

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

***Relazione per la prova finale
«Diffusori e canali Venturi applicati
alle auto da competizione»***

Tutor universitario: Prof. Francesco Picano

Laureando: Francesco Zanninello

Numero di matricola: 1216826

Padova, 24/03/2023

A partire dagli anni '60 del secolo scorso si iniziarono ad utilizzare tecnologie di derivazione aeronautica nel mondo delle corse automobilistiche. L'introduzione dello studio aerodinamico in questo settore, prima con l'utilizzo di profili alari invertiti e poi con l'utilizzo di fondi sagomati, comportò un consistente incremento di prestazioni delle vetture da competizione.

Obiettivi della relazione:

- Analisi del funzionamento del tubo Venturi tramite le equazioni della fluidodinamica
- Introduzione alle forze agenti sul veicolo
- Analisi del funzionamento di un profilo alare invertito in prossimità del suolo
- Prime applicazioni di canali Venturi al fondo delle vetture da competizione
- Analisi del funzionamento di un diffusore automobilistico

Sistema: insieme di materia composto sempre dalle stesse particelle di fluido, che si può muovere e può interagire con l'ambiente circostante.

Volume di controllo: regione di spazio occupata da una parte di fluido in cui le particelle si possono muovere e attraverso il quale il fluido può scorrere.

Teorema del trasporto di Reynolds: la variazione nel tempo di una grandezza relativa al sistema (B_{sis}) è pari alla somma della variazione della stessa grandezza relativa al volume di controllo (B_{vc}) e del flusso di B attraverso il volume di controllo.

$$\frac{dB_{sis}}{dt} = \frac{dB_{vc}}{dt} + \Phi_{vc}(B)$$

$$\frac{dB_{sis}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho b dv + \int_{sc} \rho b (\vec{V} \cdot \hat{n}) dS$$

Con $B=mb$ (m massa del sistema) e sc superficie del contorno

Equazione di conservazione della massa: la variazione nel tempo della massa del sistema è nulla $\longrightarrow \dot{m}_1 = \dot{m}_2$

con $\dot{m} = \rho VS$ se ρ costante $\longrightarrow V_1 S_1 = V_2 S_2$

Equazione di bilancio di quantità di moto: la variazione nel tempo della quantità di moto del sistema è uguale alla somma delle forze esterne agenti sul sistema.

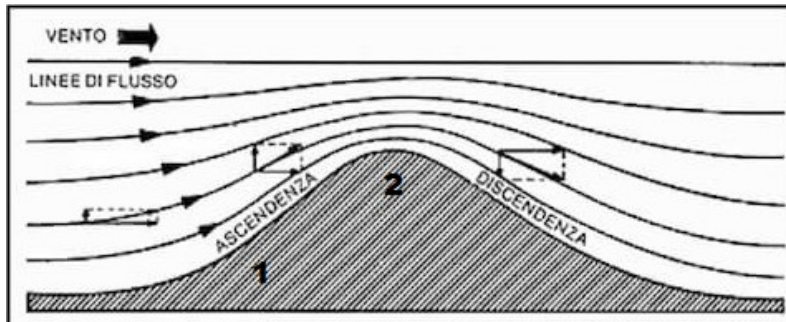
$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \vec{\bar{E}} + \rho \vec{g} \quad (\text{equazione in forma primitiva})$$

Equazioni di Eulero per fluidi non viscosi

Considerando il fluido incomprimibile e non viscoso si ottiene:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0$$

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla} p$$



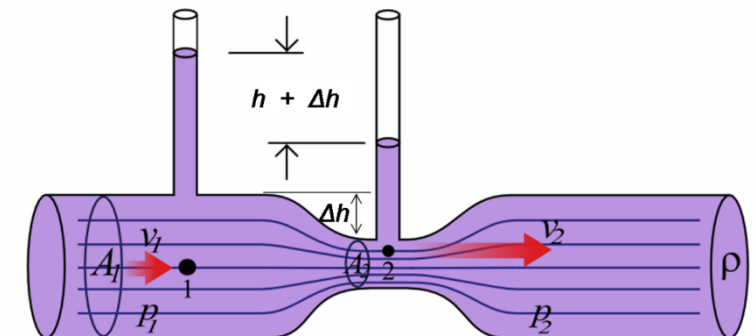
$$\begin{aligned} p_1 &> p_\infty & |V_1| &< |V_\infty| \\ p_2 &< p_\infty & |V_2| &> |V_\infty| \end{aligned}$$

