'effetto di *downwash* generato dalla velocità indotta dai vortici di estremità (che come richiamato in precedenza è in



relazione alla circuitazione dei vortici di estremità secondo la legge di Biot-Savart) ha un effetto drastico

**Fig. 6** Comparazione tra distribuzione di portanza e di resistenza indotta

principalmente sulla pendenza della curva  $C_L$ -alfa, non più pari alla teorica e massima pendenza di  $2\pi$ , pertanto occorre un fattore correttivo  $k$  minore di 1. Inoltre, non essendo in condizioni di ala a distribuzione di portanza ellittica (piana non ellittica e ala non svergolata), la velocità indotta non è costante lungo l'apertura alare e di conseguenza non lo è l'angolo di incidenza  $\alpha_i$ , per cui l'incidenza non dipende dal solo  $\alpha_a$  aerodinamico. Quindi la distribuzione di portanza lungo l'ala segue la legge di variazione dettata dall'equazione integro-differenziale di Prandtl, dove  $l$  è la corda:

$$\Gamma(y) = k(y) \pi V_\infty l(y) (\alpha_a(y) - \alpha_i(y)) \quad (4)$$

Dalla teoria delle ali a distribuzione di portanza ellittica, è possibile notare la diminuzione dovuta all'allungamento alare  $\lambda$  e il valore di questa pendenza teorica:

$$\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} = \frac{2\pi}{1 + 2/\lambda} \quad (5)$$

L'ausilio di MATLAB permette il confronto tra il profilo isolato e l'ala isolata (Fig. 7) e

### 3. Analisi di profilo e di ala rettangolare derivata della Chaparral 2E

di notare la già citata variazione di pendenza.

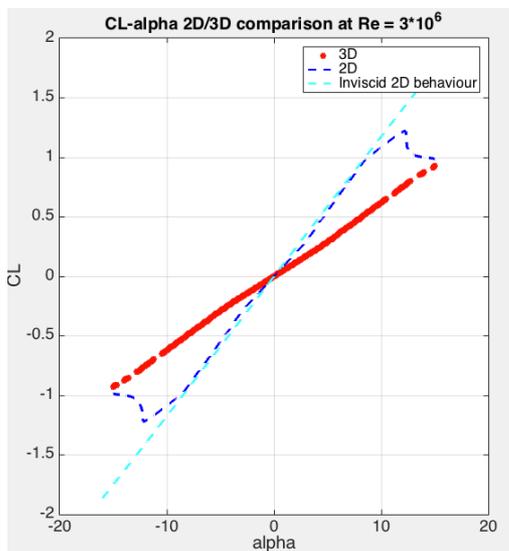
Inoltre, poiché il calcolo dei casi bidimensionali agli elevati angoli di incidenza di stallo ha una soluzione divergente per numeri elevati di iterazioni, la curva del caso tridimensionale non mostra l'andamento dopo lo stallo. Notiamo anche che per un allungamento reale si verifica quello che ci aspettiamo anche teoricamente, ovvero uno stallo ritardato per l'ala, seppur con  $C_{L,max}$  minori. Per le caratteristiche aerodinamiche si veda la Tabella 3.

