

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

***Relazione per la prova finale  
«Sviluppo di un Modello CFD per la  
simulazione in curva di una vettura FSAE»***

Tutor universitario: Prof. Francesco Picano

Tutor universitario: Prof. Giovanni Meneghetti

Laureando: *Lorenzo Iori*

Padova, 24/03/2022

Realizzazione di un modello di simulazione *CFD* di una vettura FSAE (**MG 15.20 EVO**) in condizioni di curva a raggio e velocità costante, con i seguenti obiettivi:

- Stima dei coefficienti aerodinamici in diverse condizioni dinamiche della vettura:
  - Miglioramento dell'affidabilità di simulazione di tempo sul giro,
  - Studio e sviluppo di pacchetti aerodinamici futuri, ottimizzati per condizioni in curva.
- Parametri:
  - Velocità angolare,
  - Raggio di curvatura,
  - Angolo di sterzo.
- Automatizzazione analisi delle simulazioni,
- Validazione in pista dei risultati ottenuti.

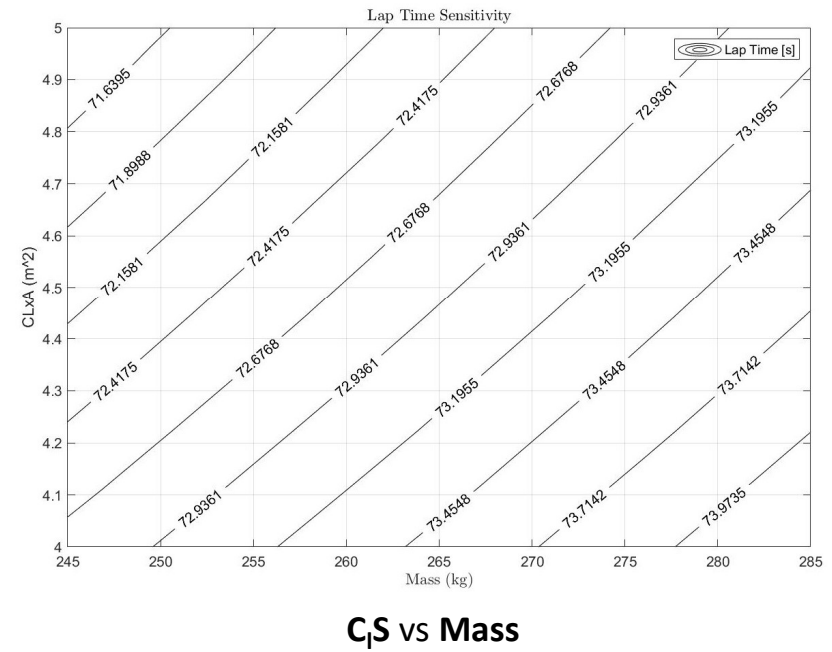
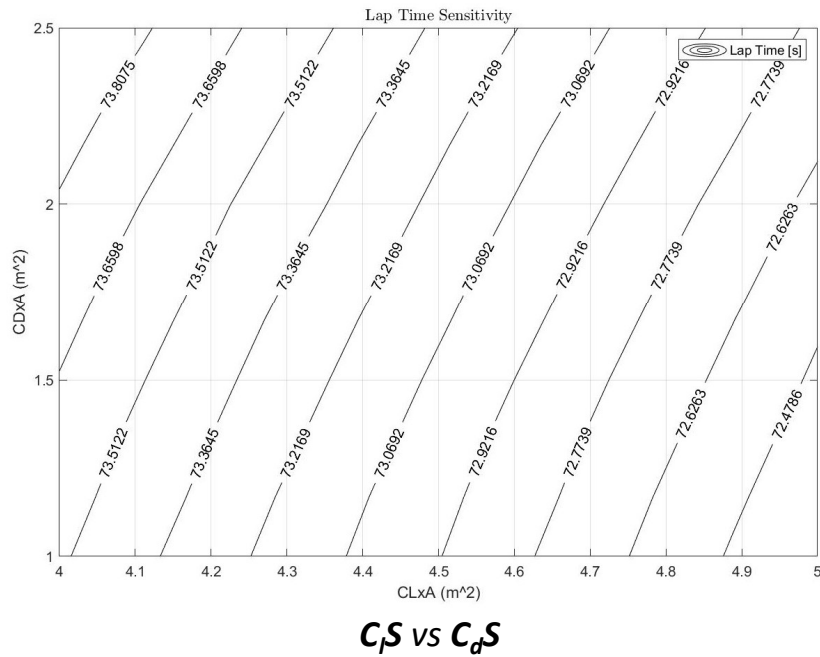