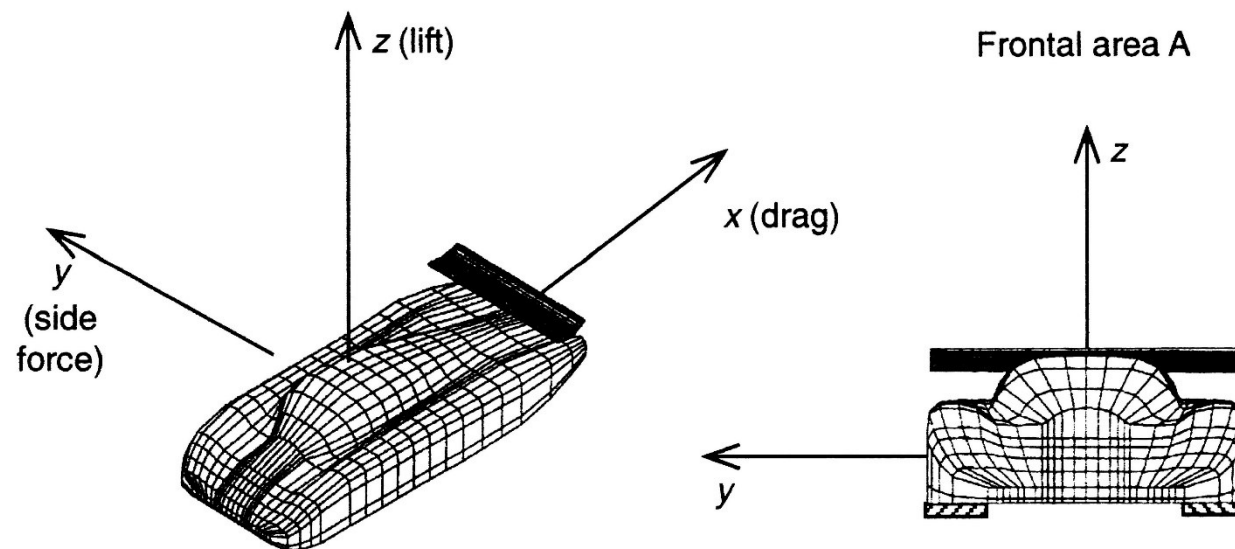
Equazione di Bernoulli

Si sviluppano le equazioni di Eulero lungo i versori $\hat{s}$ e $\hat{n}$, ottenendo:

$$\frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{1}{2} \rho V^2 + p \right) = 0 \quad (\hat{s})$$

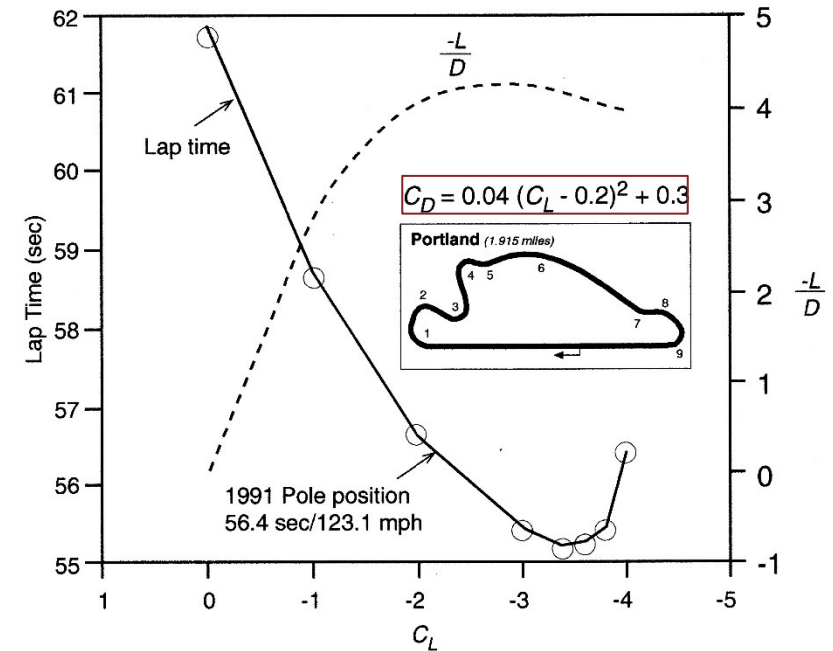
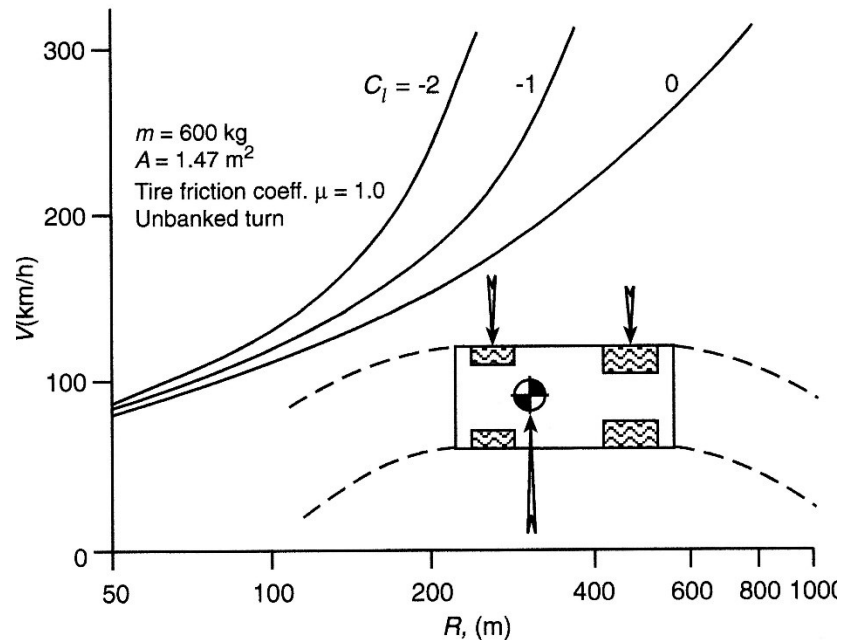
$$\frac{\partial p}{\partial n} = \rho \frac{V^2}{R} \quad (\hat{n})$$





