

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

***Relazione per la prova finale  
«Analisi fluidodinamica dell'effetto  
suolo e del porpoising nelle  
monoposto»***

Tutor universitario: Prof. Andrea

Bottacin Busolin

Laureando: *Edouard Falcomer*

Padova, 19/11/2024

Nelle prime competizioni automobilistiche i carichi dovuti all'aria erano irrilevanti

- Inizio analisi fluidodinamica verso la fine degli anni '60
- Sviluppo delle vetture effetto suolo (Chapparral 2J e Lotus 78)
- Componenti aerodinamici (ali, fondo e diffusore)
- Abbandono dell'effetto suolo: 1983 (Formula 1)
- Reintroduzione nel campionato 2022
- Galleria del vento (porpoising)

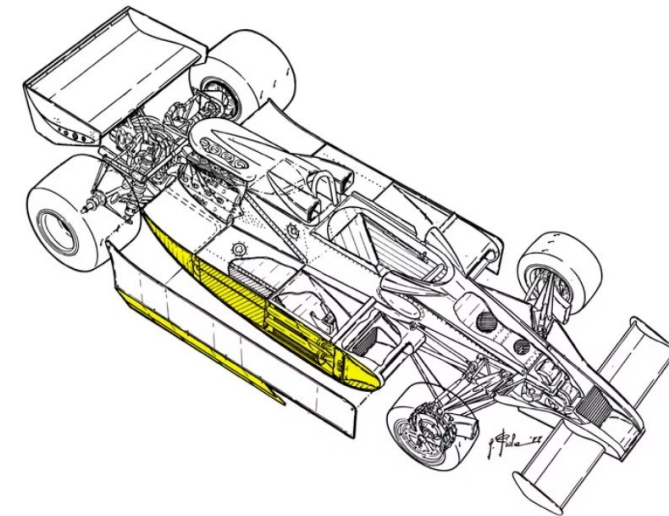


Chapparral 2J del 1970, campionato Can-Am



Prototipo del 2022, campionato F1

- Studiare i principi dell'effetto suolo
- Semplificare geometria della monoposto
- Scelta del profilo aerodinamico
- Simulazione e analisi attraverso Ansys Fluent
- Parametrizzare l'analisi fluidodinamica secondo variabili
- Verificare la validità reale del fenomeno
- Capire lo sviluppo del porpoising



Profilo alare in una monoposto F1 anni '70

Table of Design Points								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Name	P1 - Rotate1.FD9	P2 - Distance	P3 - drag-coefficient-op	P4 - lift-coefficient-op	<input type="checkbox"/> Retain	Retained Data	Note
2	Units	degree	m					
3	DP 0 (Current)	3	0,6	0,022645	-1,0248	<input checked="" type="checkbox"/>	✓	
4	DP 1	3	0,55	0,023286	-0,96761	<input checked="" type="checkbox"/>	✓	
5	DP 2	3	0,5	0,02629	-1,0404	<input checked="" type="checkbox"/>	✓	
6	DP 3	3	0,45	0,030421	-1,0895	<input checked="" type="checkbox"/>	✓	
7	DP 4	3	0,4	0,034695	-1,0987	<input checked="" type="checkbox"/>	✓	
8	DP 5	3	0,35	0,040972	-1,1233	<input checked="" type="checkbox"/>	✓	
9	DP 6	3	0,3	0,046238	-1,0936	<input checked="" type="checkbox"/>	✓	
10	DP 7	3	0,25	0,052387	-1,045	<input checked="" type="checkbox"/>	✓	
11	DP 8	3	0,2	0,058594	-0,93607	<input checked="" type="checkbox"/>	✓	
*						<input type="checkbox"/>		

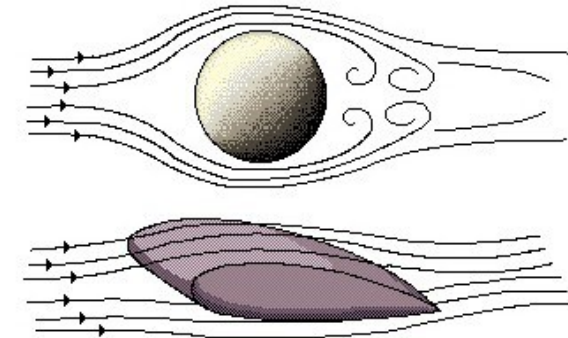
Esempio di tabella per la parametrizzazione in Ansys Fluent

- Sollecitazioni per interazione tra il corpo e il fluido
- Portanza (lift): forza perpendicolare alla direzione del flusso
- Coefficiente di portanza: rappresenta adimensionalmente la portanza

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A}$$

- Resistenza aerodinamica (drag): forza parallela alla direzione del flusso
- Coefficiente di resistenza: rappresenta adimensionalmente la resistenza

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A}$$



Corpo tozzo e affusolato



Forze di un corpo che interagisce con un fluido

- Coefficiente di pressione: rappresenta adimensionalmente la variazione di pressione

