

**Università Politecnica delle Marche**



**Facoltà di Ingegneria**

**Corso Di Laurea in Ingegneria Meccanica**

**Studio di due configurazioni di  
diffusore per una vettura di Formula  
SAE**

**Study of two diffuser configurations  
for a Formula SAE vehicle**

**Relatore**

**Prof. Andrea Crivellini**

**Studente**

**Gaetano Trivilino**

**A.A. 2023/2024**



*“La passione permette di sopportare amarezze e rinunce che l’ambizione non  
giustificherebbe in alcun modo”*

*Enzo Ferrari*

# Indice

<b>Indice .....</b>	<b>i</b>
<b>Lista delle Figure .....</b>	<b>iii</b>
<b>Lista delle Tabelle.....</b>	<b>vi</b>
<b>Introduzione.....</b>	<b>1</b>
<b>Capitolo 1 La Formula Sae.....</b>	<b>2</b>
1.1 Tech inspection.....	3
1.1.1 Regole generali.....	4
1.1.2 Responsabile dell'ispezione .....	4
1.2 Eventi dinamici.....	5
1.2.1 Skidpad Event.....	5
1.2.2 Acceleration Event .....	6
1.2.3 Autocross Event .....	6
1.2.4 Endurance Event.....	7
1.3 Eventi statici .....	8
1.3.1 Business Plan Presentation Event.....	8
1.3.2 Cost and Manufacturing Event.....	8
1.3.3 Engineering Design Event.....	8
1.4 Il Polimarche Racing Team .....	9
<b>Capitolo 2 L'aerodinamica .....</b>	<b>10</b>
2.1 La storia .....	10
2.2 Lo sviluppo sulle automobili .....	11
2.3 Concetti di Aerodinamica .....	12
2.3.1 Legge di Bernoulli.....	12
2.3.2 Numero di Reynolds.....	14
2.3.3 Strato limite .....	15
2.3.4 Profilo alare .....	17
2.3.5 Forze e coefficienti.....	18
2.3.6 Vortici di estremità.....	21
2.3.7 Streamline.....	23



2.3.8	Angolo di stallo .....	24
<b>Capitolo 3</b>	<b>CFD .....</b>	<b>26</b>
3.1	Basi Teoriche .....	27
3.1.1	Equazioni di Navier-Stokes .....	27
3.1.2	Turbolenze .....	28
3.2	Step di una simulazione CFD .....	29
3.2.1	Modifica del CAD .....	29
3.2.2	Dominio di calcolo .....	31
3.2.3	Suddivisione della vettura .....	33
3.2.4	Surface wrapper .....	36
3.2.5	Mesh volumetrica .....	37
3.2.6	Condizioni al contorno .....	41
3.2.7	Impostazioni della fisica .....	42
3.2.8	Analisi Convergenza .....	44
3.2.9	Visualizzazione dei risultati .....	46
<b>Capitolo 4</b>	<b>Diffusori, modifiche e miglioramenti .....</b>	<b>47</b>
4.1	Vincoli regolamentari .....	47
4.2	Prima configurazione di diffusore .....	49
4.2.1	Scelta del profilo alare .....	49
4.2.2	Variazioni angolo d'attacco .....	50
4.2.3	Miglioramenti del fondo .....	63
4.2.4	Miglioramenti diffusore .....	78
4.3	Seconda configurazione di diffusore .....	91
4.3.1	Scelta dell'inclinazione .....	91
4.3.2	Inserimento del secondo diffusore .....	95
	<b>Conclusioni e sviluppi futuri .....</b>	<b>99</b>
	<b>Bibliografia .....</b>	<b>101</b>
	<b>Sitografia .....</b>	<b>101</b>
	<b>Software utilizzati .....</b>	<b>101</b>
	<b>Ringraziamenti .....</b>	<b>102</b>

