



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

A.A. 2023/2024

Sessione di Laurea Settembre 2024

L'evoluzione della deportanza sviluppata dalle monoposto di Formula 1

La fisica del fenomeno e le soluzioni ingegneristiche adottate

Relatore:

Prof Fulvio Boano

Candidato:

Giuseppe Martire

Abstract

In questa tesi è affrontata l'evoluzione cronologica di uno dei fattori prominenti dell'aerodinamica delle vetture di Formula 1: la deportanza.

In primo luogo, viene contestualizzato sul piano fisico il fenomeno, accentuato in prossimità di profili alari. In linea con i contenuti teorici della Meccanica dei fluidi, il teorema di Bernoulli assume il ruolo di un potente strumento al fine di offrire una spiegazione fisica.

A seguire, la parte più cospicua della trattazione, assume carattere divulgativo e tecnico nel ripercorrere le innovazioni e le soluzioni ingegneristiche che, a partire dagli anni '60 sino allo scoccare dell'era turbo ibrida, hanno reso possibile lo sviluppo della deportanza erogata dalle monoposto anche in funzione dei cambiamenti di regolamento imposti dalla Federazione Internazionale dell'Automobile.

Per una divulgazione tecnico-scientifica quanto più aderente alla realtà, il riferimento imprescindibile è quello di Adrian Newey: l'ingegnere più vincente nella storia della Formula 1, autore del testo autobiografico *How to build a car* (adattato in lingua italiana nell'edizione intitolata *Come ho progettato il mio sogno*) in cui racconta la sua impareggiabile carriera attraverso le monoposto che ha progettato e che, a sua volta, ha visto progettare.

Indice dei contenuti

Abstract.....	3
Indice dei contenuti.....	4
1. Analisi del fenomeno.....	5
2. Correlazioni tra deportanza e resistenza all'avanzamento.....	9
3. Introduzione alla deportanza nella Formula 1	
3.1 L'adozione dell'ala posteriore.....	12
3.2 La scoperta dell'effetto suolo.....	13
4. Tecnologie favorevoli allo studio della deportanza: wind tunnel e pitture flow-vis.....	17
5. Soluzioni innovative per l'incremento di deportanza	
5.1 Leyton House 88I: ala anteriore a profilo continuo.....	20
5.2 Williams FW14B ed FW15C: le sospensioni attive.....	21
6. Limitazioni e tentativi di recupero del carico aerodinamico	
6.1 Regolamenti atti a limitare la deportanza sviluppata.....	25
6.2 McLaren MP4 20 - Problem&Solution.....	26
6.3 Brawn GP 001- Problem&Solution	28
7. Considerazioni finali sull'avvento dell'era turboibrida.....	31
Bibliografia figure.....	32
Bibliografia testi.....	33

1. Analisi del fenomeno

Per far accelerare un'auto da corsa ed aumentarne la massima velocità raggiungibile è necessaria la combinazione di alcuni fattori: una buona potenza meccanica, una bassa resistenza all'avanzamento e che la massa da spostare sia quanto più esigua possibile. Tuttavia, quel che potrebbe sembrare un mix di obiettivi facilmente conseguibili è ulteriormente complicato dalla “meccanica dello sterzare”.

Quando un'auto si appresta ad affrontare una curva, i suddetti fattori non sono sufficienti a garantire la corretta riuscita della manovra: è necessario che l'auto aderisca al terreno quanto più possibile per vincere la forza centrifuga che la spingerebbe verso l'esterno.

È qui che entra in gioco la deportanza: la si definisce come forza aerodinamica agente su corpo investito da un fluido in moto rispetto ad esso (aria nel caso dei veicoli) con l'effetto finale di generare una spinta verso il basso, facendo di fatto aderire la vettura con l'asfalto. La deportanza è il risultato della forma aerodinamica della macchina: pur trattandosi di una forza che punta verso il suolo, è possibile aumentarne l'effetto senza dover necessariamente aumentare la massa dell'automobile stessa.

Rientra fra gli obiettivi di chi progetta lo *chassis* quello di far sì che una vettura generi quanta più deportanza possibile in fase di curva: maggiore è la deportanza, maggiore sarà la velocità massima di percorrenza della curva senza che la forza centrifuga prenda il sopravvento.

Questo aspetto è diventato significativo quando i progettisti di auto hanno scoperto i vantaggi conseguibili mediante l'adozione di profili alari “rovesciati” rispetto a quelli aeronautici, sia ispirando ad essi la forma macroscopica delle vetture, sia introducendo appendici aerodinamiche la cui forma richiamasse questo genere di profilo.

La natura di questi vantaggi può essere spiegata servendosi del teorema di Bernoulli. Contestualizzabile con la dinamica dei fluidi ideali, il teorema di Bernoulli pone in relazione, lungo una traiettoria di fluido, le seguenti grandezze: quota verticale del fluido nel punto considerato (**h**), pressione esercitata dal fluido nel punto considerato (**p**), densità del fluido (**ρ**) e velocità del fluido nel punto considerato (**v**).

L'equazione di Bernoulli $h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \text{costante}$ sancisce che il carico totale lungo una traiettoria si conservi, ma affinché tale relazione abbia riscontri di validità devono essere verificate le seguenti ipotesi relative al sistema fluido considerato:

- il fluido deve essere approssimabile ad un fluido perfetto. Ragionando sull'equazione indefinita della dinamica, il tensore degli sforzi deve avere sforzi tangenziali nulli o trascurabili;
- la forza di massa agente sul sistema fluido deve essere la forza di gravità;
- il fluido si deve muovere in condizioni di moto permanente;

- il fluido deve essere incompressibile;

L'aria (intesa come sistema fluido) consente di apportare un'ulteriore semplificazione all'equazione di Bernoulli dal momento che è caratterizzata da moto irrotazionale quando investe un corpo in movimento rispetto ad essa. Ciò significa che, una volta definito il suo vettore di velocità \vec{v} nello spazio, è possibile affermare che:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \text{ (fluido incompressibile)}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{v} = 0 \text{ (moto irrotazionale)}$$

Quella poc'anzi descritta è la condizione che sancisce i moti a potenziale (fluido incompressibile + moto irrotazionale).

Essendo ancor più restrittiva della condizione di fluido perfetto, rende possibile la seguente riformulazione del teorema di Bernoulli: il carico totale si mantiene costante anche lungo traiettorie disposte a diversa quota di altezza (h), così che la seguente relazione – divincolata da h – sia valida in ogni punto dello spazio che viene investito dal fluido:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = p^0 = \text{costante}$$

Tale riformulazione pone in relazione il contributo di pressione ed il contributo cinetico assumendo, come da ipotesi, che la densità rimanga costante per l'approssimazione a fluido incompressibile. [1]

Pur non essendo l'aria un fluido incompressibile, è dimostrabile che per bassi valori di M_a l'errore che si consegue utilizzando Bernoulli per fluidi comprimibili è circa trascurabile. Viene definito il numero di Mach per gas perfetti come il rapporto tra la velocità del fluido in movimento e la velocità del suono ad esso associato:

$$M_a = \frac{c}{a_s} = \frac{c}{\sqrt{\gamma RT}}$$

In caso di fluido comprimibile, la relazione che lega la pressione totale al contributo cinetico ed alla pressione statica assume la seguente forma, in dipendenza dal numero di Mach:

$$p^0 = p + \frac{1}{2}\rho c^2 \cdot \frac{2}{\gamma M_a^2} \left[\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot M_a^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} - 1 \right]$$

Il tutto è riscrivibile con uno sviluppo di Taylor-Mac Laurin nel caso in cui le velocità del fluido siano relativamente basse, cioè quando $M_a \rightarrow 0$.

$$\lim_{M_a \rightarrow 0} p^0 = p + \frac{1}{2}\rho c^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{4} \cdot M_a^2 + o(M_a^2) \right)$$

Tale sviluppo rende possibile confrontare la formulazione sopracitata per fluidi comprimibili con quella precedentemente esplicitata con ipotesi di fluido incomprimibile. [2]

È possibile constatare che, per numeri di Mach sufficientemente piccoli, l'errore che si commette ragionando su un fluido comprimibile (come l'aria) adottando ipotesi di fluido incomprimibile è di poche unità percentuali poiché la quantità sviluppata con Mac Laurin non si discosta dal valore unitario:

- $M_a = 0,2 \Rightarrow$ l'errore che si commette usando Bernoulli con un fluido comprimibile è $\frac{1}{4} \cdot 0,2^2 = 0,01 \Rightarrow 1\%$
- $M_a = 0,3 \Rightarrow$ l'errore che si commette usando Bernoulli con un fluido comprimibile è $\frac{1}{4} \cdot 0,3^2 = 0,0225 \Rightarrow 2,25\%$
- $M_a > 0,3 \Rightarrow$ l'errore che si commette usando Bernoulli con un fluido comprimibile non è più trascurabile

Restringendo la trattazione al campo di interesse per valutare il fenomeno della deportanza, si considera un flusso d'aria con velocità rispetto al corpo investito non superiore ai 300 km/h alla temperatura ambiente di circa 298,15K. Valutando il numero di Mach in tali circostanze si ottiene:

$$M_a = \frac{c}{a_s} = \frac{c}{\sqrt{\gamma RT}} \approx 0,24$$

Verificato che il numero di Mach si attesti su valori sufficientemente piccoli, la formulazione proposta a partire dal teorema di Bernoulli risulta essere la più adatta per indagare sulla fenomenologia dei flussi d'aria, nel caso specifico in cui questi investano un profilo alare di una vettura in movimento.

Quando un profilo alare rovesciato è investito da un flusso d'aria, il suo bordo d'entrata separa il fluido in due porzioni, una superiore ed una inferiore. Nella porzione superiore, definita intradosso, il flusso d'aria rallenta, al contrario di quanto accade nella zona sottostante, definita estradosso, dove la curvatura dell'ala causa l'accelerazione del fluido.

Sulla base del legame individuato tra contributo di pressione e contributo cinetico nella formulazione di Bernoulli per fluidi incomprimibili, è possibile constatare che in corrispondenza nella parte superiore del profilo, dove l'aria rallenta, tale diminuzione del termine cinetico si traduce in un conseguente aumento di pressione. In maniera diametralmente opposta, in corrispondenza del profilo inferiore dove l'aria accelera, l'aumento del termine cinetico si traduce in una diminuzione di pressione.