Downforce (*lift* negativo): forza perpendicolare al suolo applicata al centro di pressione del veicolo e che serve a tenere le ruote in contatto con l'asfalto

Drag: forza parallela alla direzione del moto e che lo ostacola



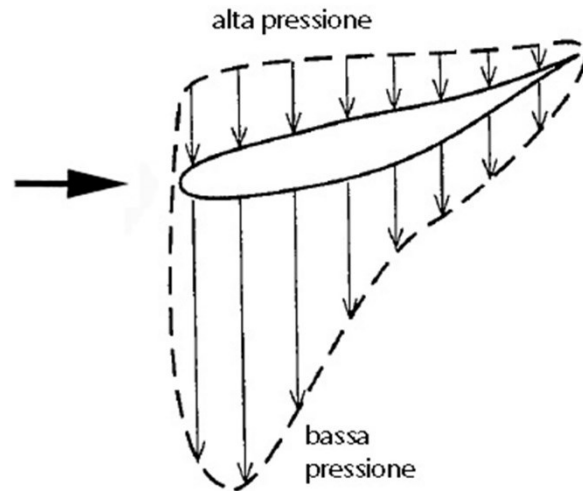
Un'auto in fase di sterzata è sottoposta ad una forza applicata al centro di massa che tende a farla spostare verso l'esterno della curva. Ad essa si oppone la forza di attrito tra ruote e asfalto.

Per poter aumentare la velocità di percorrenza in curva è necessario aumentare l'attrito esercitato dalle ruote sull'asfalto.

$$F_a = \mu F_n$$

➡ Tale risultato si può ottenere incrementando la forza normale agente sulle ruote.
 Si può incrementare la forza normale con dispositivi aerodinamici che generino downforce.

F_a forza di attrito
 μ coefficiente di attrito
 F_n forza normale



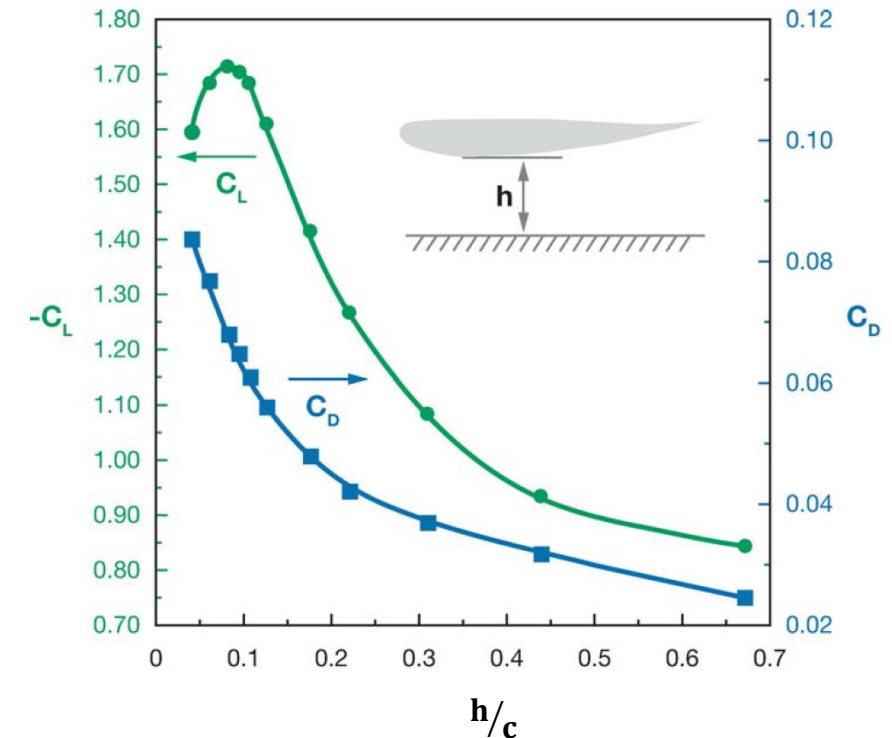
Un profilo alare presenta due superfici, una concava e una convessa. In corrispondenza della superficie convessa il fluido avrà velocità superiore e pressione inferiore rispetto al fluido indisturbato. Si avrà dunque generazione di carico aerodinamico con vettore orientato verso il lato in depressione.

La downforce generata viene indicata dal coefficiente c_L :

$$c_L = \frac{L}{0.5\rho V^2 S}$$

Avvicinando il profilo alare al suolo si ottiene un incremento di downforce ed un conseguente aumento di drag generato.

Per fluidi reali la downforce non aumenta indefinitamente, ma raggiunge un massimo per una data altezza di lavoro, oltre la quale la portata d'aria in ingresso non è sufficiente.



La prima applicazione dell'effetto Venturi ad una vettura da competizione avvenne nel 1977 con la Lotus 78.
La vettura presentava un fondo sagomato a forma di profilo alare rovesciato.