# Lista delle Figure

Figura 1.1 - Formula Sae a Varano.....	2
Figura 1.2 - Layout Skidpad Event.....	5
Figura 1.3 - Layout Acceleration Event .....	6
Figura 1.4 - Layout Autocross Event.....	7
Figura 1.5 - Endurance Event.....	7
Figura 2.1 - Primo velivolo a motore dei fratelli Wright.....	10
Figura 2.2 - Ferrari 312B '70 .....	11
Figura 2.3 - Condotto convergente.....	12
Figura 2.4 - Andamento pressioni e velocità in un canale.....	13
Figura 2.5 - particelle di fluido in regime laminare e turbolento.....	14
Figura 2.6 - Gradiente di velocità sullo strato limite .....	16
Figura 2.7 - Passaggio da strato limite laminare a turbolento.....	16
Figura 2.8 - Profilo alare .....	17
Figura 2.9 - Verso della portanza .....	19
Figura 2.10 - Verso deportanza .....	19
Figura 2.11 - Vortici d'estremità sull'ala posteriore.....	21
Figura 2.12 - Ala con e senza endplate.....	22
Figura 2.13 - Streamline .....	23
Figura 2.14 - Differenza tra flusso attaccato (A) e staccato (B) .....	24
Figura 2.15 - Esempio di profilo alare che stalla.....	24
Figura 3.1 - Equazioni di Navier-Stokes .....	28
Figura 3.2 - CAD completo della macchina .....	29
Figura 3.3 - CAD semplificato della macchina .....	30
Figura 3.4 - Importazione di metà auto in STAR-CCM+.....	30
Figura 3.5 - Tallone che simula il contatto dello pneumatico con l'asfalto .....	31
Figura 3.6 - Dominio di calcolo con le sue dimensioni caratteristiche.....	31
Figura 3.7 - Faccia dell'ingresso del fluido nel dominio.....	34
Figura 3.8 - Faccia dell'uscita del fluido nel dominio .....	34
Figura 3.9 - Parete del dominio .....	35
Figura 3.10 - Parete di simmetria del dominio .....	35
Figura 3.11 - Risultato visivo del surface wrapper.....	37
Figura 3.12 - Andamento della mesh.....	37
Figura 3.13 - Blocco grande vettura e scia .....	38
Figura 3.14 - Blocco piccolo vettura e scia .....	38
Figura 3.15 - Offset della vettura.....	39
Figura 3.16 - Blocco low .....	39
Figura 3.17 - Blocco ruota anteriore.....	40
Figura 3.18 - Blocco ruota posteriore .....	40
Figura 3.19 - Configurazioni della fisica in STAR-CCM+ .....	43
Figura 3.20 - Andamento dei residui .....	44
Figura 3.21 - Andamento del drag e del Lift della macchina .....	45
Figura 4.1 - Dimensioni massime e posizionamento dei dispositivi aereodinamici .....	47
Figura 4.2 - Dimensioni massime e posizionamento dei dispositivi aereodinamici rispetto gli pneumatici ...	48
Figura 4.3 - Grafico col confronto tra coefficiente di portanza e di resistenza del NACA CH10 .....	49
Figura 4.4 - Forma del profilo NACA CH10 .....	49
Figura 4.5 - Grafico del profilo CH10 che relaziona il coefficiente di portanza con l'angolo di stallo .....	50
Figura 4.6 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m con angolo di attacco a 5,875°.....	51
Figura 4.7 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m con angolo di attacco a 10°.....	51
Figura 4.8 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m con angolo di attacco a 12°.....	52
Figura 4.9 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m con angolo di attacco a 15°.....	52
Figura 4.10 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,3 m con angolo di attacco a 5,875°.....	53
Figura 4.11 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,3 m con angolo di attacco a 10°.....	53
Figura 4.12 - Grafico del coefficiente di pressione 0,3 m con angolo di attacco a 12° .....	54
Figura 4.13 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,3 m con angolo di attacco a 15°.....	54
Figura 4.14 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m con angolo di attacco a 5,875°.....	55

