

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

Relazione per la prova finale
***Progettazione e analisi aerodinamica di un'ala anteriore di
Formula 1 2026***

Tutor universitario: Prof. Federico Dalla Barba

Laureando: *Simone Ferrara*

Padova, 16/07/2026

- **Regolamento FIA 2026:** vetture più leggere e compatte; stima di carico aerodinamico -30% e resistenza -55% rispetto al ciclo 2022–2025
- **Aerodinamica attiva** in sostituzione del DRS: ali anteriore e posteriore mobili, attivabili da ogni pilota
- **Due stati operativi:** Corner Mode (alto carico in curva) e X-Mode (bassa resistenza in rettilineo)
- **L'ala anteriore** diventa il primo elemento chiamato a gestire due condizioni operative profondamente diverse
- **Scenario ancora poco esplorato** in ambito accademico → motivazione del lavoro



Auto regolamento 2026
(Fonte : [7])

- **Riprendere** alcuni fenomeni aerodinamici tipici di una vettura di formula 1.
- **Analizzare** il regolamento tecnico FIA 2026 e i vincoli geometrici imposti sull'ala anteriore (art. C3.10)
- **Progettare** un modello CAD parametrico dell'ala anteriore, conforme al regolamento, nelle due configurazioni di aerodinamica attiva (CATIA V5 / 3DEXPERIENCE)
- **Valutare** le prestazioni aerodinamiche tramite analisi CFD 2D RANS in ANSYS Fluent, confrontando Corner Mode e X-Mode
- **Approfondire** un caso di studio: l'ala posteriore "Macarena" della Ferrari SF-26



FIA LOGO
(Fonte : [8])



Ala Macarena SF-26
(Fonte : [9])

Forze ed equazioni di governo

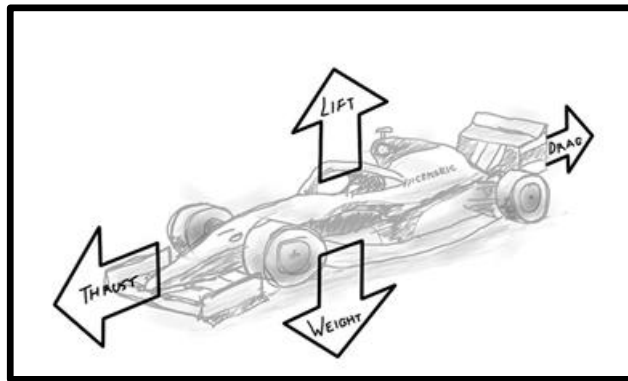
- ▶ **Quattro forze sulla vettura:** deportanza, resistenza, spinta e peso.
- ▶ **Deportanza = portanza negativa** ($L = C_L \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot A$, con $C_L < 0$).
- ▶ **Flusso incomprimibile:** $Ma < 0,3$ (≈ 360 km/h) $\rightarrow$ densità costante.

Continuità

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

Navier–Stokes (2D, staz.)

$$\rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v}$$



Le quattro forze su una vettura di Formula 1
(Fonte : [10])

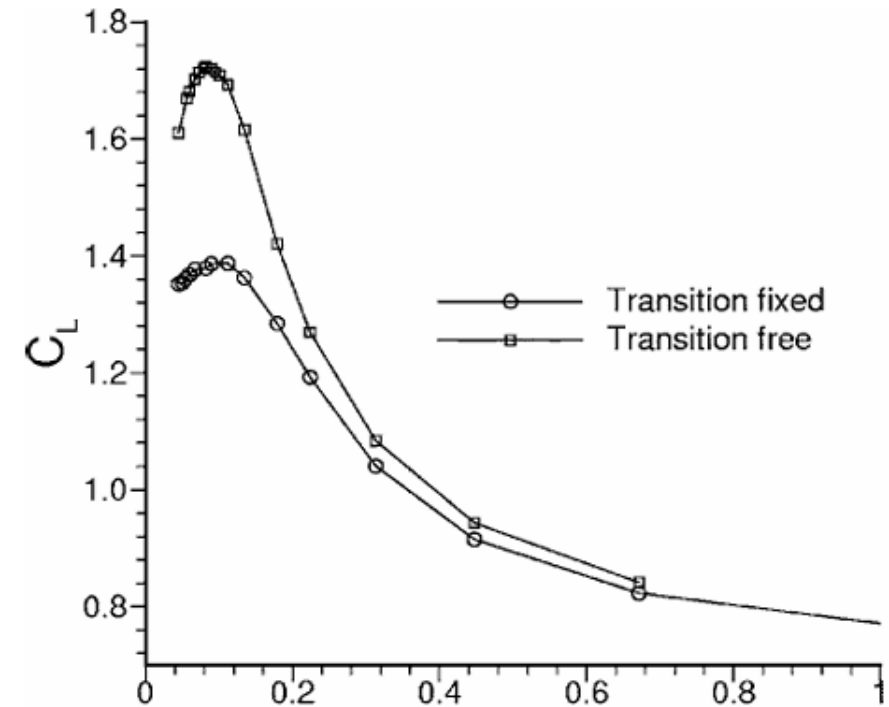
Fenomeni aerodinamici fondamentali in F1

- ▶ **Principio di Bernoulli:** lungo una linea di flusso,
 $p + \frac{1}{2} \rho V^2 = \text{cost.}$
- ▶ **Effetto suolo (Venturi):** il flusso accelera nel condotto tra ala e suolo, generando depressione e carico.
- ▶ **Effetto Coandă:** un getto fluido aderisce alle superfici curve e ne segue il profilo.
- ▶ **Separazione dello strato limite:** sotto gradiente di pressione avverso il flusso si stacca, formando scia e ricircolazione.

- **Effetto suolo:** ridurre l'altezza da terra intensifica la depressione, ma in modo non monotono .
- **Curva C_L - h/c a due regimi:** incremento fino a h_{max} , poi crollo (downforce reduction).
- **Vortici di bordo (endplate):** inducono depressione aggiuntiva (vortex-induced suction) ma sono soggetti a rottura (vortex breakdown).
- **Scia da separazione:** compatta prima della separazione; instabile, con flapping e dopo con allargamento.