Vantaggi:

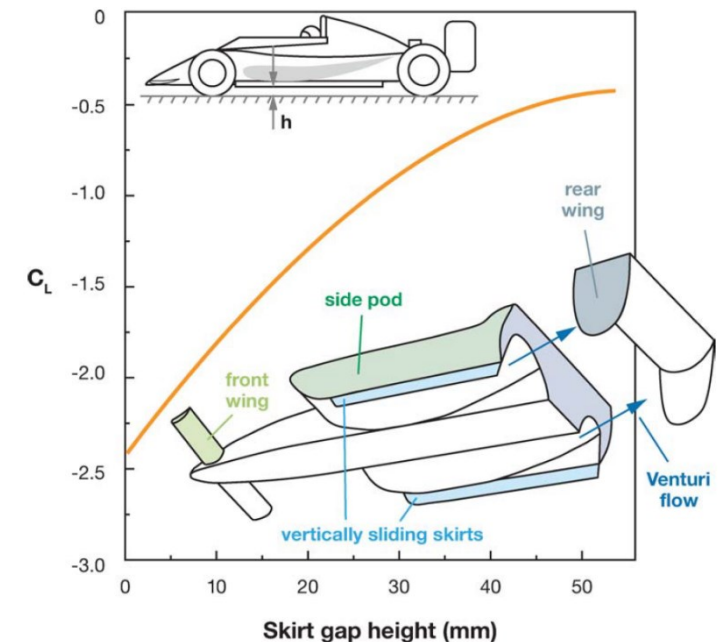
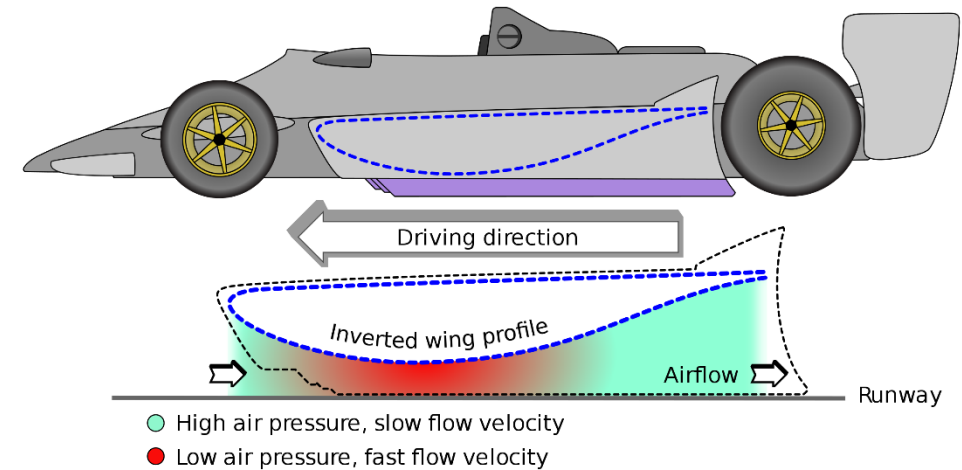
- formazione di un canale Venturi sul fondo dell'auto con generazione di downforce
- basso angolo di attacco del profilo → minimo drag

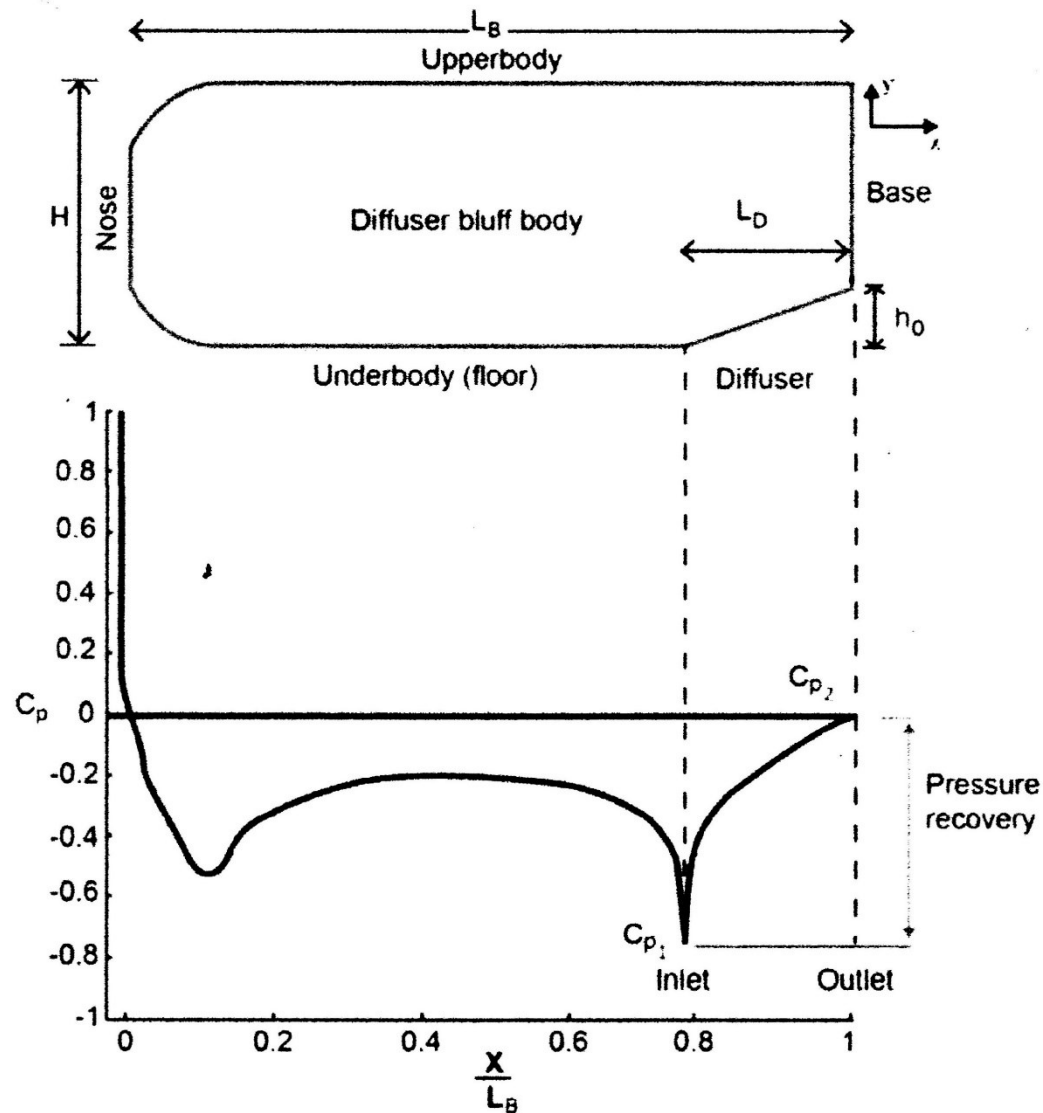
Svantaggi:

- Prestazioni fortemente influenzate dalle condizioni del suolo

Le minigonne laterali permettono di isolare i due canali Venturi sul fondo dell'auto dall'ambiente esterno.
Questo permette di mantenere bassa la pressione sotto al veicolo e quindi di aumentare la downforce generata.

La parte finale (divergenza) del condotto viene detta **diffusore**



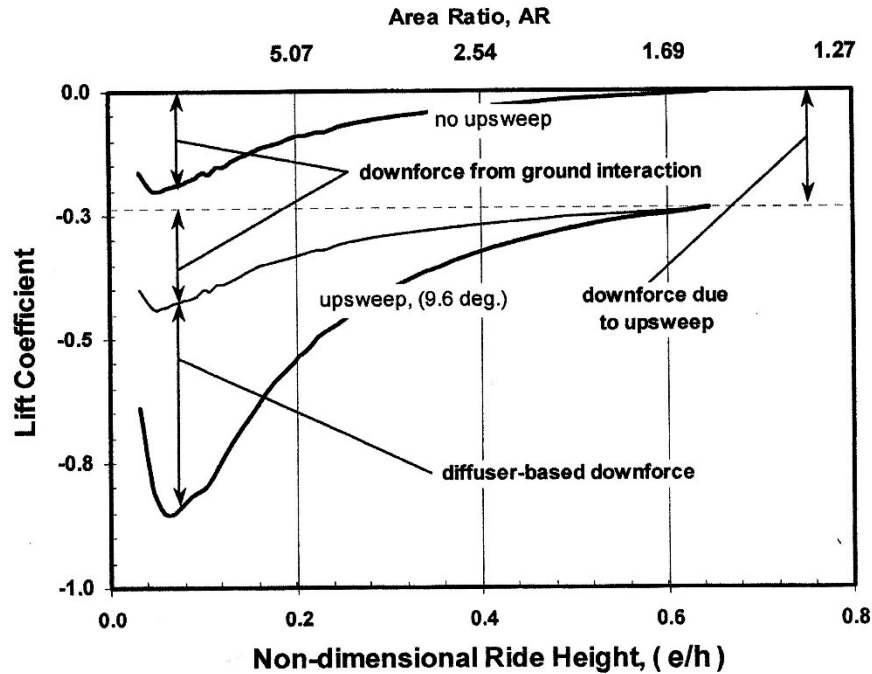


Il funzionamento del fondo sagomato era strettamente legato alle condizioni del suolo, e per questo portava a prestazioni non costanti e a rischi per la sicurezza dei piloti. Venne così sostituito da un sistema formato da un fondo piatto seguito dal diffusore, che venne mantenuto.

Tale sistema non necessita di minigonne laterali per mantenere prestazioni costanti.

Il fluido in uscita dal diffusore deve avere pressione atmosferica, perciò tutte le sezioni antecedenti presentano un fluido a pressione minore, con minimo in corrispondenza dell'entrata del diffusore.