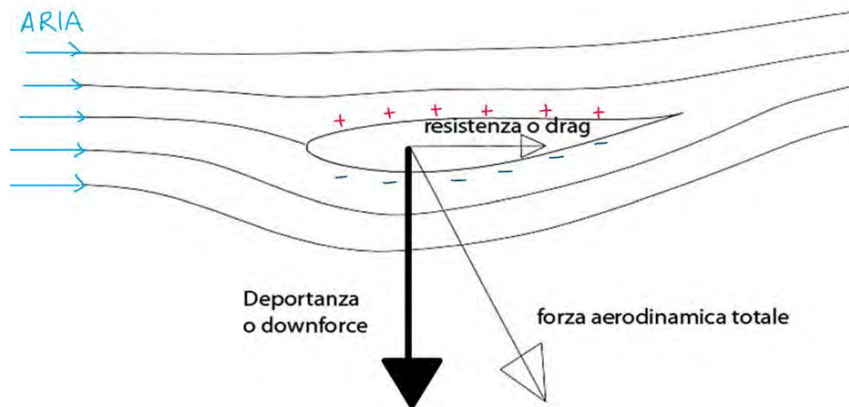


Figura 1: forze aerodinamiche generate da un profilo alare

La differenza di pressione che si genera tra i due semiprofilo alari è la ragione a monte di una spinta risultante, orientata dalla zona di alta pressione verso quella di bassa pressione, nonché dall'alto verso il suolo (figura 1).

Sulle vetture aerodinamicamente più prestazionali, questo fenomeno non concerne solamente profili alari installati nelle zone anteriori e posteriori, ma diventa opportuno concepire l'intera automobile con un profilo a goccia, decisamente simile a quello alare. È per tali ragioni che, quando si parla di monoposto di Formula 1 moderne, questa spinta verso il basso non può essere trascurata perché il design aerodinamico è concepito con il fine ultimo di massimizzarla.

2. Correlazioni tra deportanza e resistenza all'avanzamento

Per una completa contestualizzazione della deportanza (anche definita *downforce*), è doveroso precisare che non si tratta dell'unica forza aerodinamica prodotta dall'interazione veicolo-aria in condizioni di moto relativo: ad essa è strettamente connessa la forza di resistenza (o *drag*) orientata parallelamente rispetto al moto.

Affinché un'auto risulti prestazionale, in fase di progettazione, si cerca di minimizzare la resistenza all'avanzamento (al contrario di quanto accade con la deportanza). Tuttavia, alcuni elementi strutturali concepiti al fine di generare *downforce* – si pensi all'ala posteriore delle vetture moderne – sono inevitabilmente caratterizzati da un proprio ingombro spaziale: questo ingombro si traduce in una maggiore superficie del veicolo, destinata ad essere investita dalle linee di flusso del fluido in cui si sta muovendo e, dunque, una maggiore superficie resistente che può a sua volta contribuire nella formazione di turbolenze.

In sostanza, per poter godere di una buona deportanza, bisogna ammettere una certa resistenza all'avanzamento, dal momento che i due aspetti sono strettamente correlati. Entrambi i contributi sono esprimibili attraverso coefficienti adimensionali: vengono definiti C_L coefficiente di deportanza (o lift) e C_D coefficiente di resistenza (o drag).

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho v^2 \cdot A} \qquad C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho v^2 \cdot A}$$

Spesso, anche nelle trattazioni di tipo automobilistico, si utilizza il termine *lift* che indica la portanza (ovvero una forza diretta verso l'alto) eventualmente con annesso segno opposto per indicare la deportanza. Il termine è riconducibile al campo aeronautico, dove i profili alari sono concepiti con la finalità di generare portanza. [3]

Nelle formulazioni riportate, F_L e F_D sono le rispettive forze di *lift* e *drag* (esprese in Newton) generate dall'interazione tra il fluido ed il corpo in movimento, mentre A è la superficie investita dal fluido, più semplicemente detta area frontale (espressa in m^2).



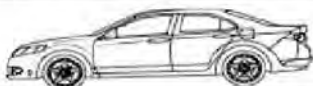
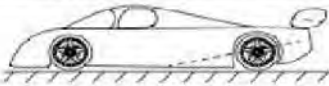
			C_L	C_D
1	Low drag body of revolution		0	0.04
2	Low drag vehicle near the ground		0.18	0.15
3	Generic automobile		0.28	0.35
4	Prototype race car		-3.00	0.75

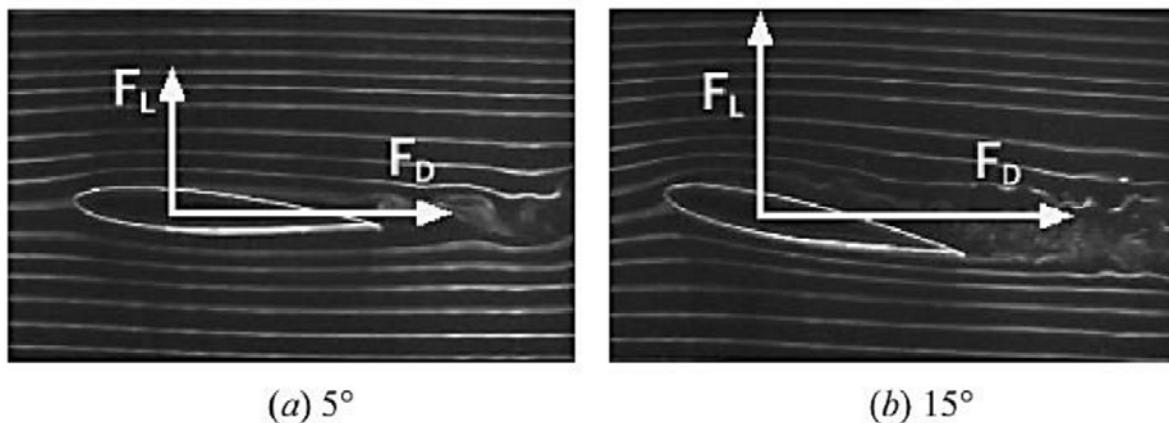
Figura 2: coefficienti di lift e drag valutati per diversi profili

Il rapporto tra lift e drag, valutato per un certo profilo, è un valore chiave che definisce l'efficienza aerodinamica del sistema considerato: quanto meno cospicua risulta essere la resistenza all'avanzamento ottenuta per conseguire un fissato valore di deportanza, migliore sarà l'efficienza aerodinamica complessiva.

Sulla correlazione tra F_L ed F_D , generate in prossimità di un profilo alare, un ruolo non trascurabile è ricoperto dall'angolo d'attacco (o angolo di incidenza), opportunamente individuabile come l'angolo tra la corda del profilo alare e la direzione del flusso d'aria che investe il profilo.

Sperimentalmente, si osserva che la portanza (o deportanza qualora il profilo alare fosse rovesciato) generata da un profilo può notevolmente aumentare incrementando l'angolo di attacco.

Figura 3: lift & drag al variare dell'angolo d'attacco del profilo alare

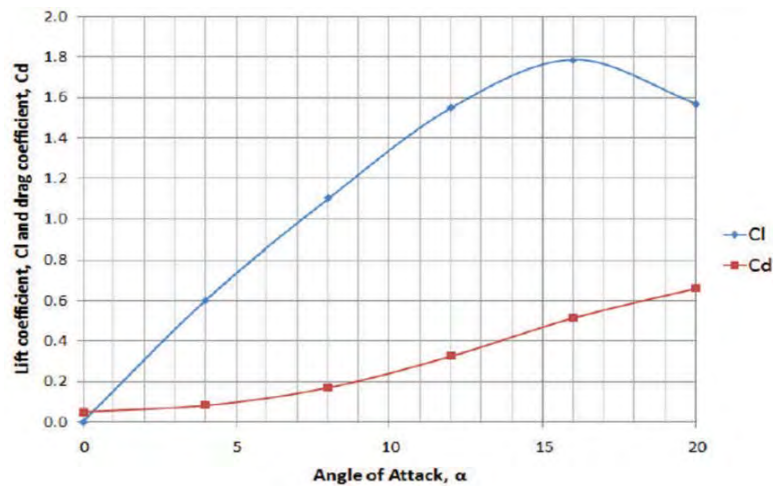


Come riportato in figura 3, per valori d'angolo d'attacco crescenti, aumenta l'ingombro trasversale del profilo alare: poiché C_D è inversamente proporzionale alla superficie investita dal flusso, si osserverà un incremento del coefficiente di *drag* per valori crescenti dell'angolo d'attacco. D'altronde, è alquanto intuitivo che la resistenza aumenti passando da una situazione di corpo affusolato (figura 3a) ad una situazione che tende ad una piastra inclinata (figura 3b).

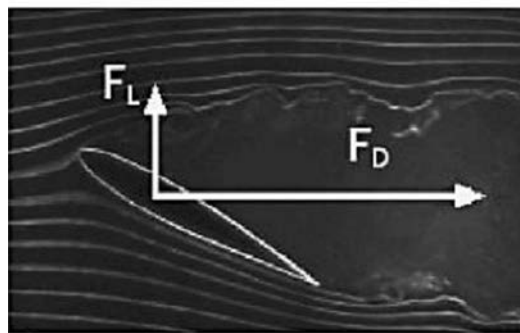
Tale incremento di resistenza all'avanzamento può essere tollerato finché si consegue il beneficio di una maggiore portanza, altresì riscontrabile in un considerevole aumento di C_L associato al profilo.

La portanza aumenta perché, nel caso (b), aumentano le linee di flusso che impattano sulla porzione inferiore dell'ala rispetto al caso (a): una maggior quantità di linee di flusso vede la propria energia cinetica (quella del fluido indisturbato) convertirsi in energia di pressione su base della relazione offerta da Bernoulli. Pertanto, in presenza di una più accentuata differenza di pressione tra i due semiprofilo, la spinta verticale indirizzata dalla zona di più alta pressione verso quella di bassa pressione, sarà maggiore.