Figura 4.15 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m con angolo di attacco a 10° .....	55
Figura 4.16 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m con angolo di attacco a 12° .....	56
Figura 4.17 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m con angolo di attacco a 15° .....	56
Figura 4.18 - Pressioni nella parte superiore del diffusore con angolo di attacco a 5.785° .....	57
Figura 4.19 - Pressioni nella parte superiore del diffusore con angolo di attacco a 10° .....	57
Figura 4.20 - Pressioni nella parte superiore del diffusore con angolo di attacco a 12° .....	58
Figura 4.21 - Pressioni nella parte superiore del diffusore con angolo di attacco a 15° .....	58
Figura 4.22 - Pressioni nella parte inferiore del diffusore con angolo di attacco a 5.785° .....	59
Figura 4.23 - Pressioni nella parte inferiore del diffusore con angolo di attacco a 10° .....	59
Figura 4.24 - Pressioni nella parte inferiore del diffusore con angolo di attacco a 12° .....	60
Figura 4.25 - Pressioni nella parte inferiore del diffusore con angolo di attacco a 15° .....	60
Figura 4.26 - Vorticità nella zona critica sotto il fondo nella simulazione con angolo a 10° .....	63
Figura 4.27 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m della simulazione con lo strake .....	62
Figura 4.28 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m della simulazione con lo strake 2 .....	64
Figura 4.29 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m della simulazione con lo strake 3 .....	65
Figura 4.30 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m della simulazione con il footplate .....	65
Figura 4.31 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,3 m della simulazione con lo strake .....	66
Figura 4.32 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,3 m della simulazione con lo strake 2 .....	66
Figura 4.33 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,3 m della simulazione con lo strake 3 .....	67
Figura 4.34 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,3 m della simulazione con il footplate .....	67
Figura 4.35 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m della simulazione con lo strake .....	68
Figura 4.36 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m della simulazione con lo strake 2 .....	68
Figura 4.37 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m della simulazione con lo strake 3 .....	69
Figura 4.38 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m della simulazione con il footplate .....	69
Figura 4.39 - Pressioni nella parte superiore del diffusore con strake .....	70
Figura 4.40 - Pressioni nella parte superiore del diffusore con strake 2 .....	70
Figura 4.41 - Pressioni nella parte superiore del diffusore con strake 3 .....	71
Figura 4.42 - Pressioni nella parte superiore del diffusore con footplate .....	71
Figura 4.43 - Pressioni nella parte inferiore del diffusore con strake .....	72
Figura 4.44 - Pressioni nella parte inferiore del diffusore con strake 2 .....	72
Figura 4.45 - Pressioni nella parte inferiore del diffusore con strake 3 .....	73
Figura 4.46 - Pressioni nella parte inferiore del diffusore con footplate .....	73
Figura 4.47 - Vorticità nella zona critica sotto il fondo nella simulazione con strake .....	76
Figura 4.48 - Vorticità nella zona critica sotto il fondo nella simulazione con strake 2 .....	76
Figura 4.49 - Vorticità nella zona critica sotto il fondo nella simulazione con strake 3 .....	77
Figura 4.50 - Vorticità nella zona critica sotto il fondo nella simulazione con il footplate .....	77
Figura 4.51 - CAD diffusore versione 1 .....	78
Figura 4.52 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m della simulazione con la versione uno .....	78
Figura 4.53 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,30 m della simulazione con il diffusore versione 1 ...	79
Figura 4.54 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m della simulazione con il diffusore versione 1 ...	79
Figura 4.55 - Pressioni nella parte superiore del diffusore versione uno .....	80
Figura 4.56 - Pressioni nella parte inferiore del diffusore versione uno .....	80
Figura 4.57 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m della simulazione con il diffusore versione due .	81
Figura 4.58 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,30 m della simulazione con il diffusore versione due	82
Figura 4.59 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m della simulazione con il diffusore versione due	82
Figura 4.60 - Pressioni nella parte superiore del diffusore versione due .....	83
Figura 4.61 - Parte inferiore del diffusore versione due .....	83
Figura 4.62 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m della simulazione con il gurney .....	84
Figura 4.63 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,30 m della simulazione con il gurney .....	85
Figura 4.64 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m della simulazione con il gurney .....	85
Figura 4.65 - Pressioni nella parte superiore del diffusore con gurney .....	86
Figura 4.66 - Pressioni nella parte inferiore del diffusore con gurney .....	86
Figura 4.67 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m della simulazione con la scocca .....	87
Figura 4.68 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,30 m della simulazione con la scocca .....	88
Figura 4.69 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m della simulazione con la scocca .....	88
Figura 4.70 - Pressioni superiori diffusore della simulazione con la scocca .....	89
Figura 4.71 - Pressioni inferiori diffusore della simulazione con la scocca .....	89
Figura 4.72 - CAD diffusore versione due con inclinazione a 10° .....	91
Figura 4.73 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m della simulazione con l'inclinazione a 10° .....	92
Figura 4.74 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m della simulazione con l'inclinazione a 12° .....	92