La bassa pressione sotto al veicolo è alla base della generazione di downforce

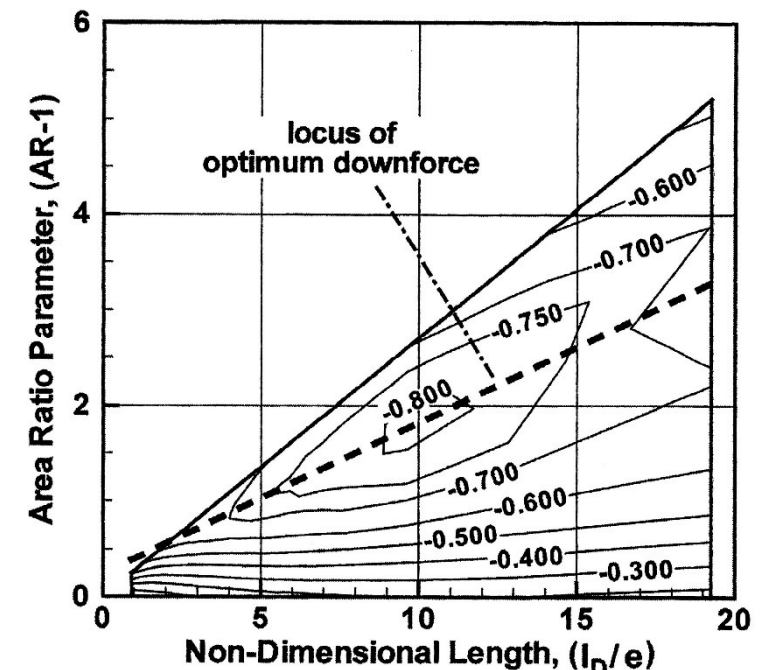


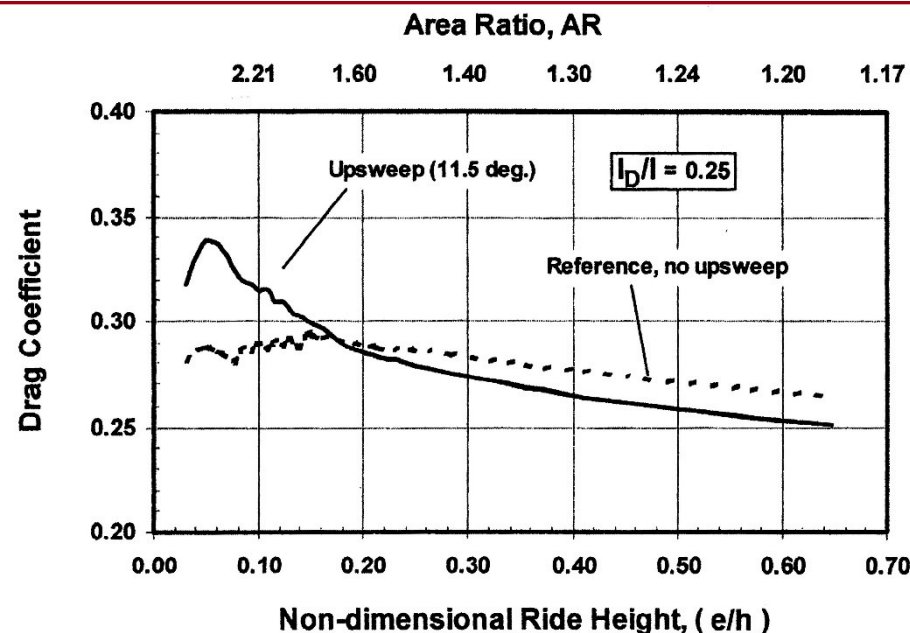
La downforce totale generata da un diffusore si presenta come la somma di tre contributi:

- recupero di pressione dall'ingresso all'uscita del diffusore
- variazione di direzione del fluido con conseguente generazione di una forza di pressione e variazione nel momento del fluido (upsweep)
- asimmetria del diffusore

Definito A_R come il rapporto tra la sezione di uscita e quella di ingresso del diffusore, dal grafico a destra si nota che il minimo valore di c_L (massima downforce) si ha per **alti** valori di A_R ($A_R - 1 \approx 2$).

$$A_R = 1 + \frac{h_D}{e} = 1 + \frac{l_D}{e} \tan \gamma_D$$





Il drag generato da un diffusore è strettamente legato all'altezza di funzionamento, minore è l'altezza e maggiore sarà il coefficiente di drag.

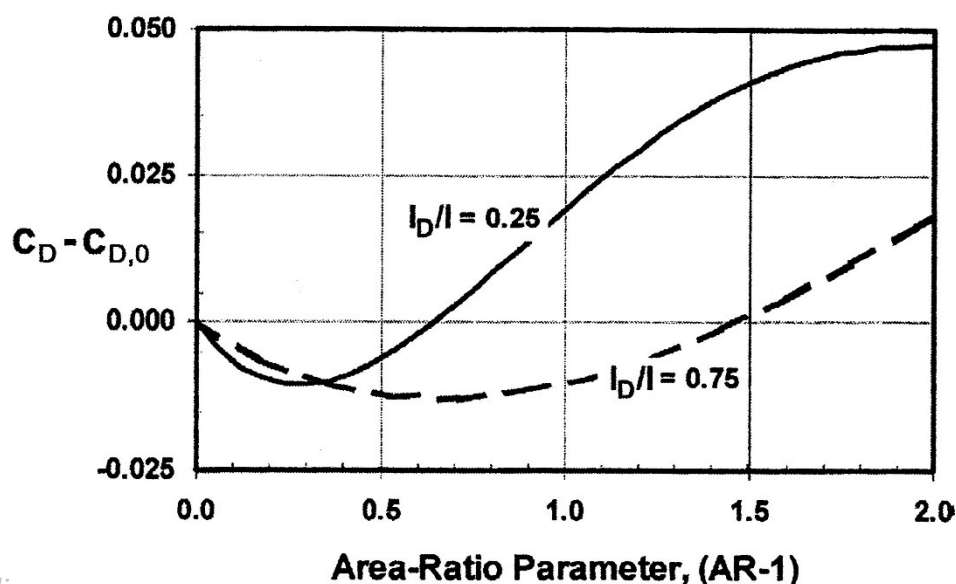
Tale incremento è dovuto a tre fattori:

- intersezione dello strato limite del diffusore e del suolo
- portata d'aria in ingresso al diffusore non sufficiente
- rottura dei vortici formati in ingresso al fondo del veicolo

Il drag generato da un diffusore dipende anche dal rapporto tra le sezioni di ingresso ed uscita A_R .

$c_D - c_{D,0}$ definisce l'incremento di drag.