Figura 4: andamento dei coefficienti di lift & drag al variare dell'angolo d'attacco



Tuttavia, in corrispondenza di angoli di incidenza maggiori rispetto al caso (b), è possibile osservare un massimo valore di portanza. Oltre questo punto di massimo, aumentare ulteriormente l'angolo di incidenza non apporta alcun beneficio aerodinamico dal momento che C_D aumenta e C_L diminuisce.



(c) 30°

Figura 5: lift & drag al variare dell'angolo d'attacco del profilo alare

Le circostanze poc'anzi descritte per angoli di incidenza considerevoli – come riportato in figura per il caso (c) – si verificano a causa della separazione dello strato limite rispetto alla corda del profilo alare: la formazione di una scia a valle del profilo implica che la pressione di quella stessa zona (dove le linee di flusso non riescono a richiudersi) non è considerevolmente più bassa rispetto alla pressione esercitata dall'aria a monte del profilo.

Logicamente, in assenza di una consistente differenza di pressione tra le due zone, l'effetto della portanza sarà notevolmente ridotto rispetto ai casi precedenti ed il tutto avverrà in condizioni di ingombro maggiore sul piano trasversale.

3. Introduzione alla deportanza nella Formula 1

3.1 L'adozione dell'ala posteriore

Quello della deportanza è stato un aspetto poco studiato nelle corse automobilistiche fino agli anni Settanta. Neanche lontanamente preso in considerazione negli anni Quaranta e Cinquanta, ha suscitato le prime attenzioni quando, negli anni Sessanta, le squadre aggiunsero gli spoiler alle vetture, particolarmente a Le Mans.

Le monoposto di Formula 1 hanno iniziato a generare una significativa deportanza ispirandosi ad un alettone posteriore introdotto nel 1966 sulla Chaparral 2E di Jim Hall, ingegnere e pilota americano che, per la sua vettura (che compete in campionati statunitensi), aveva preso letteralmente ispirazione dai velivoli.

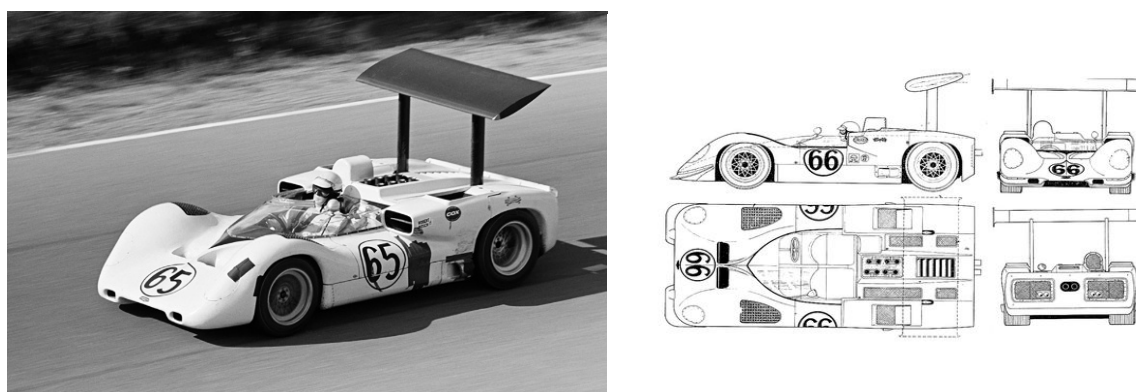


Figura 6: 1966 Chaparral 2E car design

Come già accennato, gli aeroplani si sollevano in aria perché le ali hanno una curvatura tale da consentire all'aria di scorrere a velocità differenti sui due semiprofilo, sviluppando bassa pressione su quello superiore e alta pressione su quello inferiore. Il risultato è una spinta che chiamiamo portanza positiva.

L'alettone posteriore su una macchina da corsa si basa sullo stesso principio ma, avendo un profilo rovesciato rispetto a quello degli aerei, spinge ulteriormente la macchina verso terra consentendo alle ruote di generare maggior *grip* – in linea con quanto constatato nella prima parte della trattazione.

Tali circostanze rendono possibile osservare che l'aria sul semiprofilo ad alta pressione può fuoriuscire dalle estremità dell'ala per cercare di ricongiungersi con la zona a bassa pressione, riducendo in generale l'efficienza dell'intero sistema. La fuoriuscita all'estremità, quando si aggiunge al movimento in avanti del veicolo, crea una spirale: una struttura simile a quella di un tornado definita vortice d'estremità d'ala.

I velivoli (e gli uccelli) riducono questa perdita di efficienza delle loro ali aumentandone l'ampiezza a seconda delle necessità. Sulla base di questa constatazione, il campionato di Formula 1 del 1968 fu caratterizzato da un'ondata di incidenti, principalmente causati dall'esasperata ricerca di una maggiore ampiezza delle ali.

Ali posteriori quanto più lunghe e slanciate, seppur più efficienti ai fini dell'erogazione di *downforce*, erano anche più sollecitate. Di conseguenza, i cedimenti a fatica delle strutture alari erano frequenti durante il corso di una gara con numero elevato di giri da percorrere. Per ovvie ragioni, furono introdotte delle normative che ne limitavano le dimensioni.

A queste limitazioni le squadre risposero con una soluzione che consentisse di aumentare in lieve misura l'efficienza dell'ala posteriore senza dover estremizzarne l'ampiezza: furono introdotte le paratie laterali.

Anche conosciute come *endplates*, vennero concepite appositamente con lo scopo di ridurre le perdite dovute ai vortici d'estremità d'ala. Tale soluzione consisteva in sottili piastre longitudinali in grado di impedire la chiusura dei vortici d'estremità d'ala frapponendosi sul loro percorso di fuoriuscita. Così facendo, agevolavano il mantenimento dell'alta pressione nella zona sovrastante, ulteriormente isolata da quella sottostante.

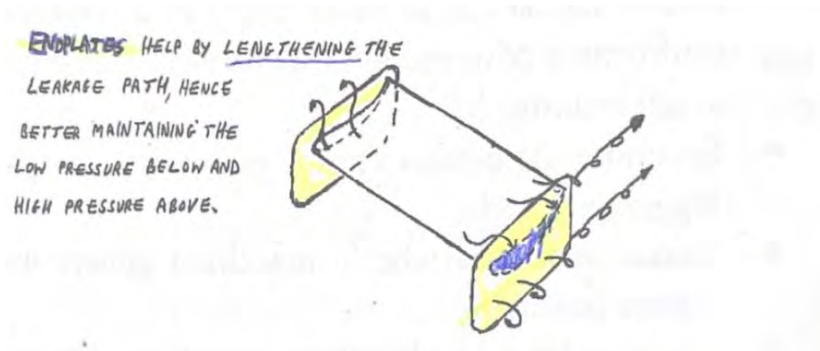


Figura 7: vortici d'estremità d'ala ed endplates (A.Newey 2017)

3.2 I vantaggi dell'effetto suolo

Gli alettoni muniti di paratie laterali assunsero un ruolo di “tecnologia all'avanguardia” dal 1968 e per buona parte del successivo decennio.

Le squadre che competevano per il titolo cercavano di generare una deportanza sempre maggiore conseguendo, tuttavia, scarsi risultati fino al 1977. Si cercava una soluzione al problema di come rendere più efficiente un'ala la cui ampiezza non fosse variabile, poiché a quel tempo imposta dai regolamenti tecnici della competizione.

Interessanti spunti di riflessione sulla questione sono riscontrabili in natura, osservando il comportamento degli uccelli. Si può infatti osservare che i cigni son soliti volare a pelo d'acqua, con le punte delle ali quasi immerse, sfruttando un potente effetto: se le punte delle ali toccano appena la superficie dell'acqua, il percorso di fuoriuscita è sigillato. Il riscontro è quello di una pressione più elevata sotto l'ala, con conseguente aumento della spinta portante.

Il principio alla base del fenomeno descritto è l'effetto suolo: ribaltando il meccanismo, e ragionando su un'ala il cui profilo rovesciato generi deportanza, si ottiene una soluzione estremamente efficace. Esattamente quel che fece la Lotus nel 1977.

L'idea fu quella di trasformare le fiancate dell'auto (anche definite *sidepods* o più semplicemente pance) in un enorme profilo ad ala a ridosso del suolo, sigillata all'estremità inferiore da minigonne laterali scorrevoli.

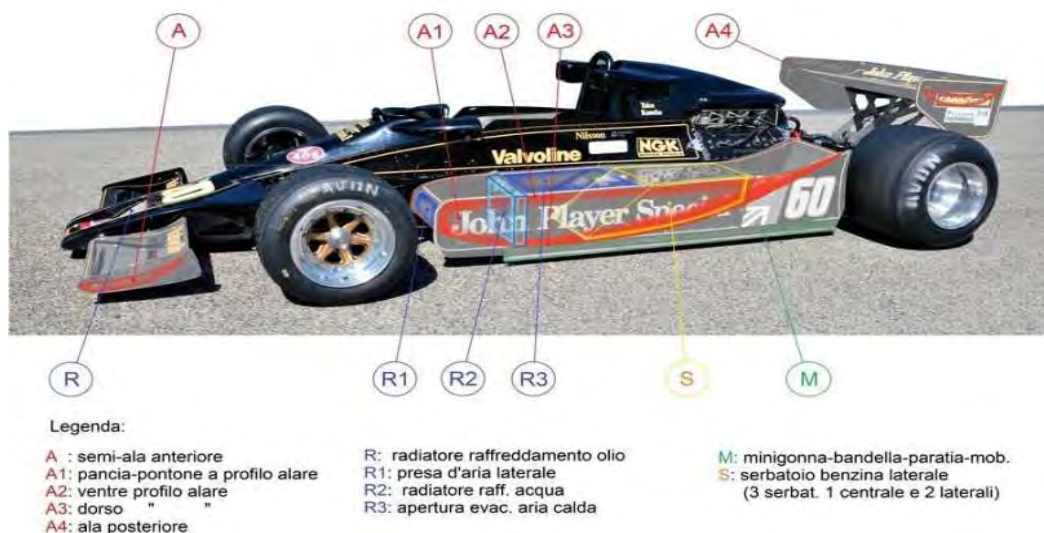


Figura 8: profili alari ed impianti vari della Lotus 78 (1977)

La svolta avvenne durante una prova in galleria del vento, operata dalla Lotus: un tecnico si avvicinò alla vettura mentre era ancora in funzione il ventilatore, e improvvisamente la bilancia misurò un notevole incremento della deportanza. Il tecnico in questione si era reso responsabile di aver appoggiato una cartellina rigida nella zona sottostante alla fiancata del modello in galleria. Così facendo, aveva involontariamente sigillato il fondo e impedito gli effetti di bordo.