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2}$$

- Efficienza aerodinamica: relazione adimensionale tra forze generate

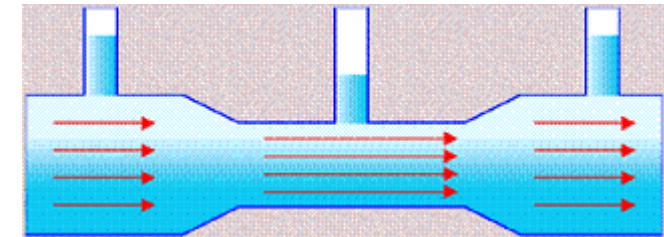
$$E = \frac{\text{Deportanza}}{\text{Resistenza}} = \frac{C_L}{C_D}$$

- Equazione di continuità

$$\rho_1 \cdot V_1 \cdot S_1 = \rho_2 \cdot V_2 \cdot S_2$$

- Effetto e tubo di Venturi

- Principio di Bernoulli



$v_1, p_1$

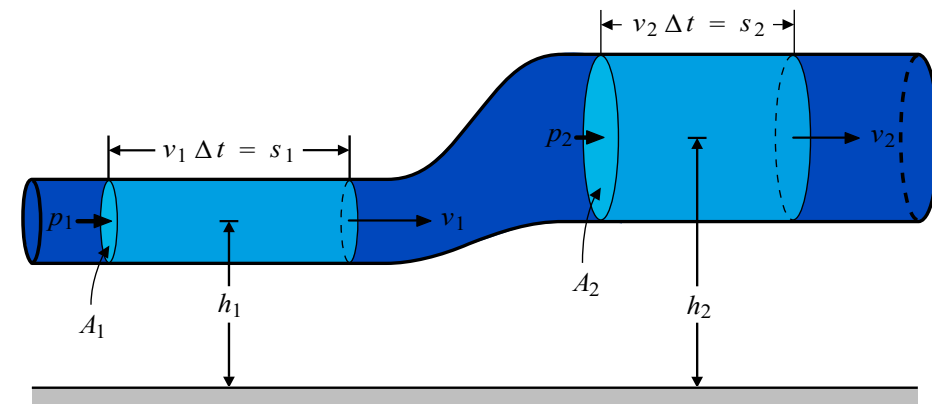
$v_2, p_2$

$v_3, p_3$

$v_1 < v_2$   
 $p_1 > p_2$

$v_2 > v_3$   
 $p_2 < p_3$

Tubo di Venturi



Principio di Bernoulli

Fluidodinamica computazionale (CFD) attraverso analisi numeriche e dati, analizza e risolve problemi di flussi fluidi

➤ Condizioni al contorno

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

➤ Risolvere le equazioni di Navier Stokes

$$\rho \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} u + \frac{\partial u}{\partial y} v + \frac{\partial u}{\partial z} w \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x$$

$$\rho \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} u + \frac{\partial v}{\partial y} v + \frac{\partial v}{\partial z} w \right] = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y$$

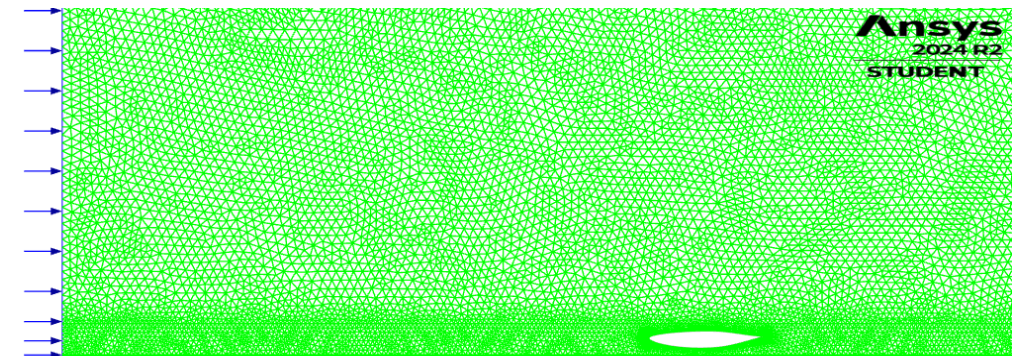
$$\rho \left[ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial x} u + \frac{\partial w}{\partial y} v + \frac{\partial w}{\partial z} w \right] = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z$$