MG 15.20 EVO – RedBull Ring – FSA 2021

**Simulatore di tempo sul giro:** strumento previsionale e di scelta design vettura.

Confronto di **parametri sotto il controllo del progettista** su *isocurve di laptime*:

- **$C_f S$  vs  $C_d S$ ,**
- **$C_f S$  vs Mass,**



Le forze generate durante il moto della vettura sono veicolate interamente dalla superficie di contatto degli pneumatici (*contact patch*):

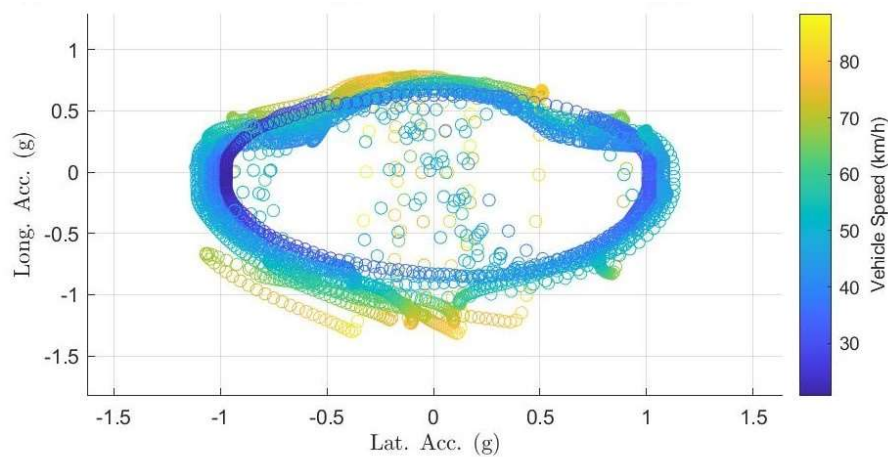
**Modello pneumatico:**

- Forze di natura elastica,
- Calo del coefficiente di attrito all'aumentare del carico normale.