Partendo da questo curioso particolare è stata poi partorita l'idea delle minigonne, bandelle laterali elastiche il cui scopo era quello di sigillare il flusso d'aria sottostante alla fiancata con il suolo, riproducendo l'effetto accennato dalla cartellina rigida, ma in maniera decisamente più pronunciata.

Peter Wright, Martin Ogilvie e Tony Rudd sono i tecnici a cui va riconosciuto il merito di aver implementato minigonne su un'auto di Formula 1 ed il conseguente sfruttamento ottimale dell'effetto suolo. Ovviamente, sopra di loro agiva Colin Chapman, fondatore e mente tecnica della Lotus nonché personalità molto spregiudicata nell'adozione di novità tecniche interessanti, definito dal celebre Adrian Newey come un eroe del design aerodinamico. [4]

Ad oggi, l'effetto suolo è anche identificato come "effetto Venturi" in virtù di un'evidente analogia con quanto accade in una tubazione di Venturi: le bandelle laterali sigillavano il flusso d'aria in entrata all'interno di un canale (figura 9) il cui andamento in sezione è del tutto simile a quello di un tubo di Venturi.

Il canale in questione è la conseguenza di una zona opportunamente sagomata in cui transita il fluido, delimitata superiormente dalla fiancata dell'auto, inferiormente del suolo e lateralmente dalla minigonna (quest'ultima posta in posizione tale da essere quasi a contatto con il suolo).

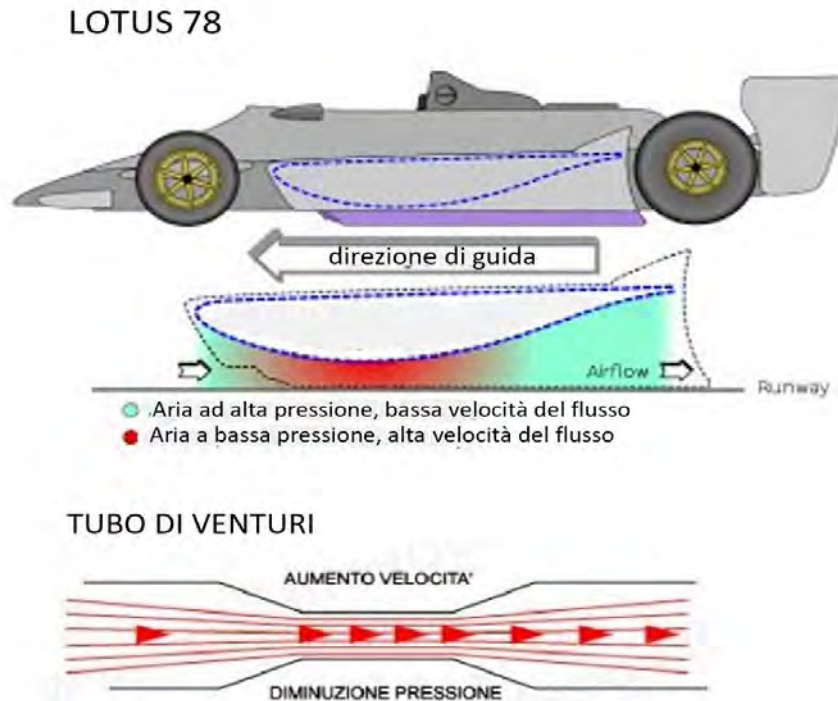


Figura 9: vista laterale della Lotus 78, zona sottostante alla fiancata che funge da canale Venturi

In corrispondenza della strozzatura, posta sotto la fiancata, la sezione è minima; in linea con quanto accade in un tubo di Venturi, anche la pressione dell'aria che vi fluisce dovrà essere minima.

Disegnando il fondo di una vettura come un canale di Venturi e avvicinandolo il più possibile al suolo, si osserva dunque una bassa pressione dell'aria che fluisce immediatamente sotto la fiancata ed una pressione sufficientemente più cospicua sulla superficie immediatamente al di sopra della fiancata stessa. In tali circostanze si consegue un'ulteriore spinta agente in direzione verticale, orientata dalla zona di alta pressione verso quella di bassa pressione: in sostanza, quella descritta, è una spinta deportante.

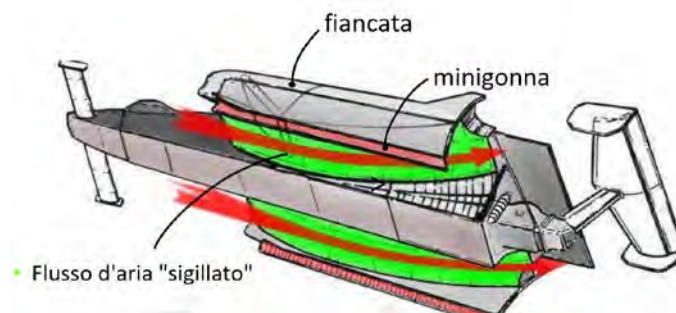


Figura 10: vista dal basso del flusso "sigillato" al suolo da fiancata e minigonne

Per massimizzare i vantaggi dovuti all'effetto suolo, i radiatori furono riposizionati sopra i tubi di Venturi in modo che soffiassero verso l'alto senza interferire con il flusso sotto la vettura. Anche i serbatoi del carburante, all'epoca alloggiati nelle fiancate, furono collocati alle spalle del pilota per destinare il maggiore spazio possibile ai condotti Venturi.

Le minigonne assumevano, dunque, un ruolo cruciale ai fini del corretto funzionamento del sistema: la loro assenza poteva causare la creazione di vortici d'aria che tendono a portare l'aria dalle zone a più alta pressione verso quelle a pressione minore (fenomeno analogo ai vortici d'estremità d'ala che, in assenza di paratie laterali, divengono responsabili di una scarsa efficienza dell'ala posteriore).

Parallelamente, la federazione cercava di limitare l'uso di tali sistemi, sia su pressione delle squadre in condizioni di arretrato sviluppo del sistema, sia per motivi legati alla sicurezza. La posizione delle minigonne era notevolmente a ridosso del suolo: trattandosi di bandelle piuttosto elastiche, garantivano soltanto in maniera altalenante quel "sigillo" necessario per l'effetto suolo, divenendo responsabili di una forza deportante non esattamente uniforme nel tempo. Come conseguenza, i piloti potevano essere più frequentemente soggetti ad errate valutazioni in merito alle velocità con cui affrontare l'ingresso delle curve (o zone di pista non egregiamente livellate in altezza), con maggiori possibilità d'esser catapultati fuori traiettoria. Inoltre, la possibilità che questi elementi potessero staccarsi a vettura in movimento, trasformandosi in oggetti contundenti, era molto alta.

Il significativo aumento delle prestazioni dovuto all'effetto suolo non era stato controbilanciato da un altrettanto efficiente sviluppo dei sistemi di sicurezza sulle monoposto dei primi anni Ottanta. Alcuni incidenti mortali (tra cui quello che vide coinvolto Gilles Villeneuve nel 1982) furono il motivo per cui le vetture di quegli anni vennero considerate eccessivamente pericolose. Per ragioni di sicurezza (sia dei piloti che degli spettatori) la FIA decise, dunque, di bandire definitivamente le minigonne nel 1983, imponendo l'uso del fondo piatto [5]. Ciò si tradusse in una scomparsa dell'effetto suolo, almeno fino al 2022: anno in cui è stato reintrodotta, in virtù di una tangibile affermazione di sistemi di sicurezza all'avanguardia sulle monoposto.

4. Tecnologie favorevoli allo studio della deportanza: wind tunnel e pittura flow vis

Le gallerie del vento hanno rappresentato, sin dagli arbori, un preponderante supporto alla comprensione della performance aerodinamica complessiva di un veicolo senza doverlo costruire in scala reale. Consentono di misurare, impiegando un modello della vettura dalle proporzioni ridotte, quanta deportanza e resistenza all'avanzamento si stia generando per diversi regimi di velocità.

Il funzionamento è basato sul principio di relatività Galileiana: azioni dinamiche esercitate su un corpo in moto traslatorio sono uguali a quelle prodotte su un corpo in quiete ed investito da una corrente d'aria alla stessa velocità.

Contrariamente a quanto accade su pista (dove la vettura si muove e l'aria è approssimabile ad un fluido in quiete), in galleria viene posizionata una ventola di cospicue dimensioni il cui getto d'aria investe il corpo fermo. L'oggetto dello studio, in ambo i casi, è il moto relativo che si instaura tra corpo e fluido.

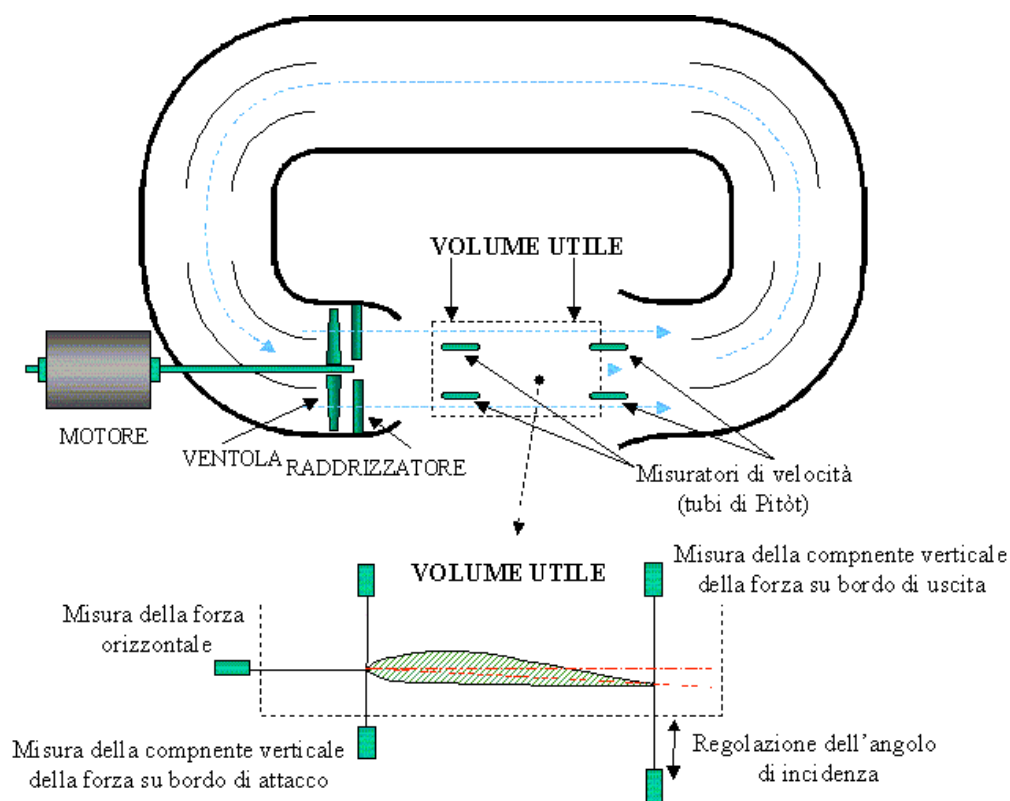


Figura 11: schematizzazione di una galleria del vento

Alla stregua di qualsiasi altra tecnologia, anche i "wind tunnel" non sono esenti dal progresso.