Figura 4.75 - Pressioni nella parte inferiore della macchina della simulazione con inclinazione a 10° .....	93
Figura 4.76 - Pressioni nella parte inferiore della macchina della simulazione con inclinazione a 12° .....	93
Figura 4.77 - CAD doppio diffusore .....	95
Figura 4.78 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m della simulazione con doppio diffusore.....	95
Figura 4.79 - Pressioni parte inferiore del primo livello di diffusore .....	96
Figura 4.80 - Pressioni parte inferiore del secondo livello di diffusore.....	96
Figura 4.81 - Piano lungo la direzione x con la velocità nella simulazione con inclinazione a 10° .....	97
Figura 4.82 - Piano lungo la direzione x con la velocità nella simulazione con doppio diffusore .....	97

## Lista delle Tabelle

Tabella 4.1 - Reports simulazione angolo d'attacco a $5,875^\circ$ .....	61
Tabella 4.2 - Reports simulazione angolo d'attacco a $10^\circ$ .....	61
Tabella 4.3 - Reports simulazione angolo d'attacco a $12^\circ$ .....	62
Tabella 4.4 - Reports simulazione angolo d'attacco a $15^\circ$ .....	62
Tabella 4.5 - Reports simulazione strake .....	74
Tabella 4.6 - Reports simulazione strake 2 .....	74
Tabella 4.7 - Reports simulazione strake 3 .....	75
Tabella 4.8 - Reports simulazione footplate .....	75
Tabella 4.9 - Reports simulazione con diffusore versione uno .....	81
Tabella 4.10 - Reports simulazione con diffusore versione due.....	84
Tabella 4.11 - Reports simulazione con gurney .....	87
Tabella 4.12 - Reports simulazione scocca .....	90
Tabella 4.13 - Reports simulazione con diffusore inclinato a $10^\circ$ .....	94
Tabella 4.14 - Reports simulazione con diffusore inclinato a $12^\circ$ .....	94
Tabella 4.15 - Reports simulazione doppio diffusore .....	98

# Introduzione

Il lavoro si focalizza sullo studio e miglioramento del diffusore di una vettura elettrica da competizione partecipante alla Formula SAE. L'obiettivo principale è quello di progettare ex novo e selezionare, attraverso studi eseguiti mediante Dinamica dei Fluidi Computazionale (CFD), la configurazione ottimale per il diffusore al fine di massimizzare il carico aerodinamico.

Nel primo capitolo verrà fornita una panoramica sulla Formula SAE, delineando le sue componenti principali e presentando il Polimarche Racing Team, con il quale l'autore ha collaborato come tirocinante durante la stesura di questa tesi.

Il secondo capitolo introduce i fondamenti dell'aerodinamica, essenziali per comprendere le considerazioni successive. Le basi teoriche di questo capitolo derivano principalmente dal corso di Fluidodinamica tenuto dal Prof. Andrea Crivellini, relatore della tesi.

Nel terzo capitolo si esplorerà il campo della Dinamica dei Fluidi Computazionale (CFD), fornendo una panoramica dei concetti chiave necessari per la risoluzione del moto dei fluidi tramite software specializzati.

Il quarto capitolo rappresenta il nucleo centrale del lavoro, in cui verranno esposte due versioni di diffusore. Sarà presentato uno studio dettagliato delle due configurazioni, includendo gli obblighi regolamentari da rispettare e tutte le modifiche apportate nel processo di sviluppo.