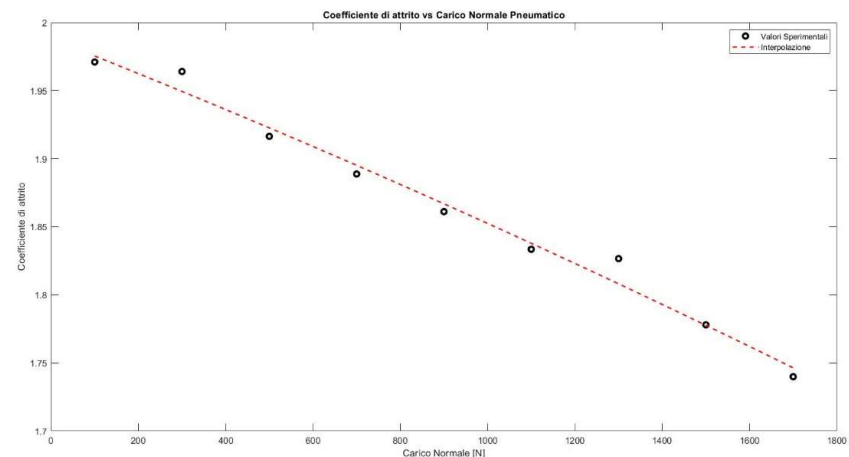
$$F_{MAX} = \mu * F_Z$$

$$\mu = f(F_Z)$$

**Obiettivo: Aumento del carico normale sugli pneumatici grazie a forze di natura aerodinamica.**



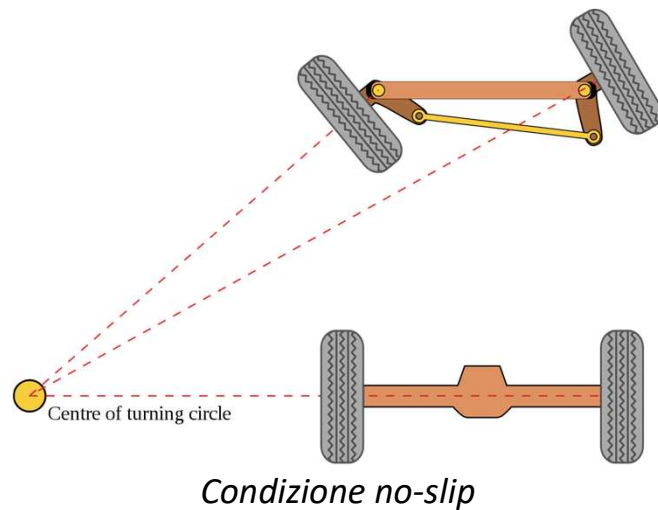
*Ellisse di Trazione*



$\mu$  vs  $F_Z$

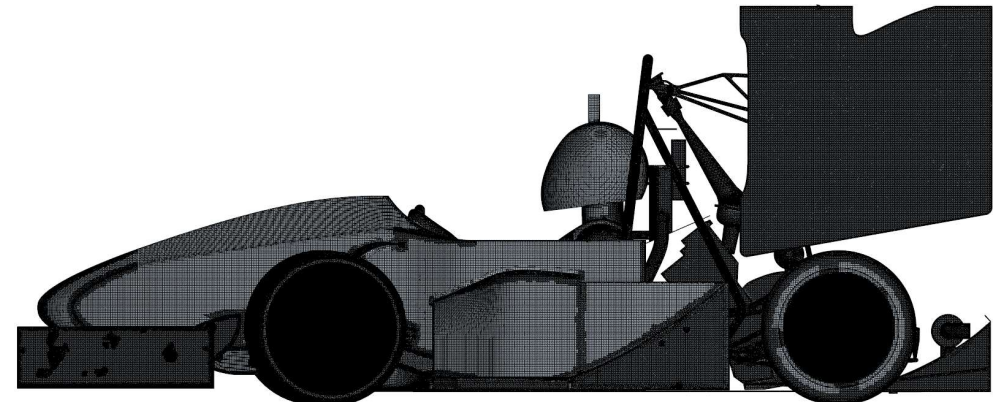
### DINAMICA DEL VEICOLO:

- Modello no-slip della vettura (*True Ackermann steering*),
- Curva con raggio e velocità costante,
- Angoli di rollio e beccheggio nulli, «*yaw rate*» costante,
- Realizzato su *MG 15.20 EVO*.



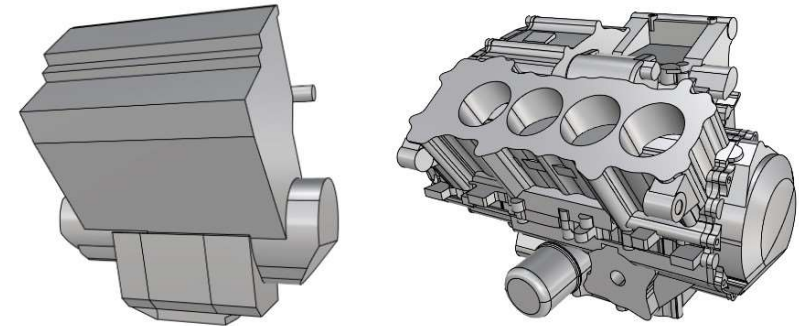
### CFD/AERODINAMICO:

- Software: *Star-CCM+*
- *RANS* + Modello di turbolenza *K- $\omega$  SST*,
- *Mesh* poliedrica di ca. 70 mln di celle,
- *Solutore accoppiato* per migliore stabilità e convergenza (maggiore costo computazionale).