Quando Adrian Newey era coinvolto nello sviluppo dei modelli nella galleria del vento di Southampton: fino al 1990 i modelli erano riprodotti in scala 1:4 (solo successivamente in scala 1:3) e venivano realizzati principalmente in legno montato su

uno scheletro di alluminio. Eventualmente, componenti più minuti (come il diffusore posteriore) venivano realizzati in fibra di carbonio mentre.

Si cercava di riprodurre le giuste forme in scala ma, non essendo il legno durevole quanto la fibra di carbonio, la stabilità dei componenti aerodinamici ed il grado di finitura delle superfici non eccellevano. Le parti in legno venivano realizzate attraverso lavorazioni manuali non certamente prive di errori e le cui tolleranze non erano lontanamente equiparabili a quelle che si conseguono mediante lavorazioni ai macchinari.

Il pavimento del tunnel era un nastro trasportatore ma, nonostante le gomme toccassero terra, il modello non poggiava su di esse; era appeso ad un montante del soffitto e si ricorreva ad una brugola per effettuare rilevazioni in galleria a diverse altezze da terra. Soltanto dopo aver regolato manualmente la brugola e le incidenze dei profili alari del modello si rendeva opportuno procedere soffiando aria sul modello attraverso la ventola per la durata di circa dieci minuti, sufficienti a rilevare valori di deportanza, resistenza e *momento di beccheggio* (una grandezza che consentiva di stimare il modo in cui la deportanza si distribuisse tra l'asse anteriore e quello posteriore della vettura).

Le sospensioni adottate in galleria consentivano alle ruote di muoversi lungo l'asse verticale senza disporre di molle, ammortizzatori ed altri elementi interni.

Come riportato dal plurititolato ingegnere britannico, le gallerie del vento si sono evolute nel corso degli anni ed assieme ad esse anche la raffinatezza delle soluzioni tecnologiche che vengono sperimentate in questi ambienti. Al giorno d'oggi si dispone di risorse e potenze di elaborazioni ai computer tali da poter confrontare le rilevazioni effettuate in galleria del vento sia con simulazioni CFD (fluidodinamica computazionale) basate sull'analisi numerica, sia con le rilevazioni su pista che avvengono mediante dei trasduttori che misurano la pressione su molteplici superfici aerodinamiche della vettura.

La differenza tra i risultati della galleria del vento rispetto a quelli ottenuti in pista è ad oggi piuttosto esigua. Compito degli ingegneri è quello di identificare scrupolosamente eventuali differenze e tentare di eliminarle.

A tal proposito, una delle tecnologie più sfruttate in galleria del vento per carpire informazioni ancor più dettagliate circa la direzionalità dei flussi d'aria che investono il modello è indubbiamente la pittura Flow-Vis. La soluzione in questione è composta da polvere fosforescente (in origine utilizzata per monitorare il flusso d'acqua nelle fogne) ed una miscela di paraffina ed olio. Viene spalmata sulle superfici d'interesse aerodinamico e, quando investita da flussi d'aria, si creano delle strisce di paraffina. Evaporando, queste strisce di paraffina rivelano pattern che indicano la direzione e la forza del flusso d'aria sulla superficie.

Trattandosi di un fluido viscoso, esercita notevole resistenza allo scorrimento sulle pareti che ne vengono cosparse. Tale proprietà consente di estendere il suo campo di

operatività anche alla pista, in occasione di test e sessioni di prove libere in cui le vetture vengono verniciate senza il rischio che la sostanza fluida si disperda. Al contempo, risulta doveroso prestare attenzione alla quantità di vernice applicata poiché un eccesso potrebbe causare pozzanghere in corrispondenza della curvatura delle superfici, mentre un'insufficienza di vernice rende difficile la raccolta delle informazioni desiderate.

Indubbiamente, la vernice Flow-Vis riveste un ruolo di maggiore importanza in era moderna nello studio dei flussi d'aria impattanti sulle vetture di Formula 1, dal momento che la serie ha imposto restrizioni ai test in galleria del vento (legate ai piazzamenti in campionato, al fine di attenuare il divario tecnologico tra i team) dopo il 2021.



Figura 12: superfici cosparse da vernice Flow-vis

5. Soluzioni innovative per l'incremento di deportanza

5.1 Leyton House 88I: ala anteriore a profilo continuo

Come conseguenza dell'eliminazione delle minigonne, il regolamento degli anni successivi al 1983 prevedeva che tutta la carrozzeria visibile sul lato inferiore della macchina fosse piatta, a partire dalla tangente posteriore alla ruota anteriore fino alla tangente anteriore alla ruota posteriore. Dal punto di vista strutturale, queste limitazioni escludevano la possibilità di intervenire sulla parte centrale della vettura per elaborare profili deportanti.

L'ala anteriore, invece, presentava margini di sviluppo: sino ad allora era stata concepita nella forma di due semiali, una destra ed una sinistra, congiunte da un tubo relativamente flessibile che passa attraverso il musetto.

Correva l'anno 1987 quando Adrian Newey, in fase di progettazione della Leyton House 88I (che avrebbe gareggiato in Formula 1 l'anno seguente), individuò le criticità pertinenti l'ala anteriore nel modo in cui era stata sino a quel tempo concepita. Nelle vesti di direttore tecnico del team, intuì che un profilo d'ala continuo per tutta la sua lunghezza (senza interruzioni nella zona mediana su cui si inserisce il musetto) avrebbe garantito il conseguimento di una maggiore spinta deportante sull'asse anteriore della vettura. Il progetto della 88I fu il primo, in Formula 1, ad ispirarsi a questo concetto: in tal modo, anche la parte centrale dell'ala avrebbe assolto alla funzione di generare carico aerodinamico, cosa che prima non accadeva.

Per attuare quest'idea partorita sul banco da disegno, fu necessario alzare di alcuni centimetri la posizione dei piedi del pilota e realizzare il telaio con una sezione quanto più possibile a V, in modo tale da avere la struttura terminale del musetto totalmente al di sopra dell'ala senza interromperne la continuità.

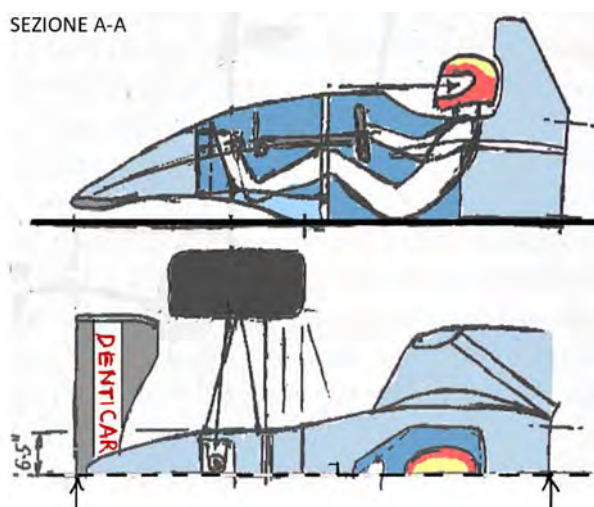


Figura 14: vista sezionata Leyton House 881
(A.Newey 2017)



Figura 13: Leyton House 881 su pista

Le soluzioni adottate sulla 88I ebbero una risonanza non indifferente se si considera che, tra le auto che montavano un motore aspirato da 580 CV, fu l'unica in grado di avvicinarsi prestazionalmente alle rivali di testa che disponevano di un più costoso motore turbo V6 che erogava ben oltre 900 CV. Quello che poteva parere un divario incolmabile fu dunque attenuato da innovazioni finalizzate ad un aumento della deportanza.

La Leyton House era in sostanza passata da un'auto che aveva efficienza aerodinamica (rapporto *downforce/drag*) pari circa a 2 nel 1987, ad un'auto che nel 1988 presentava un rapporto poco superiore a 3: ben più del 50% di deportanza erogata a parità di resistenza all'avanzamento.

5.2 Williams FW14B ed FW15C: le sospensioni attive

Durante la marcia, le velocità in gioco v variano repentinamente causando una spinta deportante F_L anch'essa variabile, diretta verso il basso.

Questa forza si rende responsabile della compressione delle sospensioni automobilistiche a cui è associata un'altezza da terra h , soggetta a innumerevoli variazioni durante la marcia, principalmente dovute alle diverse velocità.

In galleria del vento è stato possibile constatare che, fissata una velocità v , l'aerodinamica funziona più efficacemente (nel senso che produce un massimo quantitativo di deportanza possibile) in un intervallo specifico e molto ristretto di altezze da terra $F_{L,\max} = F_L(h^*)$.