Alfa (deg.)	- 12.0
$C_L$	- 0.7511
$C_D$	0.0742
$C_M$	0.1897
E	10.1226

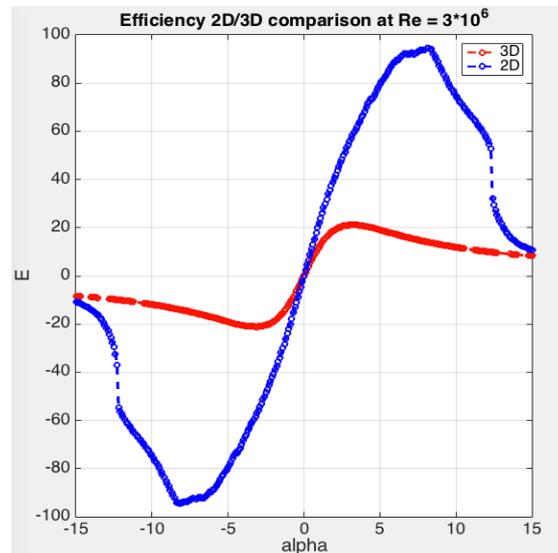
**Tab. 3: Parametri ala**

Infine è fornita la polare (Fig. 9), in cui è possibile notare l'andamento parabolico per piccoli angoli di incidenza in virtù della dipendenza dal quadrato del coefficiente di portanza (motivo per cui si chiama resistenza indotta), e l'efficienza (Fig. 8), di gran lunga inferiore rispetto al caso bidimensionale.

A ulteriore riprova dell'influenza predominante in queste condizioni della resistenza indotta piuttosto che quella di forma e quella d'attrito, si consideri la Fig. 10.

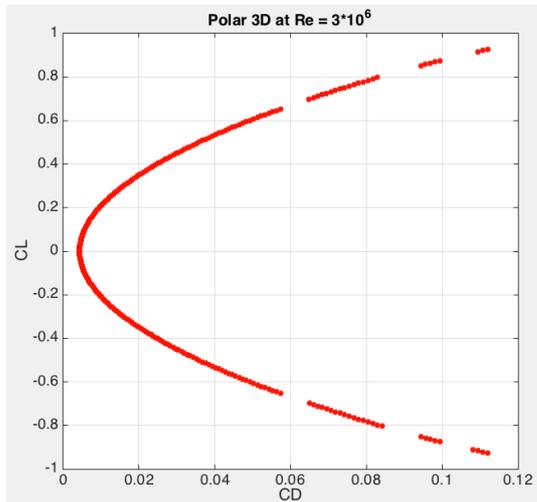


**Fig. 7**  $C_L$ -alfa comparazione 2D e 3D

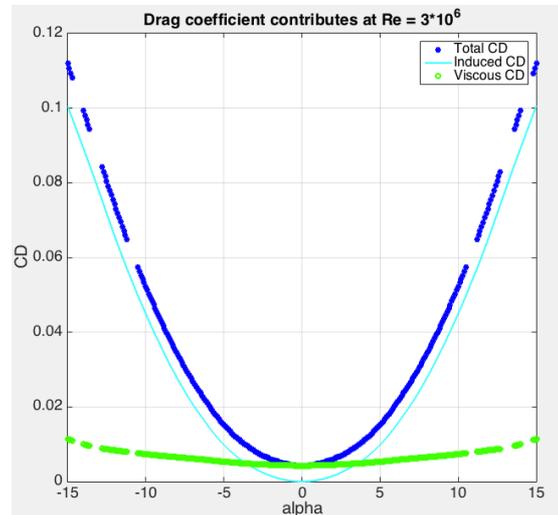


**Fig. 8** Efficienza comparazione 2D e 3D

### 3.2 Risultati dell'analisi



**Fig. 9** Polare dell'ala



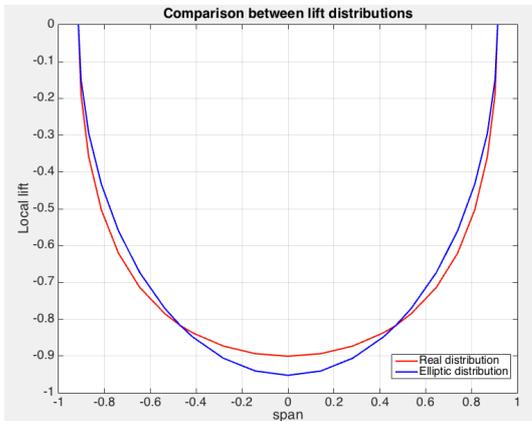
**Fig. 10** Natura dei contributi al  $C_D$