Equazioni di Navier-Stokes

Ansys è un software di simulazione CFD

- Previsione di comportamenti fluidodinamici in condizioni reali

❑ Obiettivo tesi: esperienza nell'utilizzare i comandi principali



Setup Ansys Fluent, impostazioni condizioni al contorno

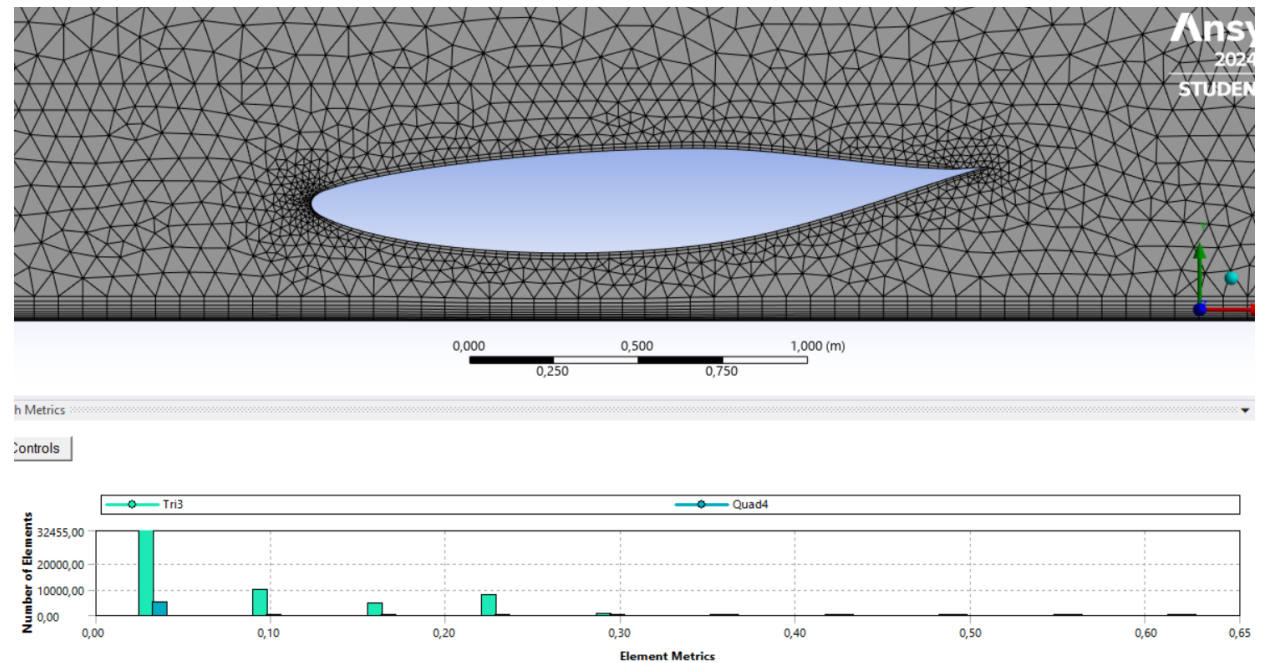
- Creazione profilo NACA 66(2)-415
- Definizione dominio di flusso (rettangolo 24x12 m)
- Creazione mesh

Griglia non strutturata triangolare  $SW < 0,75$

- Impostare le condizioni inlet e outlet ( $v=83$  m/s)
- Soluzione e realizzazione di grafici
- Parametrizzazione di alcune variabili

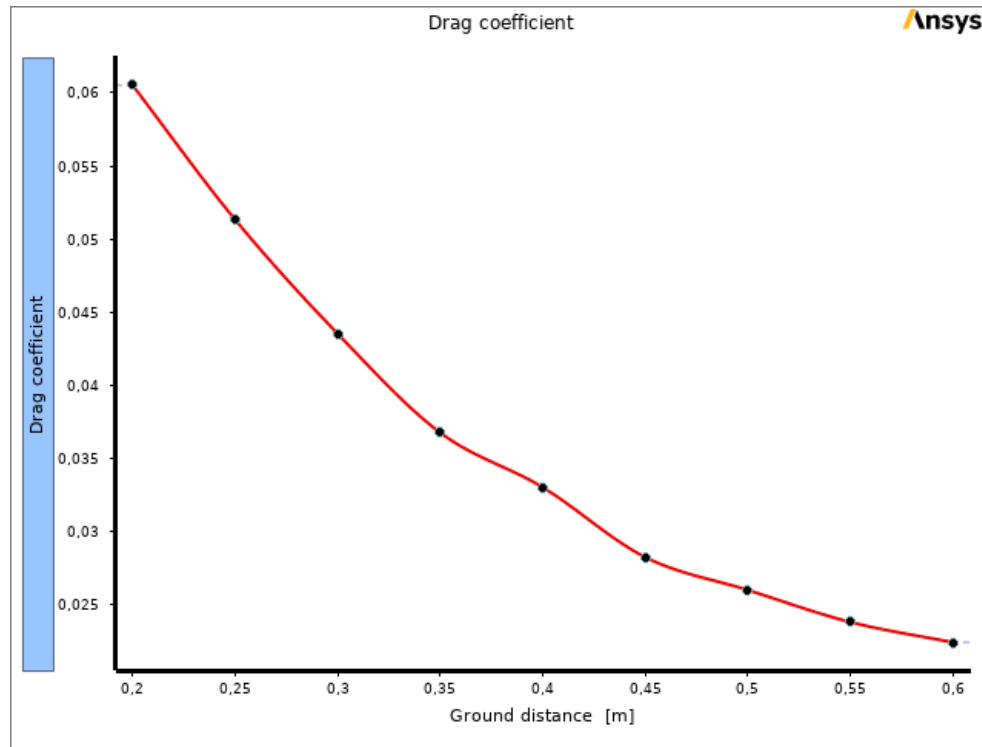
Angolo attacco profilo alare iniziale =  $3^\circ$