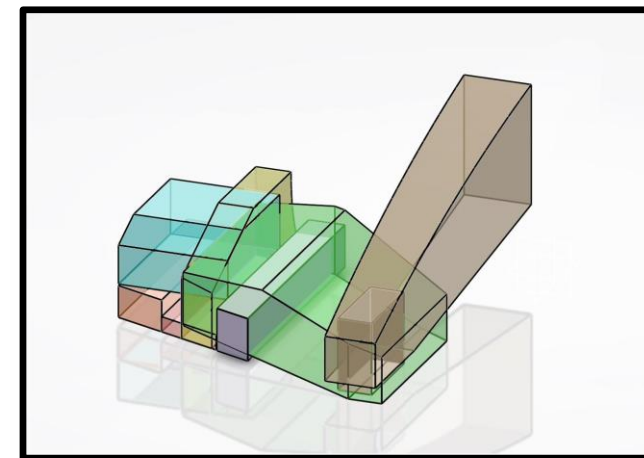
Sequenza di meccanismi in ground effect

separazione dello strato limite → transizione laminare-turbolenta
→ rottura dei vortici di bordo → instabilità e allargamento della scia

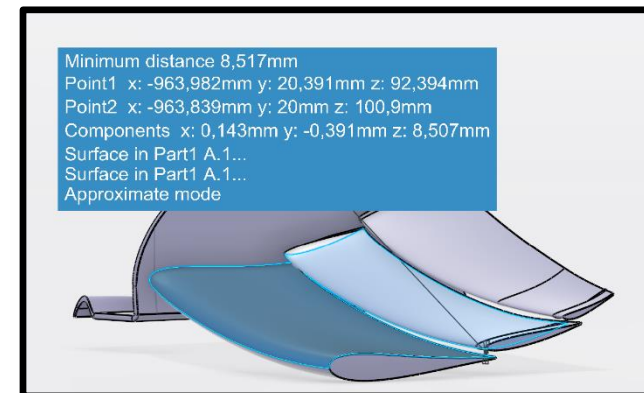


Coefficiente di deportanza C_L in funzione di h/c : due regimi separati da h_{max} (Fonte : [3])

- **Box di legalità:** ogni componente contenuto nei volumi di riferimento FIA (RV-FW-PROFILES, RV-FWEP-BODY, RV-FWEP-OFP, RV-FWEP-IFP)
- **Massimo 3 profili** (main + 2 flap); distanza tra elementi adiacenti tra 5 e 15 mm (slot gaps)
- **Vincoli su curvature,** visibilità dei bordi d'uscita e angolo delle normali
- **Front Wing Adjuster System:** rotazione dei flap attorno ad assi fissi (punti A–B, C–D); transizione ≤ 400 ms
- **Ricostruzione CAD dei box** come riferimento costante di conformità durante la modellazione

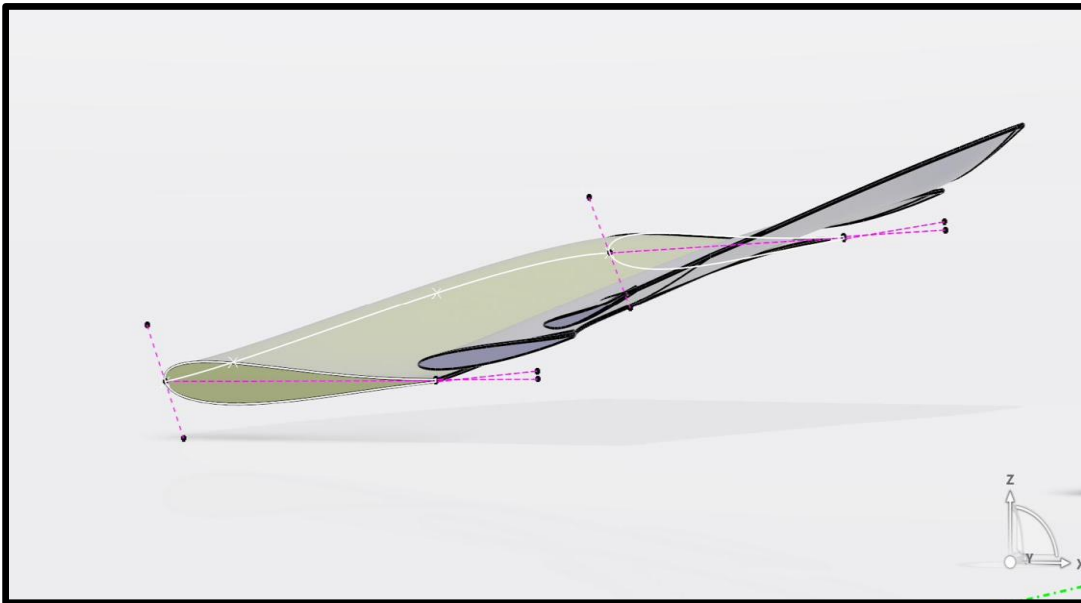


Ricostruzione CAD dei box di legalità (art. C3.10.1–C3.10.5)

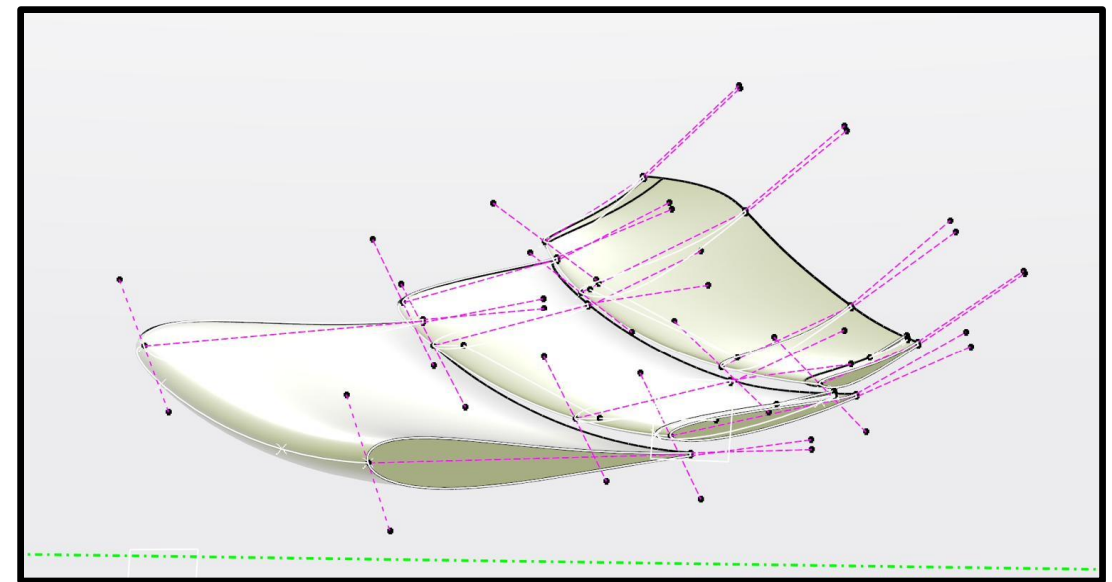


Rispetto dei limiti dettati dal regolamento (art. C3.10)

- **Approccio preliminare via MATLAB abbandonato:** accurato ma privo di flessibilità (ogni modifica richiedeva l'intera catena di reimportazione)
- **Parametrizzazione nativa CAD a 5 gradi di libertà:** tangente al leading edge, retta-corda (corda + incidenza), spessore del trailing edge, tangenti superiore e inferiore al bordo d'uscita