Infine è interessante prendere in considerazione la distribuzione di portanza dell'ala. Questa è strettamente legata alla circuitazione  $\Gamma(y)$  e dalla Fig. 11 si può notare come il suo andamento sia vicino a quello di una distribuzione di portanza ellittica associata. Le due distribuzioni hanno in comune la stessa portanza generata, ovvero lo stesso integrale definito calcolato lungo l'apertura alare, cosa che equivale ad affermare che, in merito alla Fig. 12, la porzione di area di colore giallo è la stessa di quella di colore verde. Questo viene spiegato dal fatto che, secondo la teoria di Prandtl, una qualunque distribuzione di portanza può essere vista come una serie di Fourier di armoniche, ma il coefficiente di portanza dipende solo dal coefficiente  $a_1$  della prima armonica secondo la relazione:

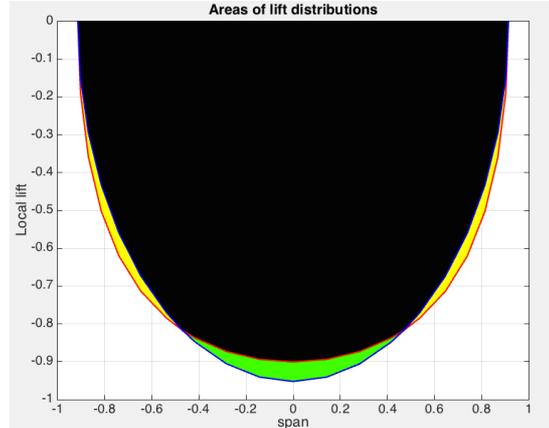
$$C_L = \frac{\pi}{2} a_1 \lambda \quad (6)$$

Pertanto, poiché la prima armonica corrisponde alla distribuzione di portanza ellittica, questa ha stesso  $C_L$  e stessa portanza della distribuzione reale. Le altre armoniche che portano alla formazione della nostra distribuzione di portanza hanno un contributo nullo sulla totale portanza generata, ma influiscono sulla resistenza indotta, che ha un minimo per la distribuzione ellittica.

### 3. Analisi di profilo e di ala rettangolare derivata della Chaparral 2E



**Fig. 11** Comparazione tra distribuzione di portanza reale ed ellittica



**Fig. 12** Aree delle distribuzioni di portanza

### 3.3 Conclusioni

Dai dati emersi, se pensiamo che modernamente il  $C_L$  del retrotreno può arrivare a valori pari -2.00, notiamo che l'ala in questione, primo caso di interesse in ambito motoristico, ha un'efficienza minore di quanto si può ottenere attualmente. Per migliorare l'ala comunque, non solo basterebbe variarne l'architettura tramite profili *multi-element* o l'ausilio di paratie laterali, le cui proprietà sono state già evidenziate. In prima istanza infatti, un semplice cambiamento del profilo può già variare le condizioni di operatività, e in questo campo profili come quelli della famiglia Liebeck ad alta portanza, e in particolare quelli che operano in condizioni prettamente turbolente (tipiche del caso motoristico), sono adatti allo scopo, innanzitutto perché prevedono un inarcamento che garantisce deportanza anche a angoli nulli di incidenza (cosa che spesso si fa col profilo principale dell'alettone).

Per quanto riguarda l'uso di XFLR5, la teoria della linea portante di Prandtl non risulta adeguata per lo studio della nostra ala, in quanto questa è uno strumento potente nell'analisi di ali ad elevato allungamento alare, quali possono essere ad esempio quelle degli alianti, a differenza di un alettone di Formula Uno in generale, e in particolare

### *3.3 Conclusioni*

come il nostro, con allungamento pari a 2.77. Infatti, quanto più è elevato questo valore, tanto più ci si avvicina alle condizioni del caso bidimensionale, motivo per cui le paratie verticali all'estremità risultano utili in quanto aumentano l'allungamento fittizio.