Distanza dal suolo iniziale = 0,25 m

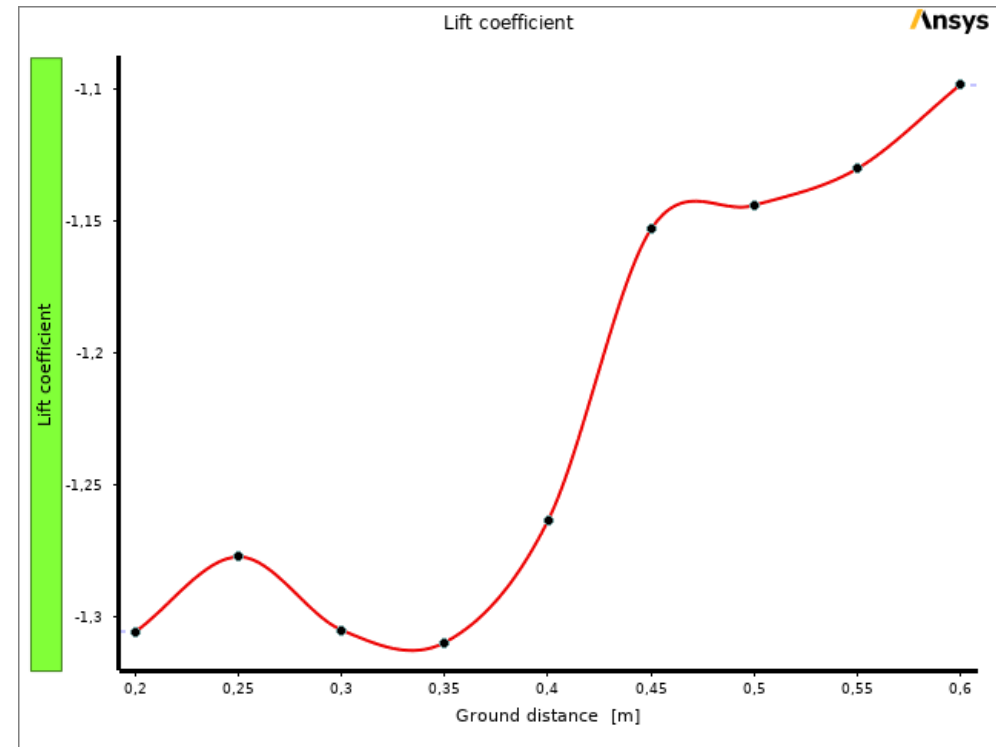


Impostazione mesh e relativa tabella che indica la skewness

Rappresentazione dei grafici finali in cui riportano i coefficienti di **resistenza** e di **portanza**



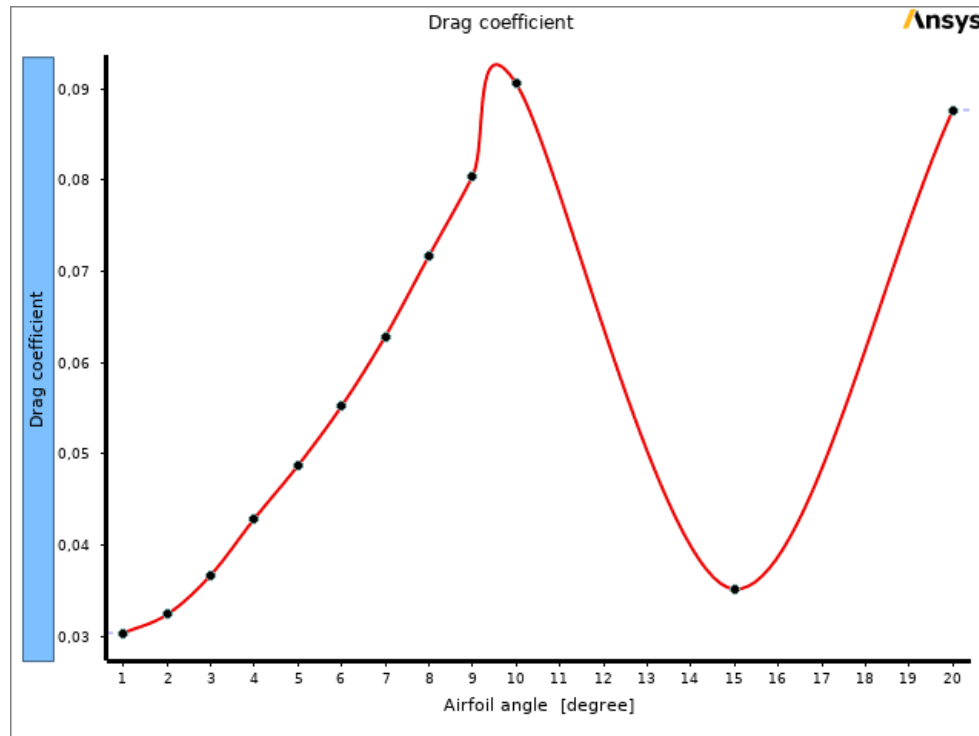
Coefficiente di drag in funzione della distanza del suolo dal profilo alare