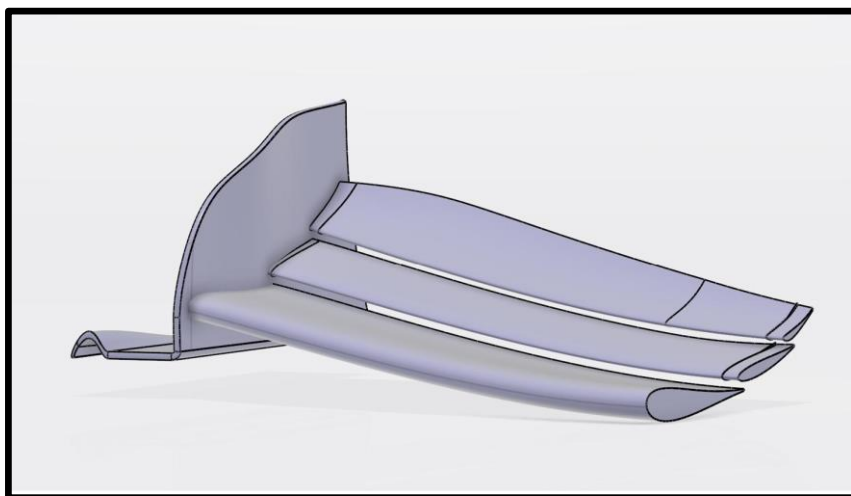


Parametrizzazione a 5 gradi di libertà del singolo profilo

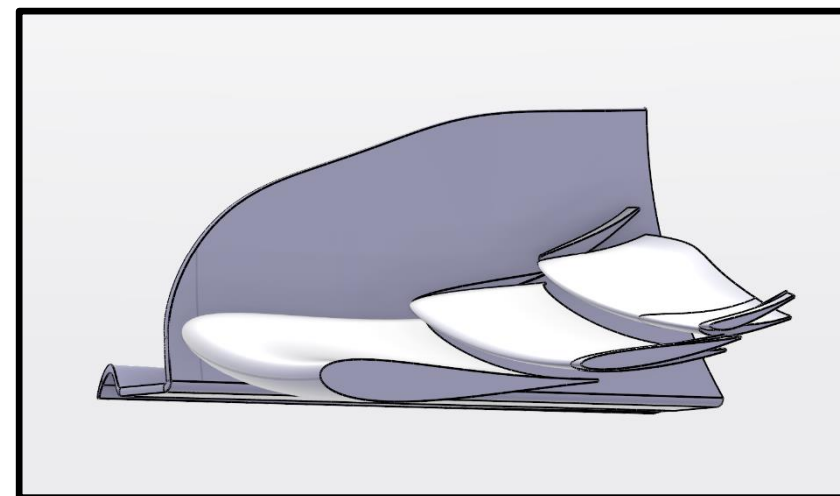


Main plane, flap primario e flap secondario completati

- **Rotazione dei flap attorno agli assi regolamentari:** flap primario 4° , flap secondario 12°
- **Criticità risolte:** intersezioni tra le superfici e violazione delle distanze minime → flap suddivisi in porzioni fisse e porzione centrale mobile

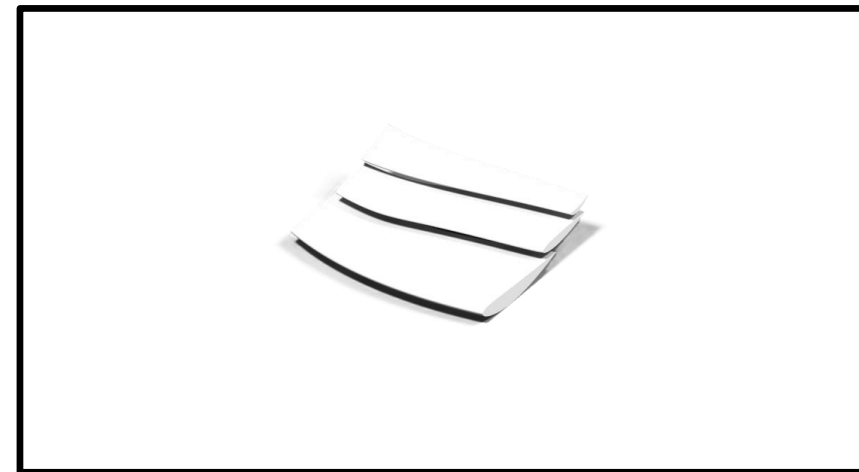
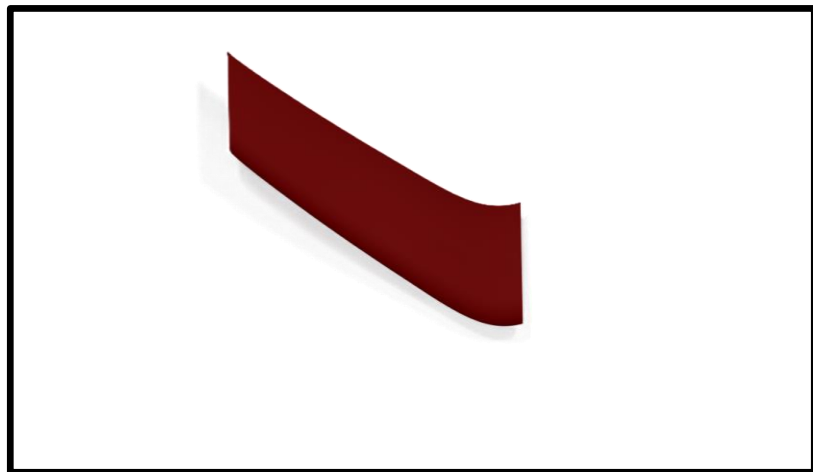
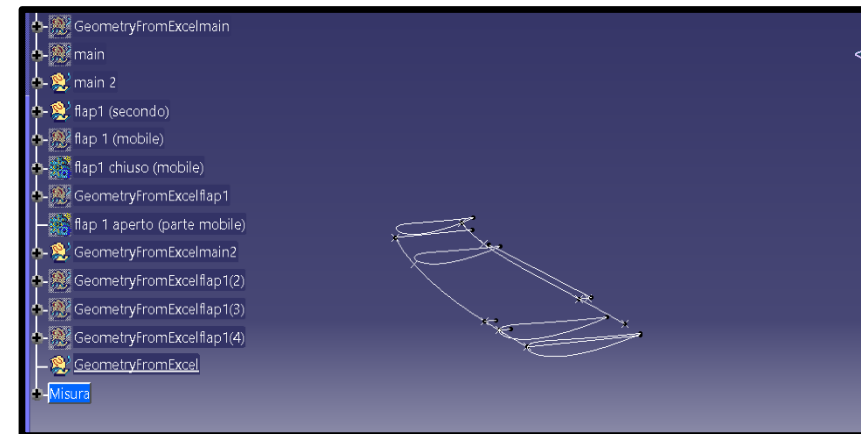