La conclusione logica a queste evidenze è la seguente: per poter godere dell'erogazione di una massima forza di deportanza $F_{L,\max}$ in maniera prolungata, sarebbe auspicabile che la vettura si mantenga costantemente in quell'intervallo di altezze da terra h^* . Affinché ciò avvenga, si necessita di una condizione di moto quanto più prossima a quella di rettilineo uniforme. Questa idealizzazione è ben distante dalla realtà, specialmente considerando che sui rettilinei vige una condizione di continua accelerazione, mentre in curva le vetture decelerano fino al punto di corda per poi accelerare nuovamente. Eventuali sconnessioni o dislivelli dell'asfalto rafforzano ulteriormente il concetto che mantenere costante l'altezza da terra della vettura in fase di marcia possa essere pura astrazione.

In questo contesto si colloca una fra le innovazioni più sensazionali della storia del motorsport a carico di Patrick Head e del solito Adrian Newey (nel 1992 capo progettista della Williams), che presentarono al mondo il sistema ingegneristico delle "sospensioni attive" installato sulla FW14B.

Il principio delle sospensioni attive prevedeva l'utilizzo di una pompa connessa al motore per generare pressione idraulica. Per ciascuna sospensione, la pressione viene esercitata su un attuatore idraulico (figura 15), collegato alla ruota mediante il puntone, nonché il braccetto obliquo della sospensione al cui movimento corrisponde una variazione dell'altezza da terra della vettura. L'idea, pertanto, era quella di controllare la pressione dell'olio nel circuito dedicato per attivare l'attuatore, al fine di neutralizzare (con il movimento del puntone) le variazioni dell'altezza da terra durante la marcia dell'auto.

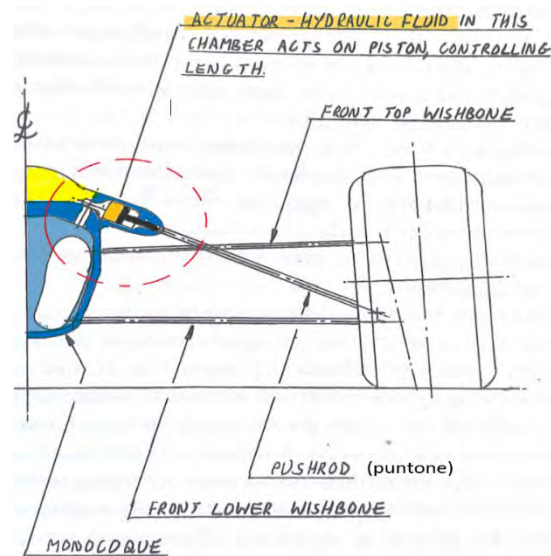


Figura 15: componenti della sospensione attiva (A.Newey 2017)

L'intero sistema era finalizzato al conseguimento di un'altezza della vettura rispetto al suolo molto più costante, indipendentemente da cosa stesse facendo la macchina. Ad esempio, valutandone le dinamiche di funzionamento in caso di brusca frenata, si osserva che l'avantreno della monoposto punta normalmente verso il basso a causa della decelerazione ma gli attuatori anteriori si allungano sotto effetto della pressione del fluido per compensare la variazione d'altezza mentre l'esatto opposto accade con gli attuatori posizionati sulla sospensione posteriore.

Gli attuatori idraulici reagiscono alla rotazione laterale del telaio in fase di curva (anche nota come rollio), ed all'inclinazione in avanti e indietro della scocca rispettivamente in frenata e in accelerazione (comunemente nota come beccheggio).

Il sistema di cui era provvista la FW14B (figura 16) non era di tipo 'full-active': prevedeva ancora il sistema molla-ammortizzatore per assorbire le asperità dell'asfalto. Oltre al rollio ed al beccheggio, anche le asperità stradali sono responsabili di una variazione dell'altezza da terra durante la marcia. Tuttavia, sviluppare una sospensione "full-active" in grado di rendere l'altezza da terra dell'auto indipendente dalle asperità stradali, avrebbe altresì significato sviluppare un sistema idraulico di risposta ad altissima frequenza poiché l'input di un dislivello (o dosso stradale) può essere dell'ordine di pochi millisecondi.



Figura 16: sospensioni attive della Williams FW14B

In Williams, invece, il sistema era stato concepito per lavorare a frequenze minori, lasciando alla parte meccanica della sospensione (molla ed ammortizzatore) l'assorbimento delle irregolarità del tracciato.

Per la realizzazione del sistema fu però necessario un intenso lavoro di sviluppo sul fronte dell'elettronica di controllo: a Steve Wise e Paddy Lowe bisogna riconoscere il merito di aver progettato una centralina provvista della funzionalità combinata di registrazione dei dati (per acquisire le informazioni esterne circa le forze agenti sulle sospensioni), e gli algoritmi di controllo. Adrian Newey contribuì in fase di installazione con l'idea di manopole di regolazione all'interno dell'abitacolo, così che i piloti potessero regolare le altezze da terra con la macchina in movimento. A tale scopo fu prevista l'installazione di tre manopole: una per l'altezza da terra anteriore che si desidera avere in una curva a bassa velocità, una per l'altezza da terra anteriore ad alta velocità ed una per l'altezza posteriore.

Il potenziale delle sospensioni attive inaugurava la strada a un controllo in corsa dei parametri di assetto, che venne ulteriormente affinato in fase di realizzazione della monoposto dell'anno successivo, la FW15 del 1993.

Il salto prestazionale garantito dal perfezionamento delle sospensioni attive è ben riassunto nelle parole di Mark Hughes: “La Williams FW15C ostentava un incremento del rapporto deportanza-resistenza aerodinamica del 12% rispetto alla FW14B, a dispetto del cambio regolamentare del 1993 che ridusse la carreggiata delle Formula 1 da 2.0 a 1.8 metri e che impose un'altezza da terra minima per gli endplates dell'ala anteriore. Questi cambiamenti, uniti alle ruote posteriori ristrette, avrebbero dovuto rendere la FW15C più lenta della sua progenitrice, ma nei fatti era significativamente più veloce su quasi ogni pista”. [6]



Figura 17: Williams FW15C in pista

Nel binomio 1992-93 la soluzione delle sospensioni attive valse due titoli mondiali per la Williams: con una macchina “attiva” così competitiva, i rivali McLaren, Ferrari e Benetton presentarono le loro vetture con le sospensioni attive già nel '93 conseguendo, tuttavia, scarsi risultati.

Per il 1994, in un contesto in cui ormai le sospensioni attive erano divenute l'epicentro di un dibattito tecnico, la FIA invocò l'articolo 3.15: già facente parte del regolamento sin dal 1968, fu introdotto per limitare gli incidenti causati dalle eccessive dimensioni delle ali posteriori delle vetture. L'articolo recita: “La carrozzeria deve essere

rigorosamente attaccata alle pareti sospese della vettura e deve rimanere immobile rispetto ad essa” e la federazione riteneva che i pistoncini idraulici installati sulle sospensioni per renderle “attive” non fossero immobili rispetto alle parti sospese della vettura (poiché azionati idraulicamente), decretandone l’abolizione.

6. Limitazioni e tentativi di recupero del carico aerodinamico

6.1 Regolamenti atti a limitare la deportanza sviluppata

Gli anni Novanta sono stati caratterizzati da profondi cambiamenti regolamentari, in direzione di una chiara e netta riduzione della deportanza generata dalle monoposto di Formula 1. Tale degenerazione dei regolamenti prevedeva sempre più regole che indicavano, con dovizia di particolari, dove dovesse esserci carrozzeria, dove non poteva esserci ed in alcune aree persino quale forma dovesse assumere: un approccio estremamente simile a quello che i massimi campionati hanno mantenuto tutt'oggi.

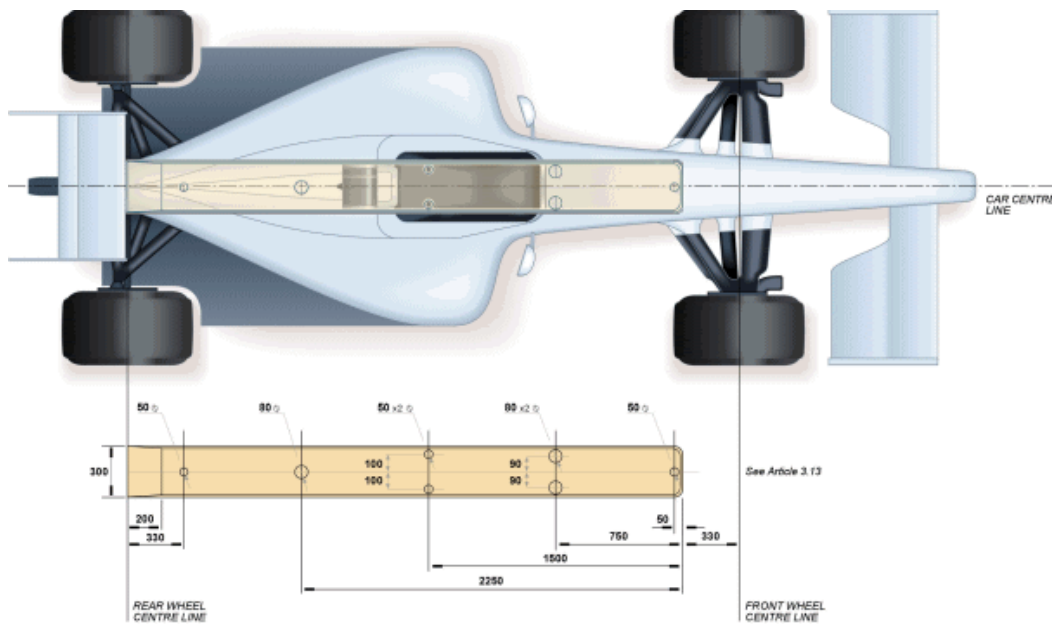
Il ridimensionamento delle paratie anteriori, finalizzato al conseguimento di una forma più semplice, e l'abolizione delle sospensioni attive (sulla base dell'articolo 3.15) furono i primi fattori che evidenziarono una maggiore difficoltà nel conseguire livelli ottimali di carico aerodinamico sulle monoposto del 1994.

Tuttavia, l'ago della bilancia che fece pendere in direzione di un'ulteriore limitazione alla deportanza generata dai profili aerodinamici delle vetture fu senza ombra di dubbio la scomparsa di Roland Ratzenberger e quella di Ayrton Senna durante lo stesso fine settimana di gran premio ad Imola. Titoli giornalistici come "Macchine che uccidono" iniziarono ad apparire ovunque e l'opinione pubblica si interrogava sulla medesima questione: valeva davvero la pena mettere a rischio altre vite in nome di uno sport?