Lo studio effettuato vuole essere una base di partenza nel valutare la prima architettura del profilo da utilizzare in ambito motoristico, un'architettura utile solo in una situazione di avamprogetto. Tuttavia, come ampiamente trattato nei precedenti capitoli, le ali non possono prescindere dai vantaggi operativi connessi all'effetto suolo, e quindi sono necessari strumenti di calcolo più potenti che valutino l'interazione col terreno. Inoltre, limitarsi alla mera valutazione dei coefficienti dell'ala è un'analisi fine a se stessa, in quanto ancora più importante, specialmente in Formula Uno, è valutare il comportamento del flusso sulle superfici antistanti e le conseguenze che minime deflessioni di tali superfici possono causare, analisi che abbiamo potuto trascurare in virtù della posizione sopraelevata dell'ala.

Complessivamente, l'intera valutazione aerodinamica della velatura alare e il suo inserimento nel corpo vettura ha un altro grande limite progettuale: un regolamento sempre mutevole e aerodinamicamente limitante, fino ad essere spesso assurdo, senza considerare le ovvie implicazioni in termini di costo che hanno le ore spese in galleria del vento e le ore spese a trovare il bandolo della matassa tra simulazione CFD e dati sperimentali fino ai test in pista. Infatti, seppur il numero di Reynolds costituisce un basilare fattore di scala da cui partire, i test effettuati su modelli in scala risentono di comportamenti diversi, come ad esempio la transizione turbolenta a  $0.2 \times 10^6$  Re per le ali finite. A questo proposito si consiglia di partire dal Ref. [1] per un primo approccio alla tematica.

*3. Analisi di profilo e di ala rettangolare derivata della Chaparral 2E*

## Riferimenti bibliografici

- [1] Katz J., *Race Car Aerodynamics*, Bentley Publishers, 2005
- [2] Milliken W. P., Milliken D. L., *Race Car Vehicle Dynamics*, SAE Inc, 1995
- [3] Houghton E. L., Carpenter P. W., Collicott S. H., Valentine D. T., *Aerodynamics for Engineering students*, Butterworth-Heinemann imprint of Elsevier, 2013
- [4] Toet W., *Aerodynamic testing of open wheeled racing cars*, 2004
- [5] Zhang X., Toet W., Zerihan J., *Ground effect Aerodynamics race cars*, 2006
- [6] Toet W., *Aerodynamics and aerodynamic research in Formula One*, 2013
- [7] Piola G., *Formula Uno 2012-2013. Analisi tecnica*, Giorgio Nada Editore, 2013
- [8] <http://www.95customs.com/>
- [9] Mc Cabe G., *Explanation and discovery in aerodynamics*, 2008
- [10] Ashby M., Shercliff H., Cebon D., *Materiali. Dalla scienza alla progettazione ingegneristica*, Casa Editrice Ambrosiana, 2009
- [11] <http://www.formula1-dictionary.net/>
- [12] Mortel, *Cranfield F1 team: the front wing*, 2003
- [13] <http://www.ferraridatabase.com>
- [14] <http://forum.motorionline.com>
- [15] [en.wikipedia.org](http://en.wikipedia.org)
- [16] <http://www.f1technical.net>
- [17] Beccari, *Macchine*, C.L.U.T. Editrice, 1991
- [18] [www.autosport.com](http://www.autosport.com)
- [19] [www.f1analistechnica.com](http://www.f1analistechnica.com)
- [20] Bellomo N., De Angelis E., Delitala M., *Mathematical modelling in applied sciences*, SIMAI e-Lecture notes, 2008
- [21] Hill P., Peterson C., *Mechanics and Thermodynamics of Propulsion*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 2010
- [22] Drela M., *XFOIL 6.9 User Primer*, MIT Aero and Astro Harold Youngren, Aerocraft, Inc., 2001