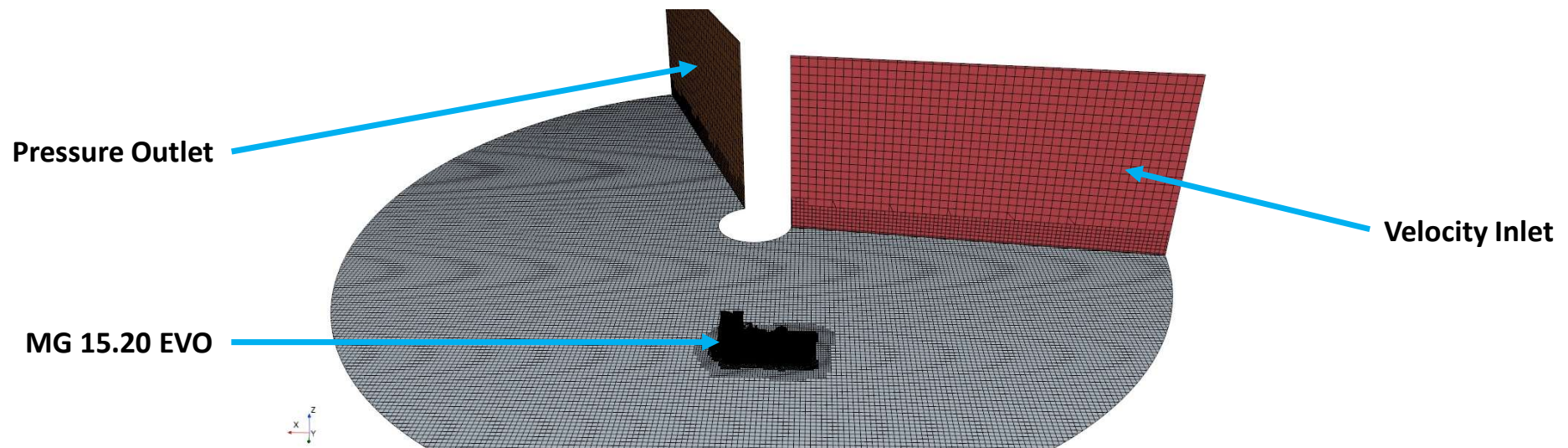


## APPROCCIO CFD:

- Semplificazione geometria,
- *MRF(s)*: «*Moving Reference Frame(s)*»,
  - Rotazione intera vettura,
  - Rotazione dei 4 gruppi ruota, sovrapposta a quella della vettura.
- Condizioni al contorno sul dominio,
- Condizione ***no-slip*** sui componenti della vettura.