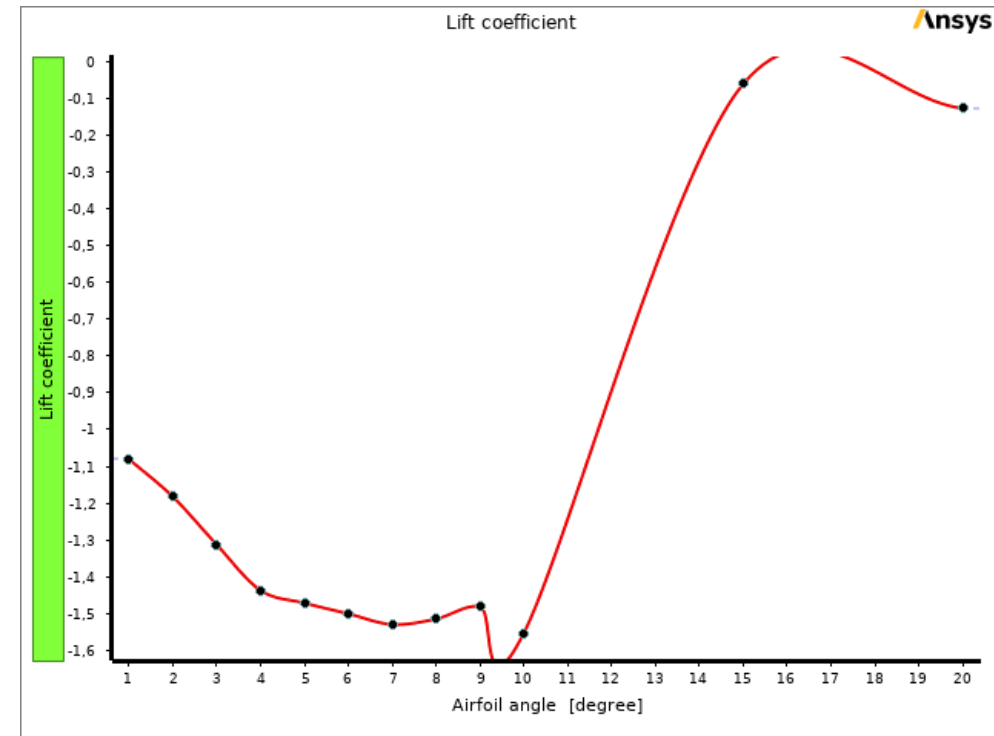
Coefficiente di lift in funzione della distanza del suolo dal profilo alare



Rappresentazione dei grafici finali in cui riportano i coefficienti di **resistenza** e di **portanza**