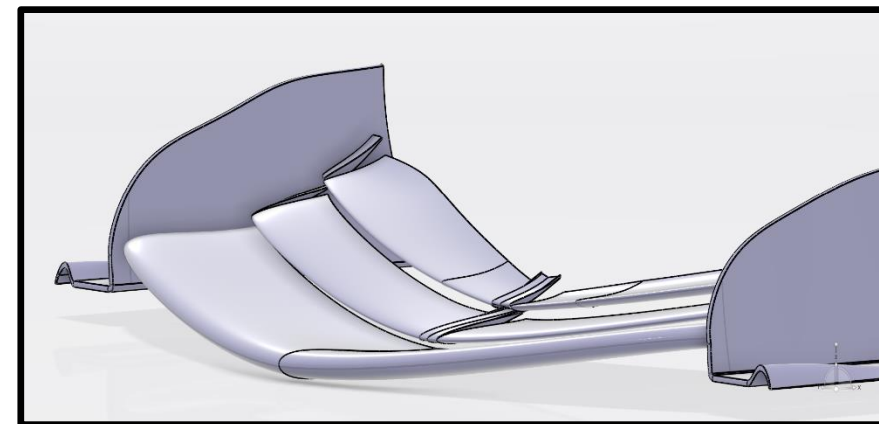
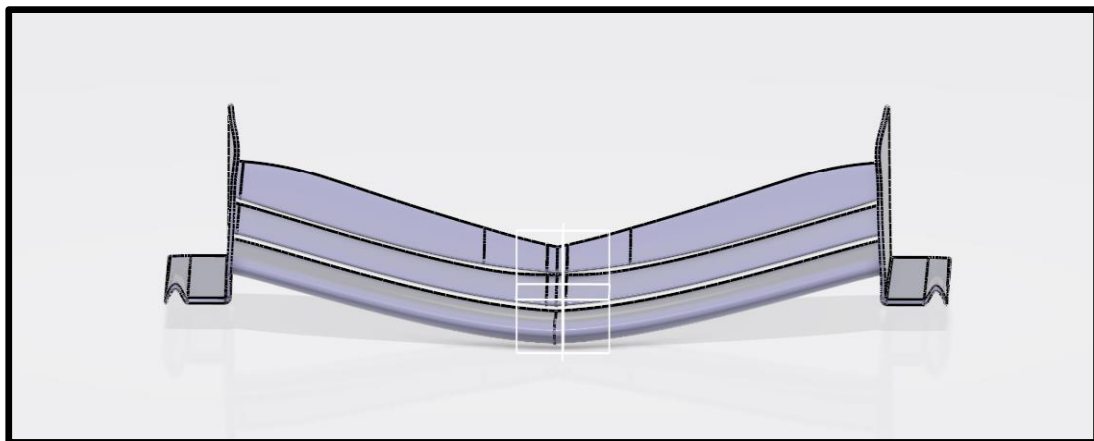
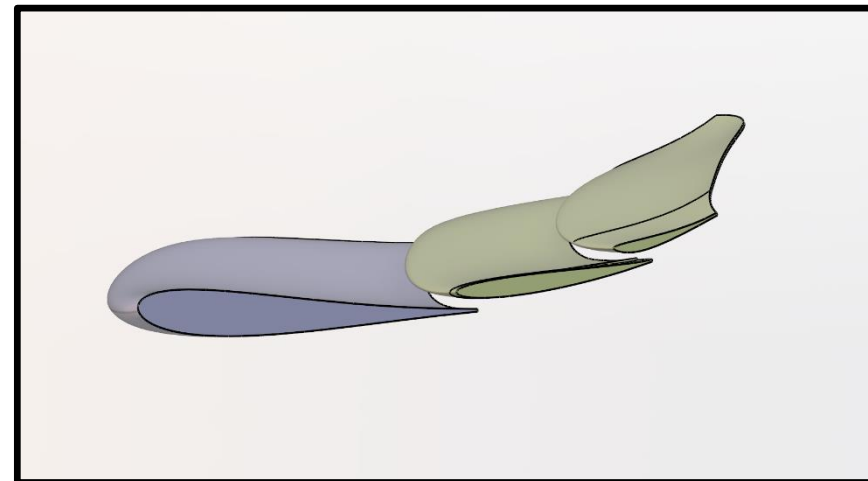
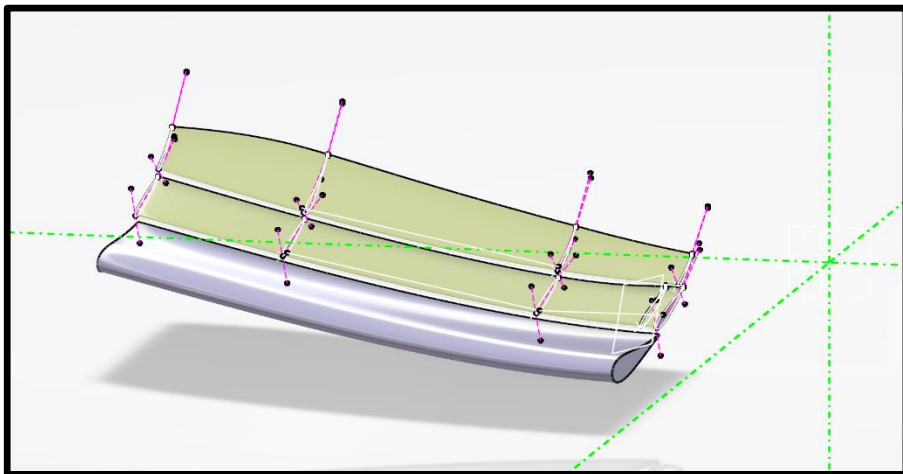
Corner Mode: configurazione ad alto carico



X-Mode: configurazione a bassa resistenza


```
airfoilspline_v9.m X +
C:\Users\sferri\Desktop\catia\profili, excel generazione e matlab code\airfoilspline_v9.m
1 clear;
2 clc;
3 %INSERIRE I PROFILI DESIDERATI IN ORDINE
4 airfoilshape={'4412.dat', '4412.dat', '4412.dat', '4412.dat'};
5 %INSERIRE GLI ANGOLI DI CIASCUN PROFILO
6 alfa=[0.8, 1.0, 1.3, 1.5];
7 %INSERIRE LA CORDA DI CIASCUN PROFILO
8 chord=[235, 235, 233, 232];
9 %INSERIRE LA POSIZIONE IN X DI CIASCUN PROFILO
10 X=[-1140, -1136, -1065, -1009];
11 %INSERIRE LA POSIZIONE IN Y DI CIASCUN PROFILO
12 Y=[0, 96, 475, 620];
13 %INSERIRE LA POSIZIONE IN Z DI CIASCUN PROFILO
14 Z=[90, 91, 93, 94];
15 %
```





- **Il dominio è suddiviso in volumi di controllo finiti:** integrando le equazioni di conservazione su ciascun volume, le PDE differenziali si trasformano in un sistema algebrico risolvibile numericamente.