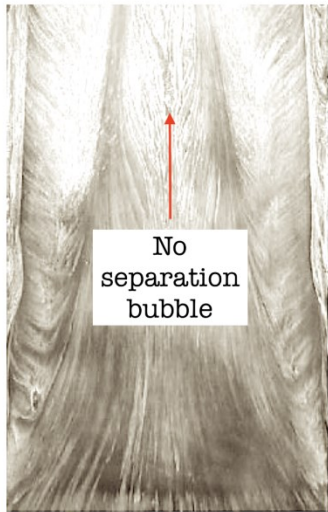
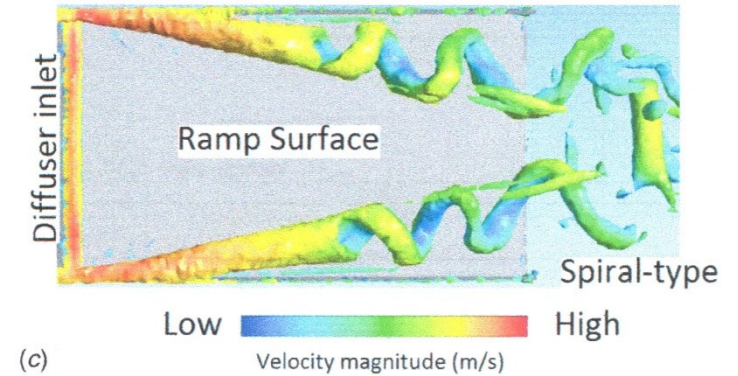
- per veicoli privi di diffusore ($A_R - 1 = 0$) non si ha aumento o diminuzione di drag
- per **bassi** valori di A_R si ha una piccola diminuzione di drag
- per alti valori di A_R si ha un valore di drag generato superiore rispetto a veicoli privi di diffusore



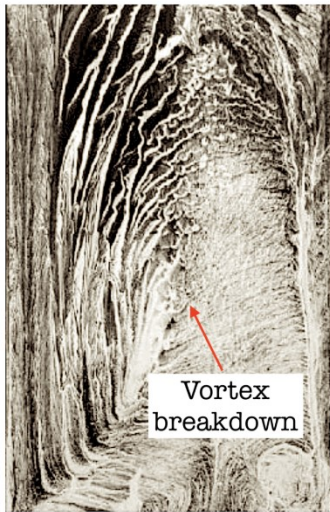
Non è possibile ottenere il minimo drag e la massima downforce contemporaneamente

A causa della differenza di pressione tra il diffusore e l'ambiente esterno, si formano due vortici in corrispondenza della rampa del diffusore.

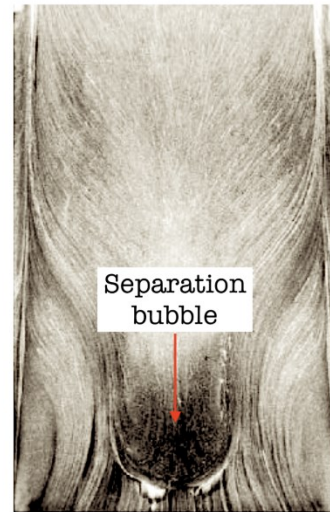
Tali vortici risultano di estrema importanza per il funzionamento del diffusore; infatti, il flusso tende a separare in entrata al diffusore, per essere poi riattaccato alla rampa dai vortici.



a) 5° diffuser



b) 10° diffuser



c) 15° diffuser

Il valore di downforce generata è legata all'intensità di tali vortici, che a sua volta è legata all'angolo di rampa del diffusore:

- Angolo di **5-10** gradi: vortici di bassa intensità e assenza di separazione in ingresso al diffusore.
- Angolo di **10-15** gradi: vortici ad alta intensità e separazione del flusso in ingresso al diffusore.
- Angolo di **15-20** gradi: vortici ad altissima intensità, separazione del flusso in ingresso e stallo del diffusore nella parte finale.

L'angolo più indicato è di **13-14** gradi.

Generatori di vortici

Il fluido in entrata al diffusore presenta spesso una precedente vorticità dovuta all'interazione con le ruote e con l'ala anteriore.

È possibile guidare il flusso in modo che arrivi al diffusore nelle condizioni ottimali. Tale risultato può essere ottenuto con l'utilizzo di generatori di vortici.