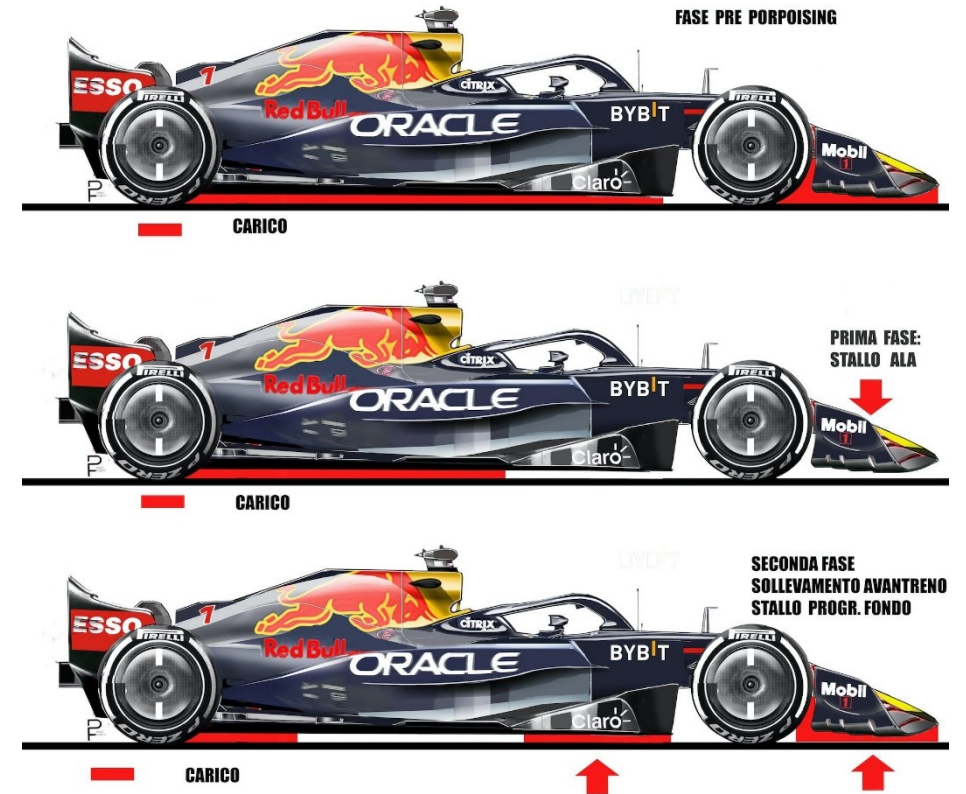


Coefficiente di drag in funzione dell'inclinazione del profilo alare



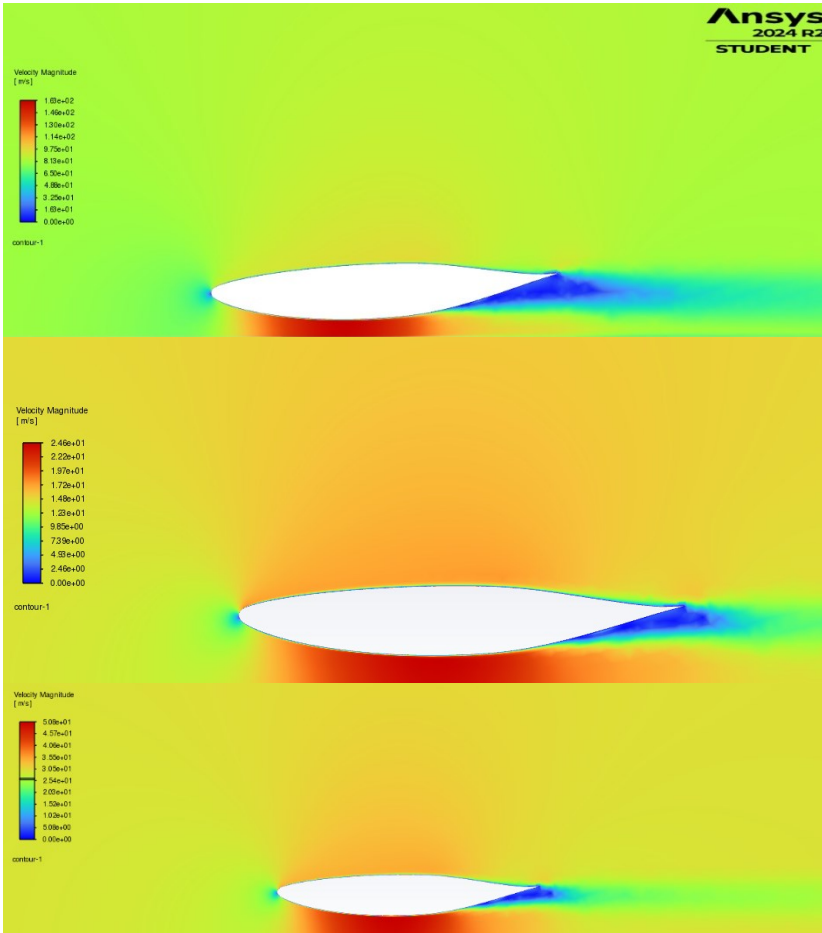
Coefficiente di lift in funzione dell'inclinazione del profilo alare

- Chiamato «effetto delfino»
- È uno stallo aerodinamico
- Downforce che rende la sezione molto ristretta
- Ciclo che si ripete in loop
- Si sviluppa alle alte velocità
- Problema già presente agli inizi dell'introduzione dell'effetto suolo
- Si manifesta solo in pista