Semplificazione Modello Blocco Motore

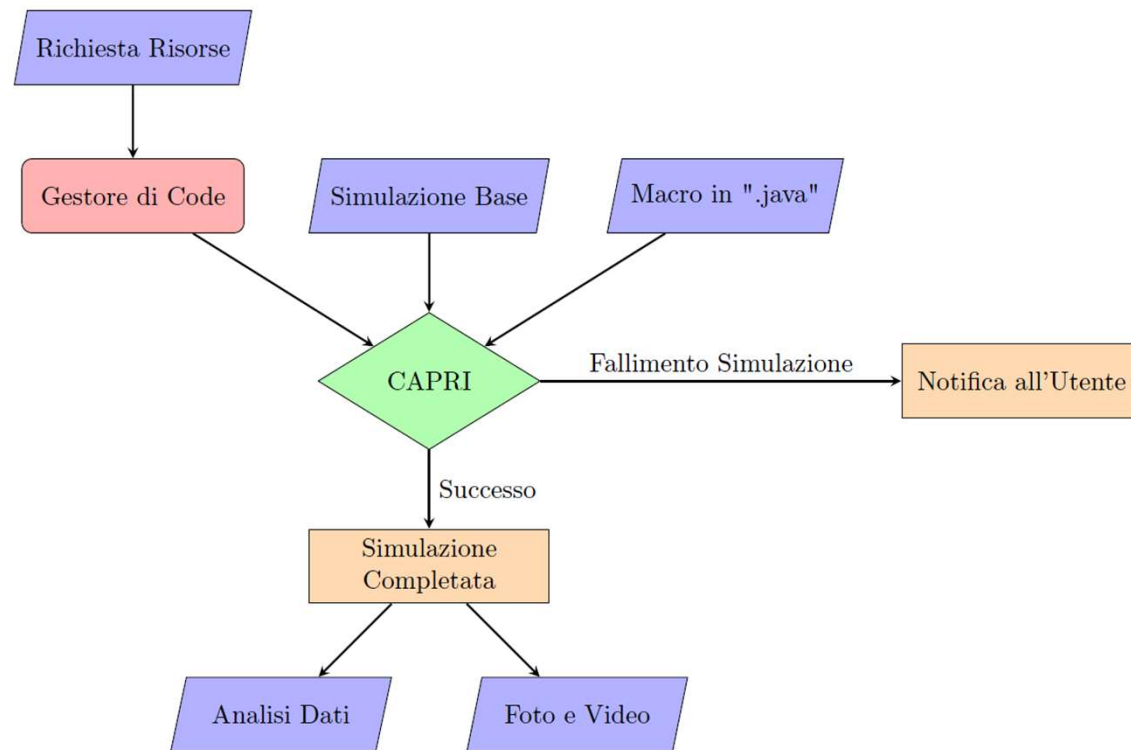


## CAPRI – Calcolo ad Alte Prestazioni per la Ricerca e l’Innovazione:

- Elevato costo computazionale/simulazione:
  - 128+ GB RAM,
  - 21h con 16 cores.
- Automatizzazione simulazioni:
  - Macro in linguaggio «*java*»,
  - Esecuzione in remoto delle simulazioni.

```
public void moveSTP(String part){ //function to move STP file to <par
    String fromFile = part + ".stp"; //original directory
    String toFile = part + sep + part + ".stp"; //new directory
    try {
        Files.move(Paths.get(fromFile), Paths.get(toFile));
    }
    catch (IOException exc){
        exc.printStackTrace(); //if an exception is thrown
    }
}
```