È doveroso far presente che se da un lato la velocità che le vetture introducevano in fase di curva aveva raggiunto picchi clamorosi (equivalente a dire in termini di carico aerodinamico erano stati compiuti passi da gigante), altrettanto non si poteva affatto dire per l'efficienza dei sistemi di sicurezza di cui disponevano le monoposto al tempo.

Sotto l'immensa pressione mediatica l'allora presidente della Federazione Internazionale dell'Automobile, Max Mosely, annunciò ulteriori provvedimenti: ridotta complessità delle paratie anteriori e diffusori destinati ad essere accorciati rientravano fra le prime contromisure atte a ridurre la deportanza. Ulteriormente era stato previsto che vetture montassero una tavola di legno, posizionata sul fondo, ad agire come un grande pattino centrale: anche conosciuta come *skid block*, avrebbe consentito la formazione di uno scalino sul fondo con uno spessore imposto di 10 millimetri, in modo da renderla la prima componente a toccare terra a seguito di un impatto (anziché direttamente il fondo dello *chassis*). Rialzando la vettura di 10 millimetri rispetto al suolo veniva così ridotto l'effetto suolo e la deportanza generata.

Figura 18: vista dall'alto dello skid block



La finalità di tali provvedimenti era il conseguimento di una riduzione del 30% del carico aerodinamico a confronto con la macchina dell'inizio della stagione 1994, dando origine ad una sfida continua tra ente regolatore e progettisti il cui obiettivo era quello di far sì che questa velocità non andasse perduta, introducendo soluzioni o individuando “scappatoie” che non fossero ancora oggetto di regolamentazioni stringenti.

I provvedimenti della FIA non sono ascrivibili alle dinamiche di quella sola annata, ma attraversano la storia della Formula 1 contemporanea, inducendo i progettisti ad una continua analisi del problema (tipicamente una riduzione di deportanza localizzata, imposta da regolamento e talvolta vincolante su una specifica zona/componente delle monoposto) e l'individuazione di una soluzione rispondente alla domanda: *come recuperare quell'ammontare di deportanza?*

6.2 McLaren MP4 20 – Problem&Solution

Restrizioni sull'aerodinamica furono concepite dalla Federazione Internazionale anche per la stagione 2005: la principale prevedeva un rialzo dell'ala anteriore di 50 millimetri. Si trattava di un cambiamento significativo dal momento che la struttura dell'ala anteriore ed i flussi d'aria in uscita da essa condizionano l'aerodinamica di tutte le porzioni di vettura che vengono lambite a seguire. Se il flusso in uscita dall'ala anteriore è turbolento, quest'ultimo interagisce negativamente con ruote e sospensioni anteriori condizionando l'efficienza aerodinamica del veicolo.

In sostanza sarebbe auspicabile che l'ala anteriore generasse carico aerodinamico sull'asse anteriore arrecando, al contempo, il minor disturbo possibile al flusso che lambisce il resto della vettura.

Dalle prime simulazioni CFD (Computational Fluid Dynamics) condotte in McLaren emerse che il sistema di vortici in uscita dalla paratia dell'ala anteriore andava ad impattare direttamente contro il braccio inferiore della sospensione (osservabile in figura 19), come diretta conseguenza del sollevamento dell'ala imposto da regolamento: la deportanza della vettura veniva dunque penalizzata non soltanto a causa della maggiore altezza del profilo alare (riduzione dell'effetto suolo), ma anche a causa del disturbo che i flussi d'aria arrecavano alla carrozzeria immediatamente a valle rispetto all'ala anteriore.

La soluzione al problema, individuata da Adrian Newey, fu quella di rialzare il braccio inferiore della sospensione di circa 120 millimetri, allineandolo con l'asse anteriore e connettendo direttamente il triangolo inferiore della sospensione allo spigolo inferiore del telaio (figura 20). Tale soluzione consentì di evitare la sovrapposizione tra vortice d'aria in uscita dall'ala anteriore ed elementi strutturali come i braccetti delle sospensioni posti a valle dell'ala, arrecando così il minore disturbo possibile al flusso d'aria passante.

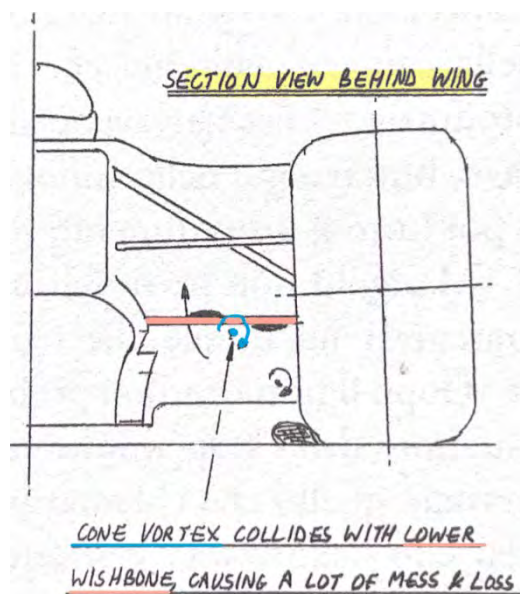


Figura 19: vista in sezione dietro l'ala anteriore (problema-A.Newey 2017)

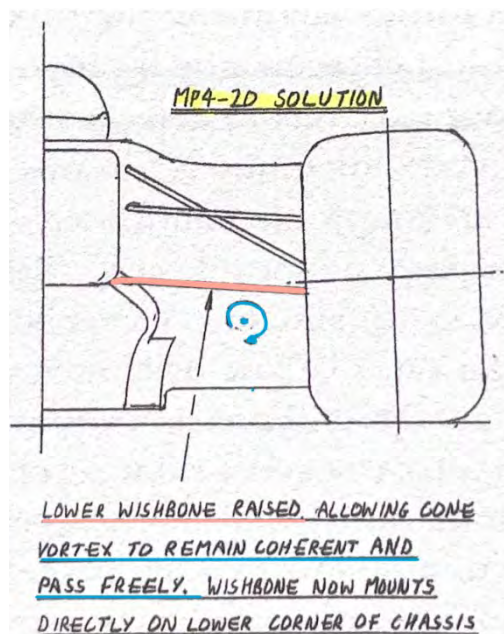


Figura 20: vista in sezione dietro l'ala anteriore (soluzione - A.Newey 2017)

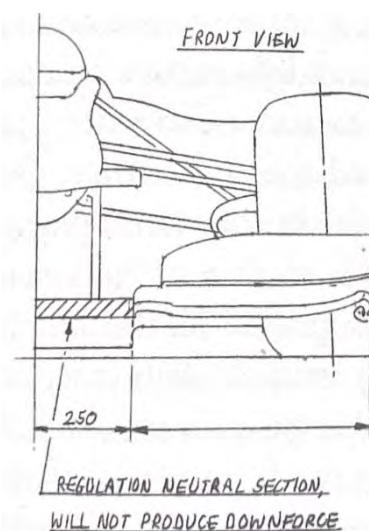
Quella poc'anzi discussa si rivelò una soluzione adatta a recuperare il quantitativo di spinta deportante andato perduto inizialmente con il rialzamento dell'ala anteriore; una soluzione al contempo difficilmente imitabile da parte dei rivali a stagione inoltrata, poiché avrebbe richiesto la progettazione ad hoc di un nuovo telaio ad essa congeniale.

6.3 Brawn GP 001- Problem&Solution

Il regolamento del 2009 specificava che l'ala anteriore dovesse essere larga quanto la macchina, con una sezione neutra centrale (che non generasse deportanza) estesa per 500 millimetri. L'introduzione di questa nuova regola sollevò numerose perplessità: un'ala posizionata in tutta la sua estensione davanti alle ruote anteriori avrebbe generato dei vortici in uscita (caratterizzati da una fenomenologia analoga a quella precedentemente illustrata al capitolo 6.2).

La discontinuità tra la sezione neutrale posta centralmente e le sezioni di ala convenzionali (disposte a 250 mm dall'asse longitudinale mediano della vettura) produceva un vortice molto intenso, noto come *vortice 250* che interferiva con la sospensione a valle dell'ala nonostante il triangolo rialzato (soluzione ereditata dalla McLaren MP4 20 del 2005, precedentemente descritta).

Figura 21: illustrazione dei regolamenti del 2009 per la lunghezza dell'ala anteriore (A.Newey 2017)



Il carico aerodinamico delle vetture era fortemente diminuito, motivo per cui l'intuizione di Ross Brawn e dei suoi ingegneri, con il neo-esordiente team Brawn GP, valse un titolo iridato. Per conseguire un incremento di downforce, a discapito dei regolamenti di quell'anno, si indagò circa il funzionamento di una precisa componente strutturale della vettura: il diffusore posteriore.

Funzionamento del diffusore posteriore

Per incrementare la deportanza, oltre all'utilizzo degli alettoni anteriore e posteriore, è importante studiare accuratamente il fondo della monoposto in modo da conseguire, in corrispondenza di una sezione ristretta, un flusso d'aria più veloce rispetto a quello in ingresso e in uscita dalla monoposto stessa; ciò si ottiene utilizzando le proprietà del tubo di Venturi già descritte in precedenza.



Figura 22: tubo di Venturi posto sul fondo della vettura

Lungo il suo percorso sul fondo della vettura, la corrente fluida raggiunge un allargamento finale : il diffusore. Approssimabile come la parte terminale del classico tubo di Venturi, il diffusore è necessario affinché ci possa essere un aumento di velocità (con conseguente depressione) in corrispondenza della sezione minima.