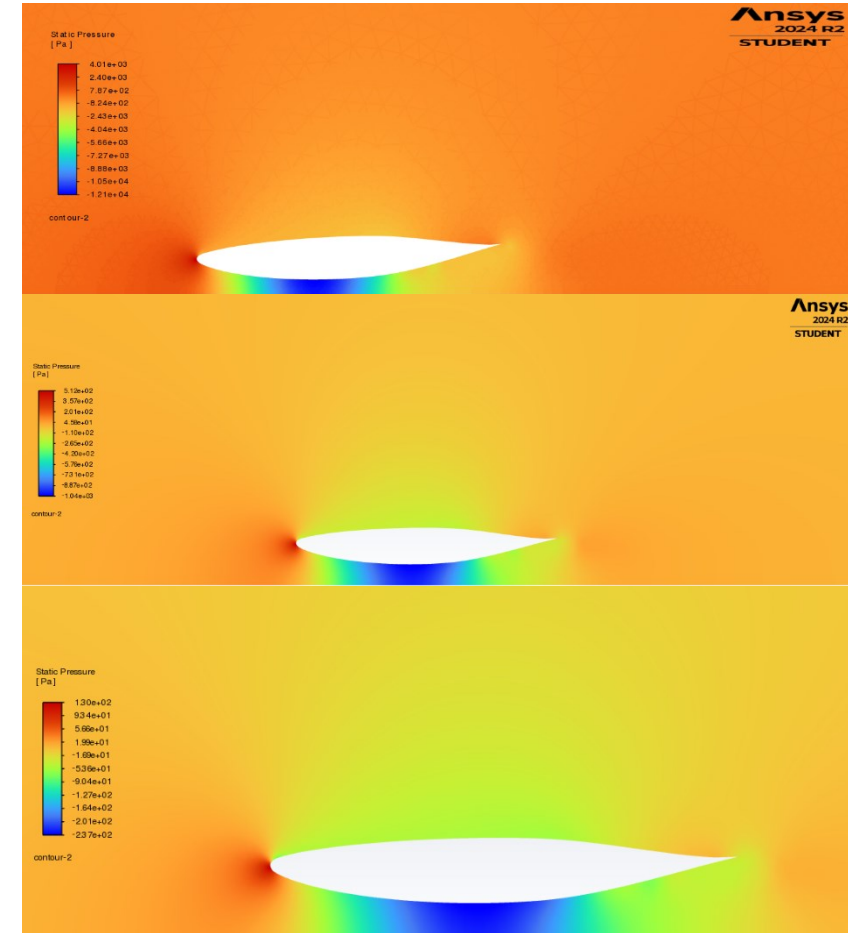


Fasi del fenomeno del popoising

- Il fenomeno può essere studiato tramite soluzione CFD variando la velocità della monoposto
- Si possono notare come variano i gradienti di velocità (o pressione) in funzione della velocità



Grafici della velocità dall'alto: 83, 30, 15 m/s



Grafici della pressione statica dall'alto: 83, 30, 15 m/s

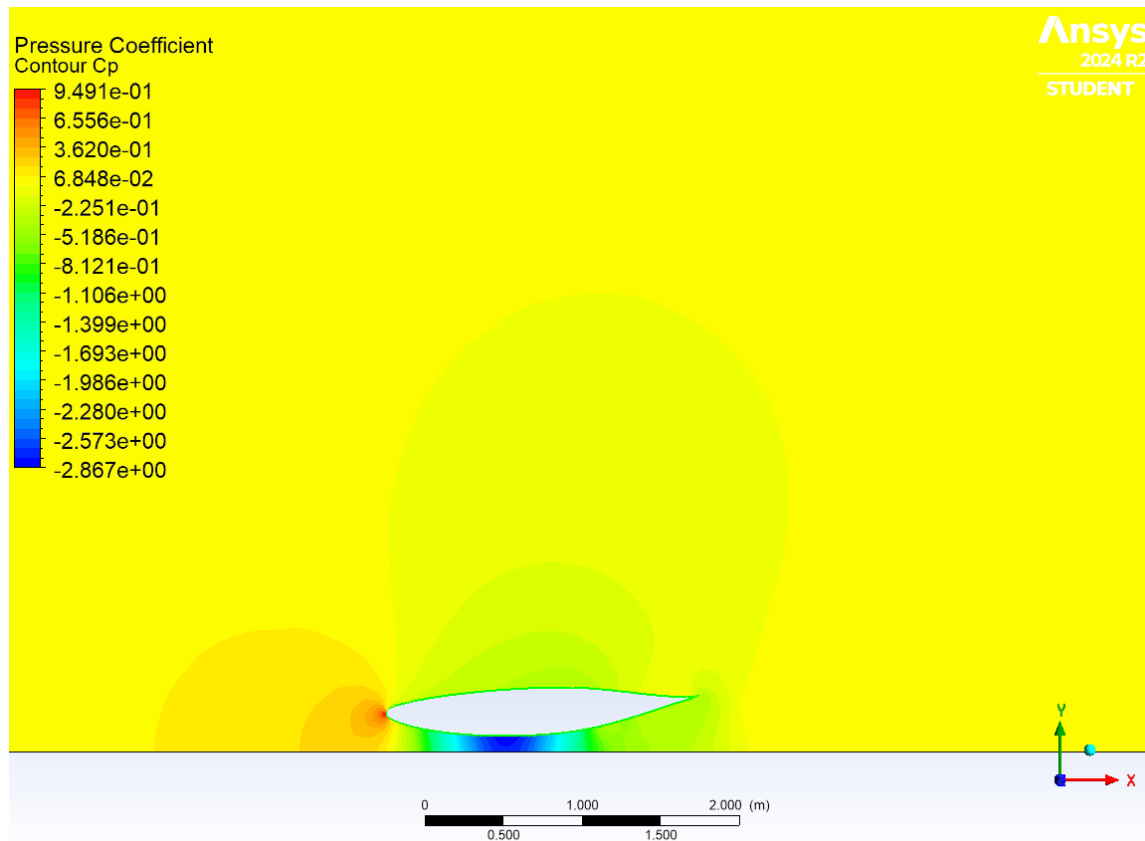
- Distanza ottimale del profilo dal suolo pari a 0,35 m
- Angolo di attacco pari a  $7^\circ$
- Non è sufficiente affidarsi alle simulazioni
- Aumentando la distanza dal suolo, il porpoising diminuisce
- Ogni profilo presenta la sue condizioni ottimali