Conservazione (scalare φ , stazionaria)

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma^\varphi \nabla \phi) + Q^\varphi$$



Forma discreta (teorema della divergenza)

$$\sum_{f \sim \text{nb}(C)} (\rho \mathbf{v} \phi - \Gamma^\varphi \nabla \phi)_f \cdot \mathbf{S}_f = Q^\varphi_C V_C \rightarrow \text{eq. algebrica lineare}$$

- **Integrazione sul volume di controllo** e teorema della divergenza di Gauss: gli integrali di volume dei termini convettivo e diffusivo diventano integrali di superficie sulle facce della cella.
- **Approccio cell-centered:** le grandezze sono note solo nei centri cella $\rightarrow$ il valore sulle facce è ricostruito per interpolazione, gestita dagli schemi di discretizzazione.

- **Approccio RANS:** ogni grandezza è scomposta in media temporale e componente fluttuante; nelle equazioni mediate compare il tensore degli sforzi di Reynolds $-\rho \overline{v'v'}$.
- **Ipotesi di Boussinesq:** gli sforzi di Reynolds sono funzione lineare della velocità di deformazione media $\rightarrow$ viscosità turbolenta μ_t da modellare.

Equazioni RANS incomprimibili

$$\nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{v}}) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{\mathbf{v}}) + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{v}} \bar{\mathbf{v}}) = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot (\bar{\boldsymbol{\tau}} - \rho \overline{\mathbf{v}'\mathbf{v}'})$$

Modelli a due equazioni: $k-\epsilon$, $k-\omega$, $k-\omega$ SST

Modello $k-\omega$ SST (Menter)

- Estende il modello BSL: combina robustezza a parete del $k-\omega$ e minore sensibilità al flusso libero del $k-\epsilon$ tramite funzione di raccordo.
- Limita la viscosità turbolenta nelle regioni a gradiente di pressione avverso, prevedendo correttamente il distacco dello strato limite.
- Ideale per profili ad alto carico come l'ala anteriore in esame: è il modello adottato in tutte le simulazioni.

Algoritmo SIMPLE (griglia collocata)

- 1 **Predizione della quantità di moto:** campo di velocità dal p dell'iterazione precedente
- 2 **Equazione della pressione:** correzione p per soddisfare la continuità
- 3 **Correzione della velocità:** campo aggiornato che rispetta la continuità

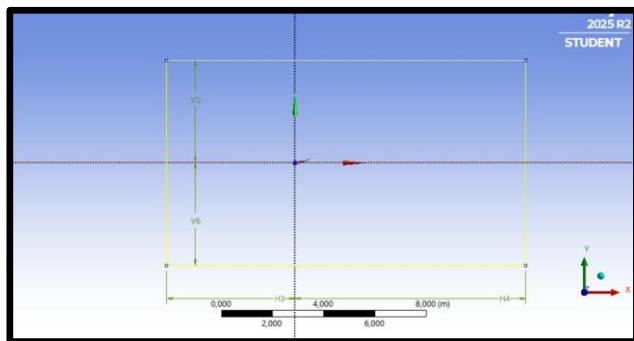
Interpolazione di Rhie-Chow: sulla griglia collocata evita il disaccoppiamento p–v (checkerboard problem).

Trattamento a parete e parametro y^+

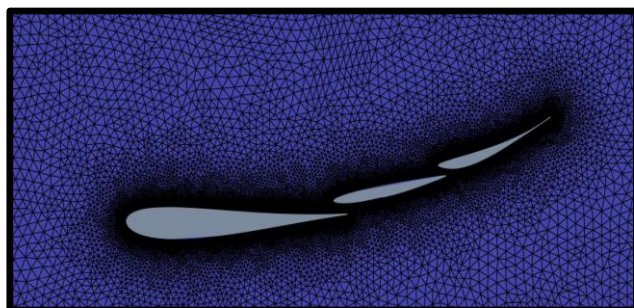
$$y^+ = d \perp u_{\tau} / \nu$$

- sotto-strato viscoso ($y^+ < 5$)
- buffer layer ($5 < y^+ < 30$)
- regione logaritmica ($30 < y^+ < 200$)

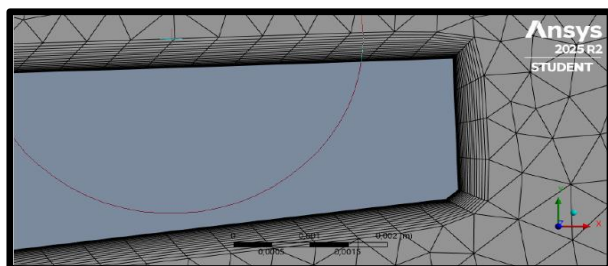
Il modello SST integra le equazioni fino a parete: primo nodo nel sotto-strato viscoso, $y^+ \leq 1$, senza wall functions.



Dominio computazionale (14×8 m)



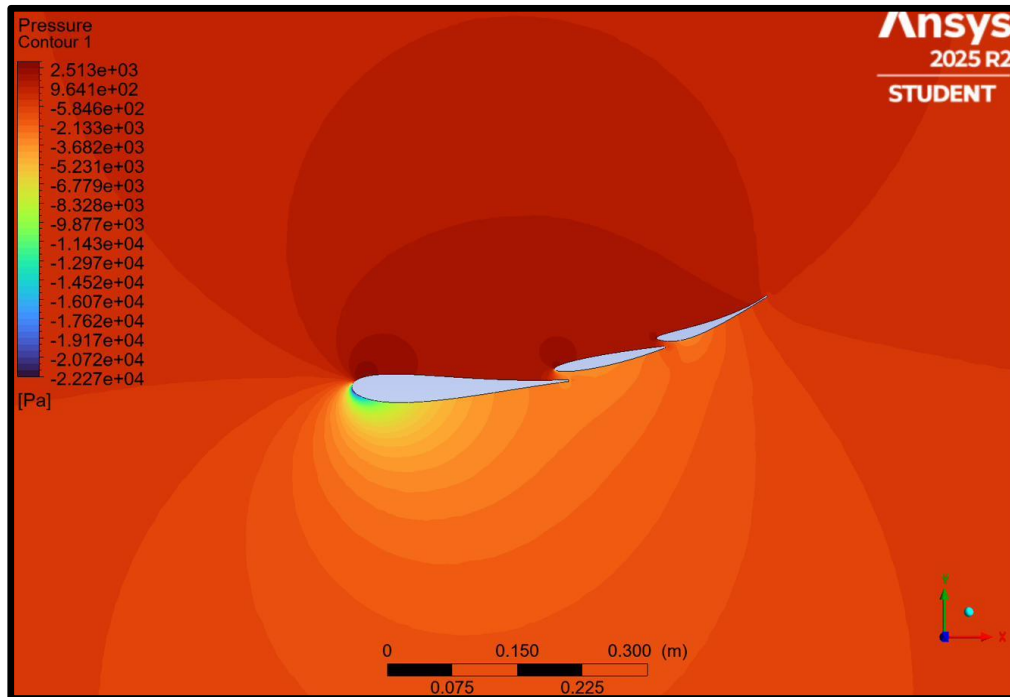
Dettaglio della mesh in prossimità dei profili