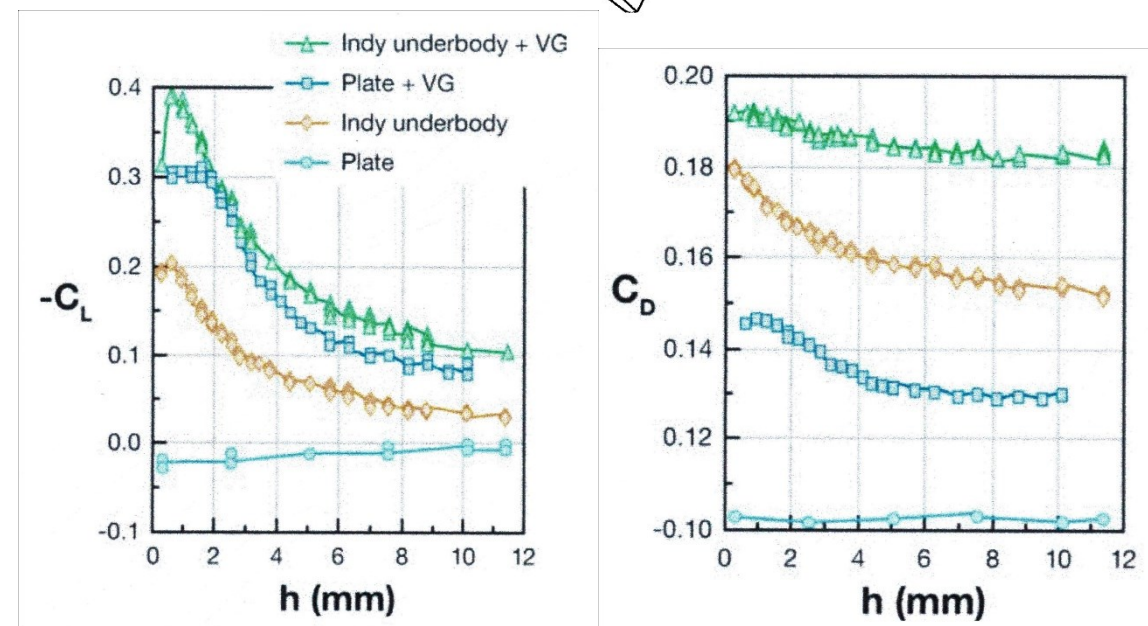
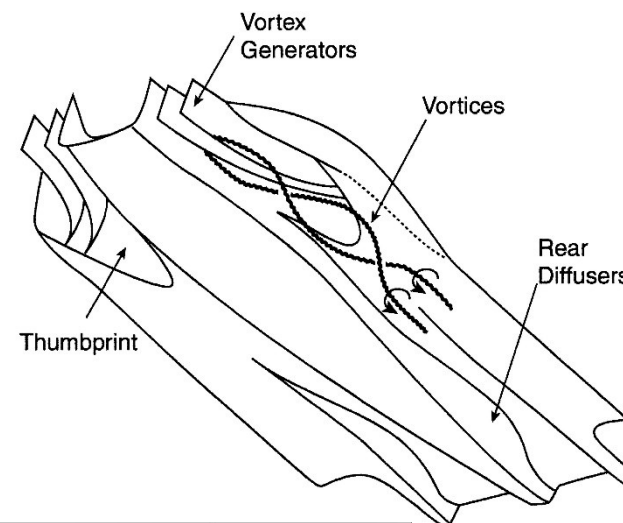
I grafici mostrano i valori dei coefficienti di portanza e drag per un fondo piatto (plate) e per un fondo sagomato di origine Indy car con e senza i generatori di vortici.

In entrambi i casi con l'aggiunta dei generatori di vortici si nota un incremento di downforce con conseguente aumento di drag generato.

Ala posteriore

i vantaggi dovuti alla presenza dell'ala posteriore sono due:

- Se l'inizio dell'ala posteriore si trova in corrispondenza della fine del diffusore, il condotto risultante presenta una lunghezza e una sezione finale superiore, con diminuzione di pressione nel diffusore.
- Il lato in depressione dell'ala posteriore aiuta l'estrazione del fluido dal diffusore e ne impedisce il ristagno



Tra tutte le componenti aerodinamiche di una vettura da competizione, il diffusore e il fondo dell'auto sono quelle con più margine di miglioramento. In futuro sarà sicuramente possibile introdurre innovazioni in grado di incrementare le prestazioni dei diffusori e del fondo della vettura, anche se spesso tali sperimentazioni vengono ostacolate da rigidi regolamenti che vietano la maggior parte degli sviluppi in questo campo.

La gran parte dei dati e dei grafici analizzati in questa relazione sono ottenuti da sperimentazioni universitarie svolte su modelli semplici. Le sperimentazioni con diffusori di forma più complessa risultano nella maggior parte dei casi irreperibili, in quanto sono considerati segreti industriali della scuderia che li sviluppa. Tale segretezza è dovuta al carattere altamente competitivo del mondo delle corse, tuttavia, i modelli analizzati in questa trattazione rappresentano un'approssimazione abbastanza realistica e fedele della maggior parte delle tecnologie effettivamente utilizzate.

- Cooper K. R., Brtenyi T., Dutil G., Syms J., Sovran G. (1998) "The Aerodynamic Performance of Automotive Underbody Diffusers", SAE international
- Ehirim O. H., Knowles K., Saddington A. J., Finnis M. V. (2018) "Aerodynamic of a Convex Bump on a Ground-effect Diffuser", ASME digital collection
- Ehirim O. H., Knowles K., Saddington A. J. (2019) "A Review of Ground-Effect Diffuser Aerodynamics", Journal of Fluids Engineering
- Graziani G. (2010, 4a edizione) "Aerodinamica", pagine 41-55 e 183-205
- Katz J., Morey F. (2008) "Aerodynamics of Large-Scale Vortex Generator in Ground Effect", Journal of Fluids Engineering
- Katz J. (2006) "Race Cars Aerodynamics, Designing for Speed"
- Kuya Y., Takeda K., Zhang X., Beeton S., Pandaleon T. (2009) "Flow Physics of a Race Car Wing With Vortex Generators in Ground Effect", Journal of Fluids Engineering
- Schuetz T. (2016, 5a edizione) "Aerodynamics of road vehicles", pagine 682-693
- Zhang X., Toet W., Zerihan J. (2006) "Ground Effect Aerodynamics of Race Cars", Applied Mechanics Reviews