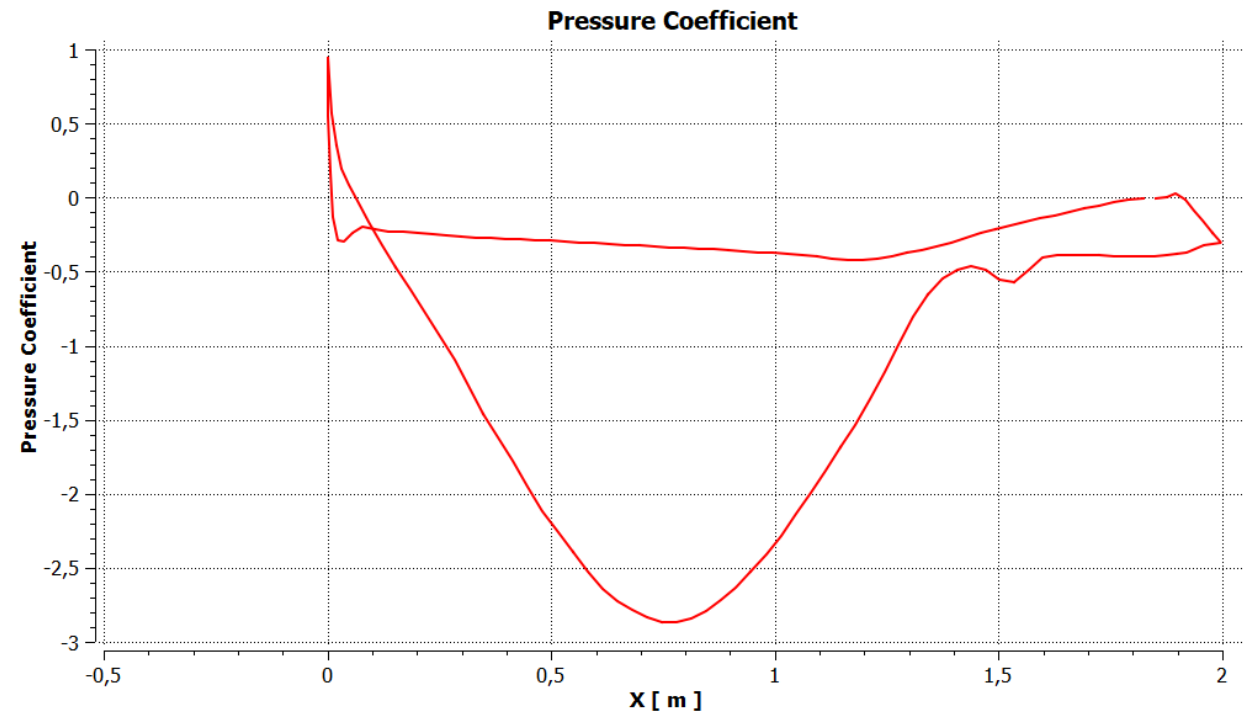
Gara F1 in condizioni bagnate della pista (GP Brazil 2024)

- ❖ Race Car Aerodynamics Design for Speed, Joseph Katz, 1995
- ❖ Meccanica dei fluidi, B.R. Munson, T.H. Okiishi, W.W. Huebsch, A.P. Rothmayer, 2016
- ❖ <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca662415-il>
- ❖ <https://www.studiotermotecnicotrovato.it/mesh/>
- ❖ [https://www.reddit.com/r/CFD/comments/10bo4tn/structured\\_vs\\_unstructured\\_mesh\\_in\\_turbulent\\_and/?tl=it](https://www.reddit.com/r/CFD/comments/10bo4tn/structured_vs_unstructured_mesh_in_turbulent_and/?tl=it)
- ❖ <https://www.ilprogettistaindustriale.it/i-domini-di-calcolo-nella-simulazione-cfd-oltre-il-concetto-di-fluido/>
- ❖ <https://www.youtube.com/watch?v=IRZVOsFAOnw>
- ❖ <https://www.youtube.com/watch?v=tzWcFeAfKSY>
- ❖ <https://adtesportsacademy.com/fl-effetto-suolo-ritorno-al-futuro/>
- ❖ <https://italia.gulfoilltd.com/ita/technological-advancements-f1-racing#:~:text=Gli%20effetti%20suolo%20furono%20alla,e%20al%20mantenimento%20della%20tecnologia.>
- ❖ Corso di fluidodinamica applicata, ingegneria meccanica magistrale tenuto dal prof. Andrea Bottacin Busolin

Rappresentazione dei grafici finali in cui riportano il coefficiente di pressione



Andamento del coefficiente di pressione per il profilo alare



Variazione del coefficiente di pressione in funzione della lunghezza dell'intero profilo alare