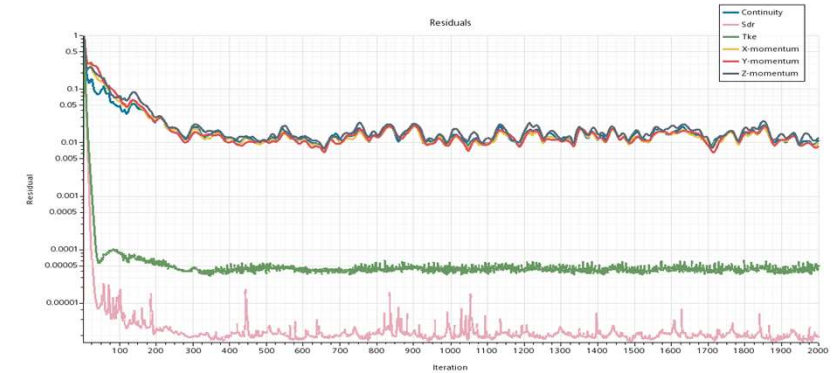
*Porzione macro «java»*



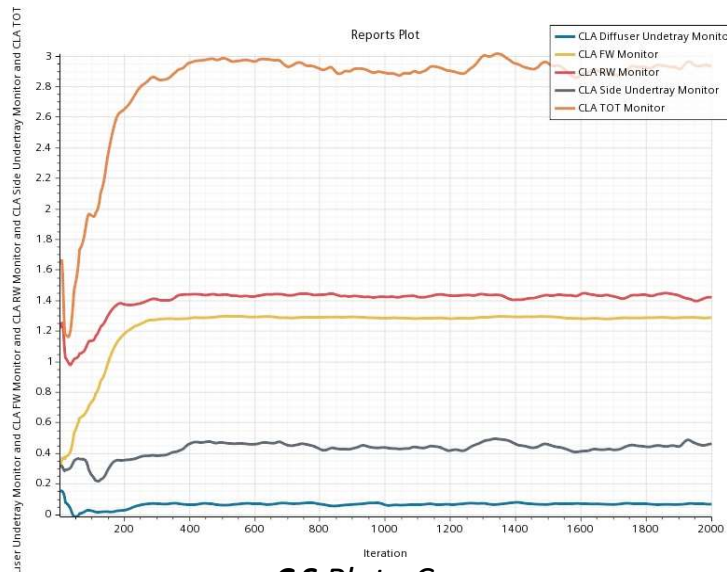
*Procedura simulazione su «CAPRI»*

## Residui elevati rispetto alle simulazioni «in rettilineo»:

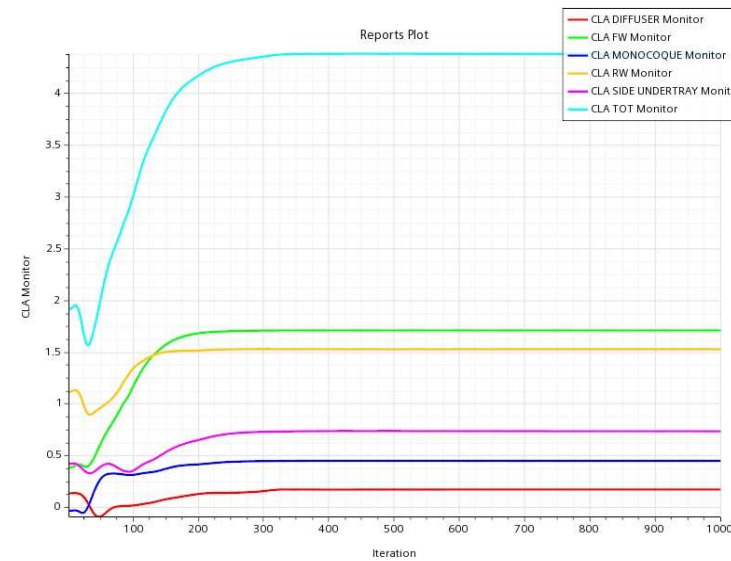
- Semplificazione problema via *MRF(s)*,
- Leggera «fluttuazione» dei valori aerodinamici:
  - Media delle ultime 500 iterazioni,