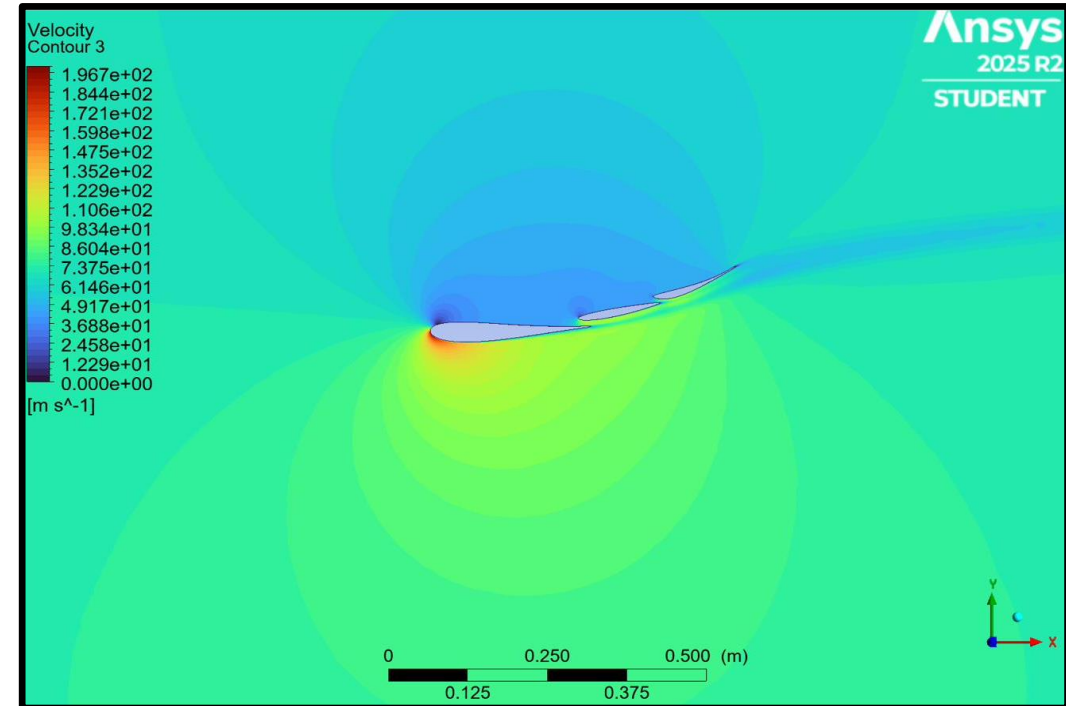
Inflation layers

Parametri della simulazione

- ▶ **Sezione analizzata:** $Y = 0,347$ m ; corda $c = 0,48$ m
- ▶ **Modello di turbolenza:** RANS stazionario, $k-\omega$ SST (Fluent 2025 R2)
- ▶ **Condizioni di flusso:** $U_{\infty} = 70$ m/s $\rightarrow Re \approx 2,3 \times 10^6$
- ▶ **Dominio computazionale:** 14×8 m, con box di raffinamento locale
- ▶ **Mesh:** $\approx 187\,000$ elementi ibridi
- ▶ **Strati di inflazione:** 20 strati, $y^+ \leq 1$ a parete
- ▶ **Discretizzazione:** Upwind 1° ordine $\rightarrow$ Second Order Upwind



Pressione statica: picco di depressione $\approx -22\,270$ Pa



Velocità: massimo ≈ 197 m/s, flusso attaccato sui tre elementi

CL

-2,10

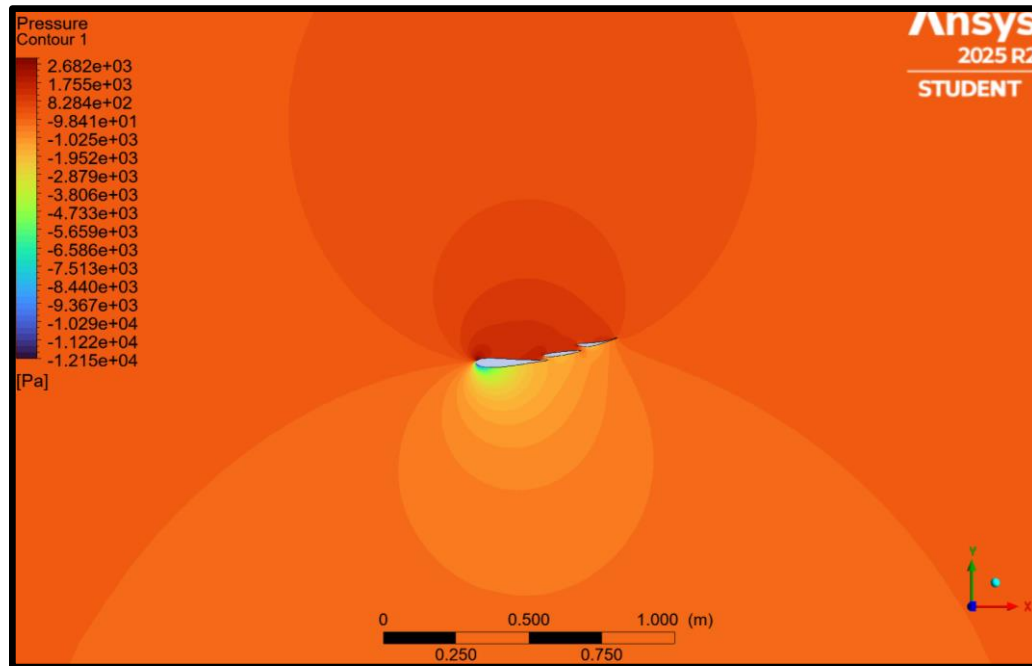
CD

0,0317

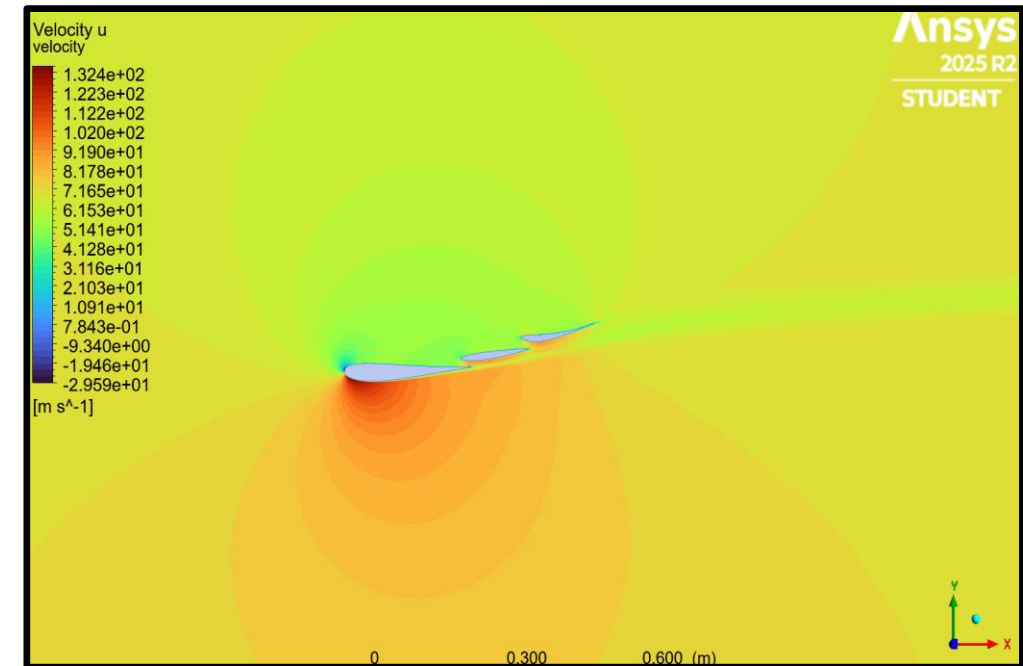
|cl / cd|

≈ 66

Resistenza contenuta grazie alla rienergizzazione dello strato limite negli slot gaps, che ritarda la separazione fino al bordo d'uscita.