La zona di interesse risulta quindi la seguente:

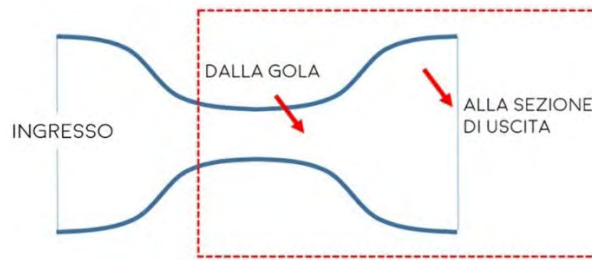


Figura 23: schematizzazione tubo di Venturi e delimitazione del diffusore

Definendo le grandezze d'interesse in corrispondenza della gola o sezione ristretta del tubo di Venturi (p_g , v_g , A_g , ρ_g) ed in corrispondenza della sezione d'uscita (p_u , v_u , A_u , ρ_u):

$$\begin{cases} \dot{M} = \rho_g \cdot A_g \cdot v_g = \rho_u \cdot A_u \cdot v_u = cost \\ p^0 = p_g + \frac{1}{2} \rho_g v_g^2 = p_u + \frac{1}{2} \rho_u v_u^2 = cost \end{cases}$$

Grazie all'ampliamento della sezione di passaggio ($A_u > A_g$) lungo il diffusore, affinché la portata si mantenga costante ($\dot{M} = cost$), dopo la sezione ristretta la velocità diminuisce ($v_u < v_g$) e conseguentemente la pressione del fluido accresce ($p_u > p_g$), in conformità con quanto previsto dalle sopracitate equazioni di continuità e di Bernoulli.

Durante lo scorrimento dell'aria fra le superfici del fondo vettura, la rugosità che le caratterizza si traduce in un complesso di microscopici ostacoli sui quali le molecole d'aria urtano, rovinando così le traiettorie della corrente. La principale conseguenza è una perdita cospicua dell'effetto deportante dovuto alla riduzione di velocità del flusso all'interno del sottile passaggio sotto l'auto. Dal momento che il diffusore esercita un'ulteriore azione di rallentamento del flusso (che si sovrapporrebbe a quella già intrinseca all'esistenza degli attriti), la sezione del condotto immediatamente dopo la gola viene mantenuto a sezione circa costante, salvo poi avere un breve elemento di diffusione in corrispondenza della fuoriuscita del flusso nel posteriore della vettura. [7]

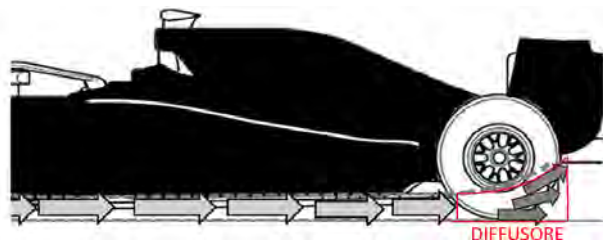


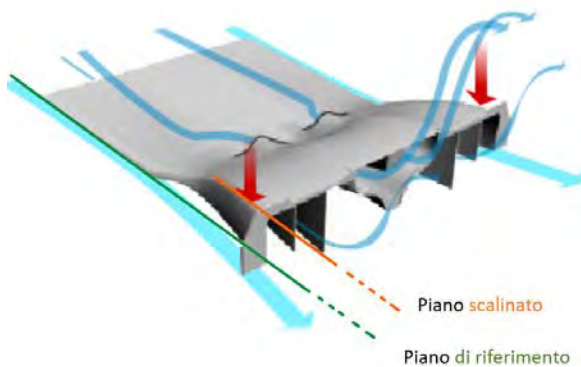
Figura 24: posizionamento diffusore posteriore

Quando la Brawn GP era ancora sotto l'egida della Honda nel 2008, uno dei loro ingegneri intuì il potenziale di un doppio diffusore in ottica del successivo campionato,

sfruttando un cavillo individuato nel regolamento. Fondamentalmente, nel regolamento venivano menzionati due piani di interesse nel posteriore della vettura: il piano di riferimento, posto centralmente, ed il piano scalinato posto a 50 millimetri al di sopra del primo. Per unire lo spazio di 50 millimetri tra i due piani si faceva riferimento ad una transizione verticale. Il regolamento proseguiva affermando che non ci dovessero essere fori nel piano di riferimento e nel piano scalinato, senza precludere la possibilità di realizzare un foro nella transizione verticale tra i due piani.

I tecnici britannici intagliarono il fondo nella sua parte finale, creando due fori simmetrici lungo la transizione verticale. La funzione di questi fori era quella di convogliare parte dell'aria che fluiva in quella zona all'interno di un canale posto al centro del classico diffusore, nell'area finale del fondo scalinato. Così facendo, la downforce venne aumentata significativamente.

ESEMPIO DI DOPPIO DIFFUSORE



DIFFUSORE STANDART 2011

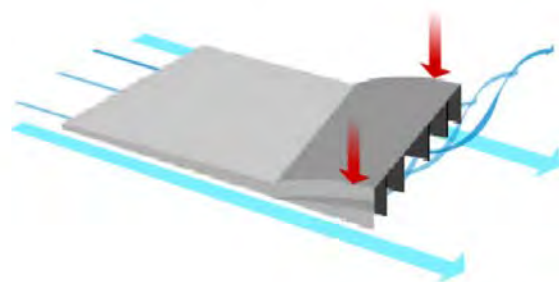
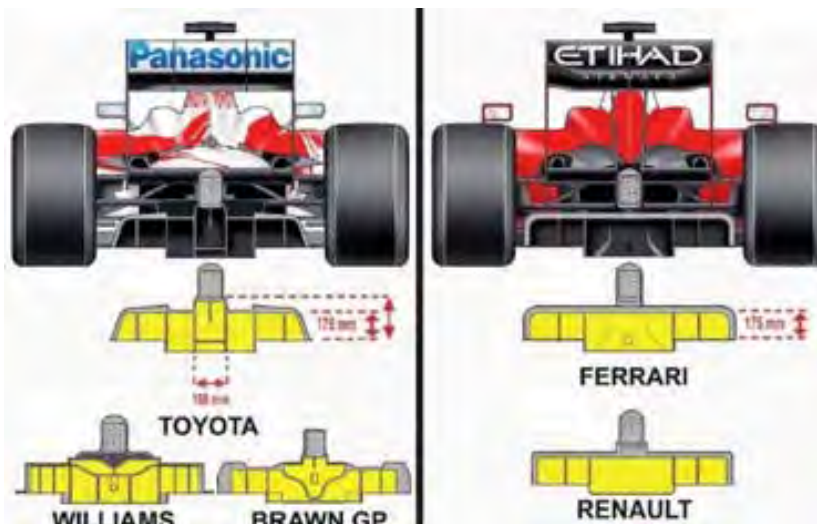


Figura 25 e Figura 26: confronto tra diffusore doppio e diffusore standard



7. Considerazioni finali sull'avvento dell'era turboibrida

Il pensiero di Adrian Newey in merito all'era turboibrida, iniziata con i regolamenti introdotti nel 2014 e tutt'oggi ancora in corso, è intendibile come una verità senza filtro: ad un regolamento sempre più restrittivo vanno attribuite le cause di una tangibile uniformazione delle vetture e di una perdita del suddetto “elemento spettacolare”.

In un contesto in cui vige la necessità di adeguarsi ad un regolamento altamente vincolante, ogni nuova tecnologia che le squadre possano introdurre per differenziarsi viene inevitabilmente posta sotto lente di ingrandimento e solitamente proibita dalla federazione: gli scarichi soffianti, l'aeroelasticità dei profili alari, le sospensioni interconnesse, il *DAS* sono solo alcuni dei possibili esempi di soluzioni, potenzialmente capaci di fungere da discriminante, su cui è stato posto il veto da parte dell'ente regolatore.

Il timore che un team possa godere di una particolare ispirazione, del genio o dell'intuizione tecnologica per creare un divario consistente con i rivali fa sì che il veto venga posto su ogni soluzione che consenta di erogare un assai più consistente quantitativo di deportanza e/o potenza meccanica.

Bibliografia figure

[Figura 1] articolo di *Gianluca Covini*, *Auto tecnica – aerodinamica dei veicoli terrestri*, seconda parte.

Figure [2] [3] [4] [5] materiale del corso di “*Meccanica dei fluidi*” – Cengel, *Cimbala, Meccanica dei fluidi 2ed*, McGraw-Hill ©2011 – Politecnico di Torino 2024.

[Figura 6] sito web *carbodydesign.com*

Figure [7] [13] [15] [19] [20] [21] rivisitazione di disegni tecnici tratti dal libro “*Come ho progettato il mio sogno*” di *Adrian Newey*

[Figura 8] articolo di *Formulapassion: Tecnica delle Formula 1 storiche: Lotus 78 (1977)* – seconda parte

[Figura 9] articolo di *MultiFormula*, “*Un tuffo nell’aerodinamica*”

[Figura 10] sito web *racingdynamics.com*

Figure [11] [25] articoli di *Formula Uno Analisi Tecnica*

[Figura 12] *Motorsport Images*, *Mark Sutton*

[Figura 14] Immagini © Massimo Campi – Raul Zacchè/Actualfoto

[Figura 16] articolo di *flrace.it*: *Williams-Renault FW14 – arma segreta di Nigel Mansell*

[Figura 17] articolo di *Formulapassion* – *Williams: la scienza delle sospensioni attive*

[Figura 18] articolo di *Formula 1 dictionary* – *Plank or skid block*

Figure [22] [23] [24] articolo di *newsf1.it* – *Tecnica del diffusore*

Bibliografia testi

Testo di riferimento: How to build a car – Come ho progettato il mio sogno, Adrian Newey

[1] rielaborazione del materiale del corso di “Meccanica dei fluidi” – Cengel, *Cimbala, Meccanica dei fluidi 2ed, McGraw-Hill ©2011 – Politecnico di Torino 2024.*

[2] rielaborazione del materiale del corso di “Fondamenti di macchine a fluido”, *Stefano D’Ambrosio – Politecnico di Torino 2024*

[3] articolo di *Gianluca Covini, Auto tecnica – Aerodinamica dei veicoli terrestri, seconda parte.*

[4] riconoscimento dei meriti per l’introduzione dell’effetto suolo: individuati nell’articolo di *David Bianucci, sito web flrace.it*

[5] riferimenti cronologici relativi all’eliminazione delle minigonne: individuati nell’articolo di *Ivan Mancini, Fuoripista – Anche la Formula1 ha le sue minigonne*

[6] articolo di *Carlo Platella, Formulapassion – Williams: la scienza delle sospensioni attive*

[7] concetti sul funzionamento del diffusore posteriore tratti dall’articolo di *Alberto Aimar, newsfl.it –Tecnica del diffusore*