**Residui vs Iterazioni**



**$C_p$  Plot - Curva**



**$C_p$  Plot - Rettilineo**

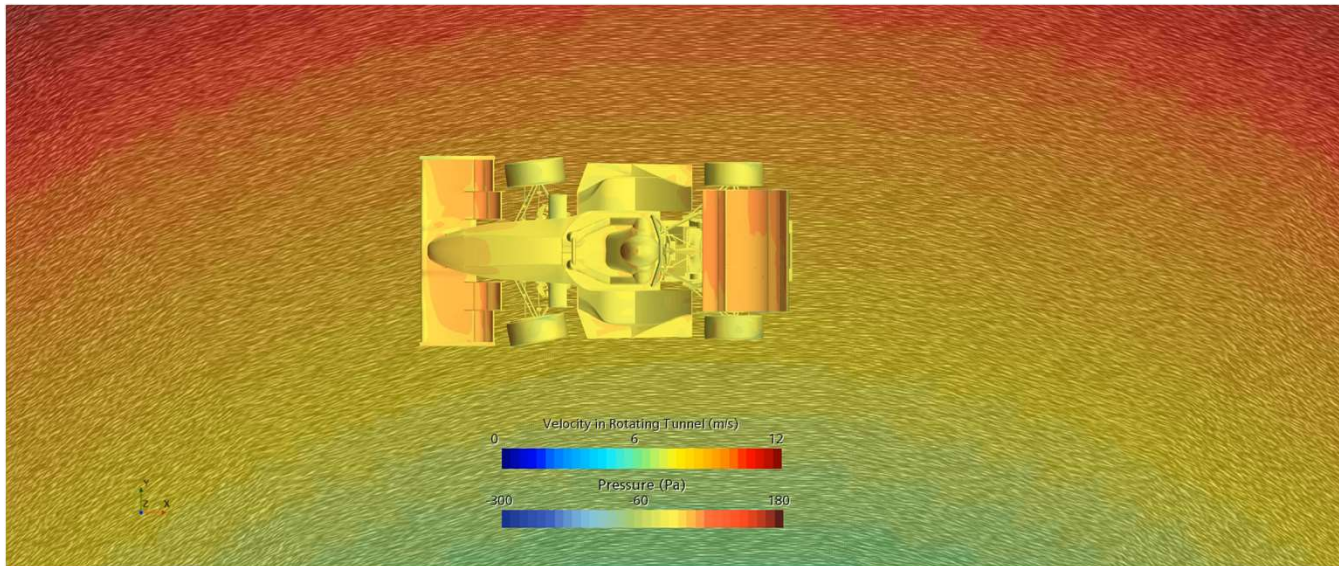


### ANALISI DATI:

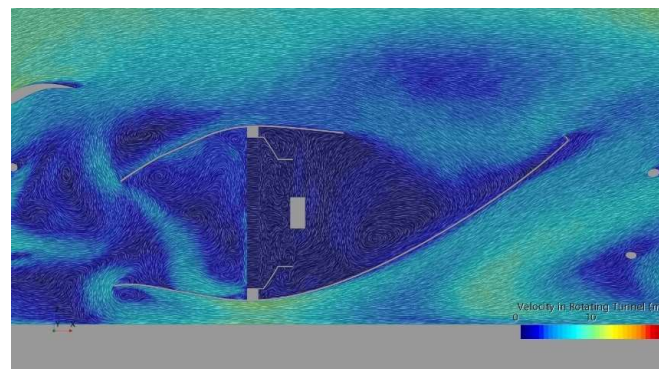
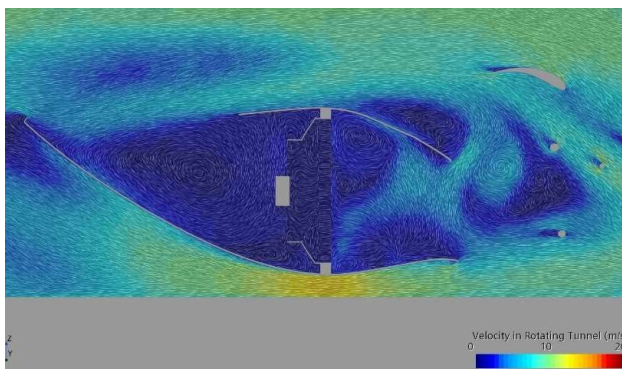
$$Efficienza = \frac{C_l S}{C_d S}$$

- Intera Vettura:
  - Importante calo di performance aerodinamica,
  - Aeropack non progettato per lavorare in curva.
- Ala anteriore:
  - Calo di performance aerodinamica,
  - Aumento efficienza aerodinamica.
- Ala posteriore:
  - Aumento performance aerodinamica,
  - Dati “falsati” dal modello no slip e true Ackermann steering → Rappresentazione non affidabile della realtà fisica.

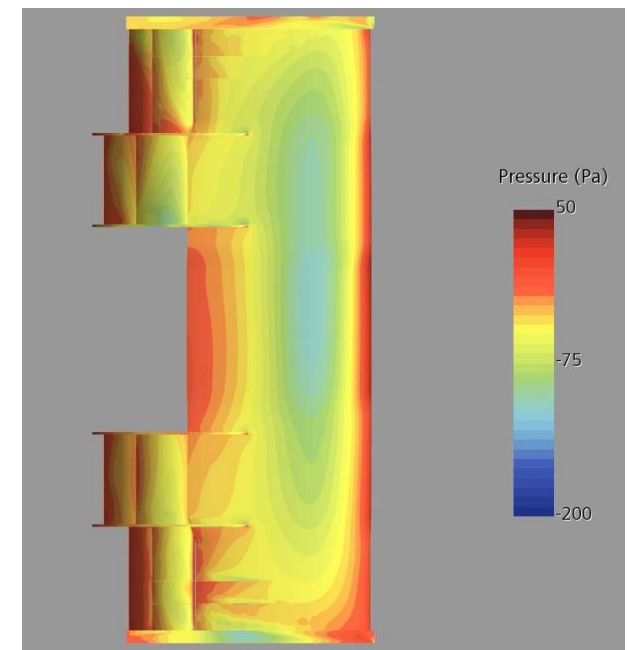
Velocità: 8.333 m/s	Rettilineo	Curva	Variazione %
<b>C<sub>l</sub>S [m<sup>2</sup>] - Totale</b>	4.10	2.89	- 29.5 %
<b>C<sub>d</sub>S [m<sup>2</sup>] - Totale</b>	1.63	1.27	- 22.1 %
<b>Efficienza Totale</b>	2.52	2.28	- 9.5 %
<b>C<sub>l</sub>S [m<sup>2</sup>] – Ala Anteriore</b>	1.69	1.27	- 24.9 %
<b>C<sub>d</sub>S [m<sup>2</sup>] – Ala Anteriore</b>	0.26	0.19	- 26.9%
<b>Efficienza Ala Anteriore</b>	6.5	6.69	+ 2.9 %
<b>C<sub>l</sub>S [m<sup>2</sup>] – Ala Posteriore</b>	1.42	1.44	+ 1.4 %
<b>C<sub>d</sub>S [m<sup>2</sup>] – Ala Posteriore</b>	0.77	0.74	- 3.9 %
<b>Efficienza Ala Posteriore</b>	1.84	1.95	+ 6.0 %