Pressione statica: picco di depressione ridotto a $\approx -12\,150$ Pa



Velocità u: picco ridotto a ≈ 132 m/s (magnitudo ≈ 156 m/s)

CL

-1,39

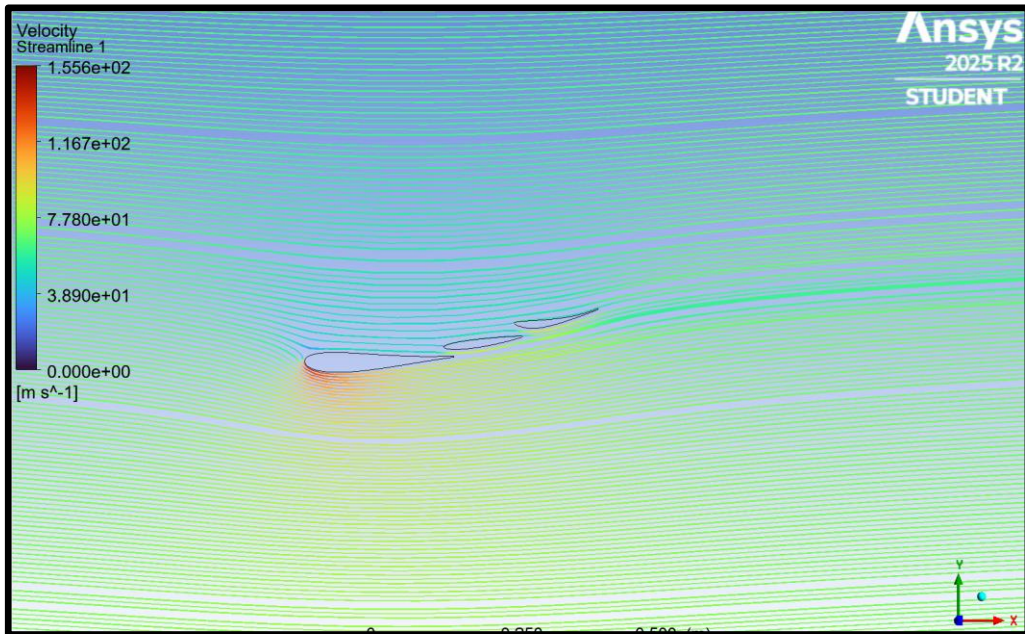
CD

0,0210

|cl / cd|

≈ 66

La rotazione dei flap riduce la curvatura efficace: portanza e resistenza calano di circa un terzo, senza separazione dello strato limite.

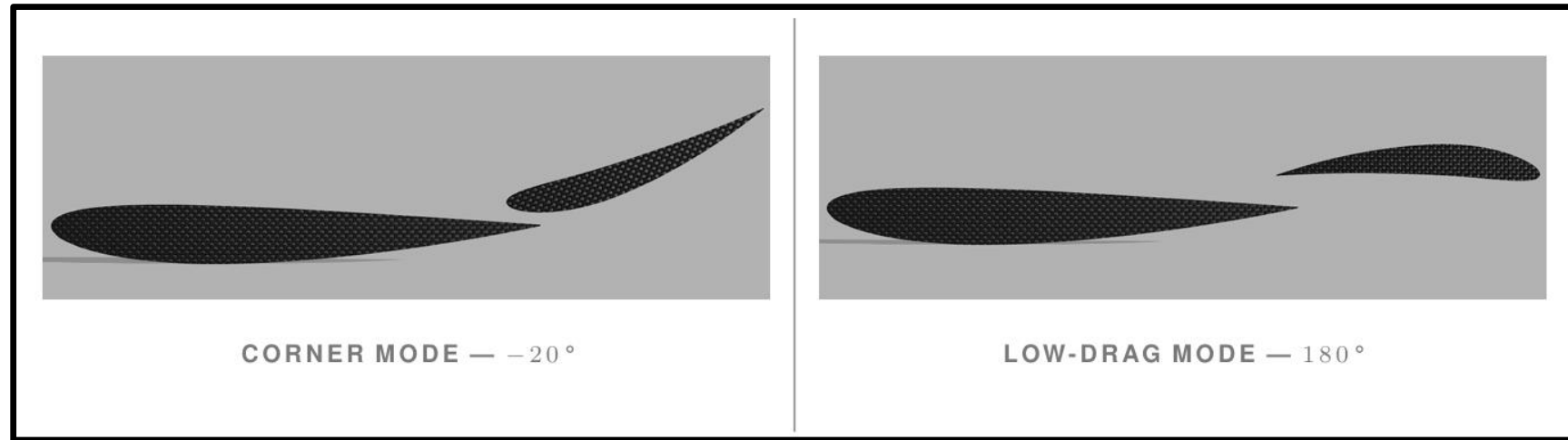


X-Mode: linee di flusso attaccate e scia meno intensa

Grandezza	Corner	X-Mode	Δ
cl	-2,10	-1,39	-33,7%
cd	0,0317	0,0210	-33,4%
cl / cd	≈ 66	≈ 66	invariata
Picco Δp	-22,3 kPa	-12,2 kPa	-45%

Efficienza 2D invariata: portanza e resistenza di profilo si riducono nella stessa proporzione. Il sistema si comporta come una versione scalata della Corner Mode.

Beneficio reale in 3D: la resistenza indotta ($\propto CL^2$) è assente in 2D; ridurre il carico l'abbatte più che proporzionalmente nei rettilinei.



Corner Mode (-20°) vs Low-Drag Mode (flap ruotato di $\sim 180^\circ$)

(Fonte : [4])

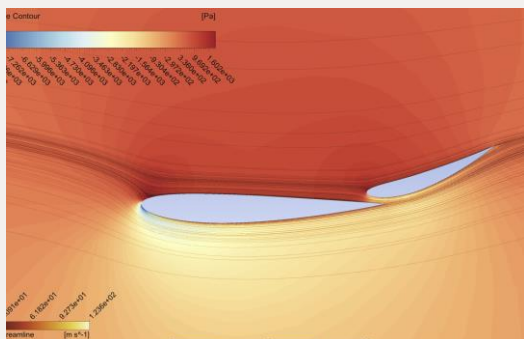
- Il flap superiore ruota di $\sim 180^\circ$, ben oltre le soluzioni convenzionali; attuatore integrato nell'endplate
- A 180° il profilo invertito genera lieve portanza positiva → favorisce lo stallo del diffusore e riduce ulteriormente la resistenza
- Studio CFD 2D (RANS $k-\omega$ SST) su 6 posizioni lungo l'intero arco di rotazione

Corner Mode – alto carico

rotazione del flap →→→

Low-Drag Mode – bassa resistenza

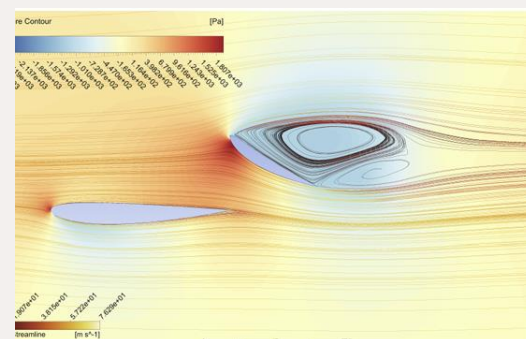
-20° · Corner Mode



CL = -2,69 CD = 0,047

Completamente attaccato: massima
deportanza

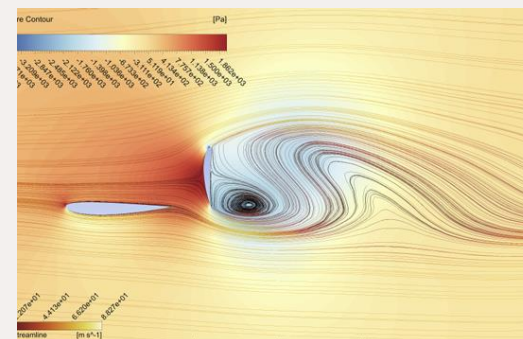
~35° · Inizio stallo



CL = -0,23 CD = 0,245

Bolla di ricircolazione sul flap

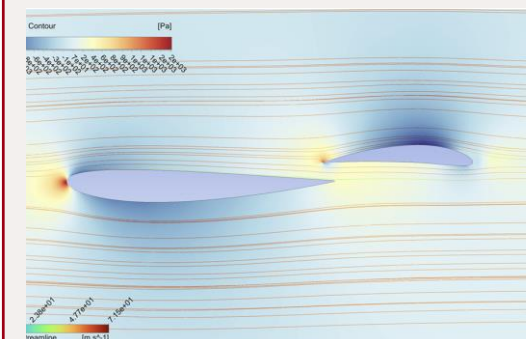
90° · Corpo tozzo



CL = -0,54 CD = 0,778

Picco di resistenza — da attraversare
rapidamente

180° · Low-Drag Mode



CL = +0,08 CD = 0,026

Flap invertito quasi-attaccato: drag
minimo

(Fonte : [4])

Andamento non monotono: il CD ha il valore massimo a 90° prima di crollare a 180°; il meccanismo attraversa questo stato nel minor tempo possibile.

Angolo flap	CL	CD	CL/CD	Regime di flusso
-20° (Corner Mode)	-2,693	0,047	57,2	attaccato
0° (DRS convenz.)	-1,294	0,024	53,0	attaccato
~35° (inizio stallo)	-0,231	0,245	0,94	flap stallato
90° (corpo tozzo)	-0,544	0,778	0,70	corpo tozzo
~125° (riattacco parz.)	-0,601	0,223	2,69	riattacco parz.
180° (Low-Drag Mode)	+0,082	0,026	3,1	quasi-attaccato

Coefficienti aerodinamici sulle sei configurazioni simulate (fonte [4])

Dal Corner al Low-Drag Mode

deportanza -97% - resistenza -45%

Vantaggio sul giro vs DRS convenzionale

-76 ms a Monza

-167 ms a Spa

► Beneficio dovuto soprattutto all'annullamento della resistenza indotta in Low-Drag Mode.

► La transizione (≤ 400 ms) deve attraversare il picco di resistenza a 90° nel minor tempo possibile.

Risultati dell'analisi CFD

- ▶ **Corner Mode:** $CL = -2,10$, $CD = 0,0317$, efficienza ≈ 66 ; il flusso rimane attaccato grazie alla rienergizzazione dello strato limite negli slot.
- ▶ **X-Mode:** portanza e resistenza ridotte di circa $1/3$, con efficienza 2D invariata (≈ 66).
- ▶ **Beneficio reale in 3D:** la resistenza indotta ($\propto CL^2$), assente in 2D, si riduce più che proporzionalmente al calo di carico $\rightarrow$ vero vantaggio energetico della X-Mode.
- ▶ Il meccanismo di aerodinamica attiva modula correttamente il carico tra le due configurazioni, in linea con lo spirito del regolamento 2026.

Sviluppi futuri

- 1 Estensione dell'analisi a simulazioni tridimensionali
- 2 Simulazioni anche in condizioni di curva
- 3 Confronto tra diversi modelli di turbolenza
- 4 Analisi CFD ad alta fedeltà (LES)
- 5 Completamento della progettazione dell'intera vettura

- [1] FIA – 2026 Formula 1 Technical Regulations, Issue 15, Section C, 2025.
- [2] F. Moukalled, L. Mangani, M. Darwish – The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics, Springer, 2015.
- [3] X. Zhang, W. Toet, J. Zerihaan – “Ground Effect Aerodynamics of Race Cars”, Applied Mechanics Reviews, 59(1), 2006.
- [4] R. Nastorg – Aerodynamic Investigation of the Ferrari SF-26 “Macarena” Rear Wing, IPSA Toulouse, 2026.
- [5] L. Barretto – Explained: unpicking the 2026 aerodynamics regulations, formula1.com, 2024.
- [6] ANSYS, Inc. – Ansys Fluent Theory Guide, Release 2025 R2.
- [7] Sky Sport. F1 2026, svelate le regole della nuova era: come cambiano le macchine. Sky Sport, Sezione Formula 1. 2024.
- [8] Federazione Internazionale dell'Automobile. In Wikipedia, l'enciclopedia libera. Disponibile su:
https://it.wikipedia.org/wiki/Federazione_Internazionale_dell%27Automobile.
- [9] Sky Sport, Video: *Ferrari, l'ala rotante usata nei test del Bahrain ha un soprannome: 'Macarena'*, 20 febbraio 2026. URL:
<https://sport.sky.it/formula-1/video/2026/02/20/f1-ferrari-ala-macarena>
- [10] Janhavi Bhalsakle e Sai Deshmukh. “Aerodynamics in Formula 1: A Literature Review on Design Strategies, Performance, and Regulatory Evolutions”. In: Asian Journal For Convergence In Technology (AJCT) ISSN-2350-1146 11.3 (2025), pp. 81–90.