*Campo di Velocità – Vista Superiore*



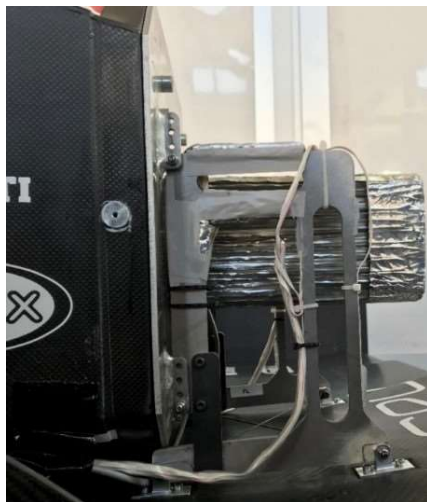
*Confronto Zona Pance - SX: Esterna – DX: Interna*



*Pressione Statica –  
Suction Side Ala Anteriore*

**ANALISI DATI:**

- Tesi magistrale del *Sig. Riccardo Bertipaglia*: Acquisizione carichi aerodinamici su **MG 15.20 EVO**:
  - Dataset con vettura in curva a raggio e velocità costante.
- Difficile correlazione dei dati:
  - Dati acquisiti a velocità molto basse,
  - Errori nel setup sperimentale,
  - Modello CFD poco «rifinito».



Setup Sperimentale - SX: Ala Anteriore – DX: Ala Posteriore

Velocità: 8.333 m/s	Acquisizioni Sperimentali	Dati CFD	Variazione %
$C_pS$ [m <sup>2</sup> ] – Ala Anteriore	1.51	1.27	- 15.9 %
$C_dS$ [m <sup>2</sup> ] – Ala Anteriore	0.06	0.19	+ 216.7 %
Efficienza Ala Anteriore	25.2	6.69	- 73.65 %
$C_pS$ [m <sup>2</sup> ] – Ala Posteriore	0.99	1.44	+ 45.5 %
$C_dS$ [m <sup>2</sup> ] – Ala Posteriore	0.39	0.74	+ 89.7 %
Efficienza Ala Posteriore	2.54	1.95	- 23.2 %

## Risultati ottenuti:

- **Modello funzionante di simulazione in curva:**
  - Base di partenza per futuri miglioramenti,
  - Parametrizzazione delle variabili principali,
  - Modello con forti approssimazioni.
- **Automatizzazione delle simulazioni:**
  - Incremento nelle risorse di calcolo della Squadra,
  - Automatizzazione Post-Processing.
- **Validazione in pista dei risultati ottenuti:**
  - Validazione non efficace,
  - Base di partenza per futuri lavori di acquisizione carichi.

[1] Lezioni e materiale didattico pubblicato all'interno del corso di Aerodinamica I, Università degli Studi di Padova, facoltà di Ingegneria Aerospaziale  
- Prof. Francesco Picano

[2] John Anderson, *Fundamentals of Aerodynamics - Sixth Edition*;

[3] Joseph Katz, *Race Car Aerodynamics - Designing for Speed*;

[4] Siemens Support Center, *External Aerodynamics with Simcenter Star-CCM+ - Best Practice Guidelines 2020.3*;

[5] Siemens: Claudio Santarelli & Léon Reketat, *External Aerodynamics with Simcenter Star-CCM+ - Guidelines for FSAE Cars*;

[6] Riccardo Bertipaglia - Tesi Magistrale, *Acquisizione dei carichi aerodinamici agenti sulla vettura formula S.A.E. mg15.20 EVO* - Relatore: Prof. Giovanni Meneghetti, Correlatore: Ing. Davide Cortivo;

[7] Junmin Wang & R. Longoria, *Coordinated and Reconfigurable Vehicle Dynamics Control*

[8] Cluster UNIPD - CAPRI: Calcolo ad Alte Prestazioni per la Ricerca e l'Innovazione - <https://capri.dei.unipd.it/>

[9] Sito Ufficiale Formula SAE - <https://www.fsaonline.com/>

[10] Sito Ufficiale Formula Student Germany (FSG) - <https://www.formulastudent.de/fsg/>

[11] Classifica Mondiale Formula Student - <https://fs-world.org/>

[12] Album Fotografico Ufficiale FSEast 2022 - <https://www.flickr.com/photos/fseast/albums>

[13] Pantieri Lorenzo e Gordini Tommaso (2008), L'arte di scrivere con LATEX - <http://www.lorenzopantieri.net/LaTeXfiles/ArteLaTeX.pdf>

[14] Gregorio Enrico (2011), Come comporre un frontespizio e vivere felici - <http://texdoc.net/texmf-dist/doc/latex/frontespizio/frontespizio.pdf>