# Capitolo 1

## La Formula Sae

La Formula Student precedentemente nota come Formula Sae (Society of Automotive Engineers) nasce nel 1981 con la prima edizione in America, per poi giungere nel 2000 anche in Europa. L'obiettivo di tale competizione non è quello di valutare i piloti, ma è analizzare il lavoro fatto dalle varie squadre e decretarne la migliore attraverso delle prove statiche, dinamiche e mediante delle tech inspection. Tale competizione permette agli studenti partecipanti di entrare in vere e proprie scuderie nelle quali si deve creare, sviluppare e correre con le proprie auto, vincolate da un regolamento tecnico.



Figura 1.1 - Formula Sae a Varano

Ogni anno, durante i mesi estivi, si tiene il Formula University, una serie di gare che si svolgono in tutto il mondo. Le gare ufficiali ammontano a 13, di cui 7 in Europa, e si svolgono sui circuiti tradizionalmente utilizzati per vari campionati automobilistici.

Le squadre partecipanti al Formula University sono raggruppate in quattro categorie distintive:

- Classe 1C: veicoli a motore a combustione;
- Classe 1E: veicoli a trazione elettrica;
- Classe 1D: veicoli autonomi;
- Classe 3: comprende squadre che presentano solo progetti di prototipi e partecipano all'evento senza avere un veicolo fisico.

## 1.1 Tech inspection

La fase di ispezione tecnica rappresenta un passaggio cruciale per garantire la sicurezza, l'affidabilità e la conformità dei veicoli partecipanti alle normative stabilite dall'organizzazione. Questo capitolo si concentra sulla procedura dettagliata dell'ispezione tecnica, divisa in varie fasi e sotto parti per assicurare il rigoroso rispetto delle regole e dei requisiti stabiliti.

La procedura di ispezione tecnica è suddivisa in diverse parti, ognuna delle quali mira a verificare specifici aspetti del veicolo in conformità con le normative stabilite. Le parti principali includono:

- Pre-Ispezione: Questa fase preparatoria richiede la presentazione di determinati elementi e attrezzature necessarie per l'ispezione successiva.
- Ispezione dell'Accumulatore (Solo EV): Rivolta esclusivamente ai veicoli elettrici, questa parte verifica lo stato e la sicurezza dell'accumulatore di energia.
- Ispezione Elettrica (Solo EV): Concentrata sui componenti elettrici del veicolo, questa fase garantisce la corretta funzionalità e la sicurezza del sistema elettrico.
- Ispezione Meccanica: Valuta la conformità delle componenti meccaniche del veicolo, comprese strutture di sicurezza e componenti strutturali.
- Ispezione del Sistema Autonomo: Riservata ai veicoli autonomi, questa parte verifica l'affidabilità e la sicurezza del sistema autonomo.
- Test di Inclinazione: Misura la stabilità del veicolo in condizioni di inclinazione.
- Pesatura del Veicolo: Determina il peso del veicolo in condizioni di gara.
- Test del Rumore (Solo CV): Valuta il livello di rumore generato dal veicolo.
- Test della Pioggia (Solo EV): Verifica la capacità del veicolo elettrico di resistere alle condizioni di pioggia.
- Test dei Freni: Valuta le prestazioni del sistema frenante del veicolo.
- Test del Sistema EBS: Verifica il corretto funzionamento del sistema EBS (Electronic Braking System).

Ogni fase dell'ispezione tecnica è progettata per garantire che il veicolo soddisfi rigorosi standard di sicurezza, prestazioni e conformità normativa prima di poter partecipare a eventi dinamici.



### **1.1.1 Regole generali**

Le regole generali stabiliscono i principi fondamentali che guidano l'intero processo di ispezione tecnica. Alcune delle principali regole includono:

- Ogni veicolo deve superare tutte le parti dell'ispezione tecnica tranne l'Ispezione del Sistema Autonomo e il Test EBS prima di poter partecipare a qualsiasi evento dinamico.
- L'approvazione dell'ispezione tecnica non certifica automaticamente la conformità completa del veicolo alle regole.
- Le squadre sono responsabili della conformità del proprio veicolo e dell'attrezzatura necessaria alle normative prima di sottoporlo all'ispezione tecnica.

Queste regole forniscono una guida chiara per le squadre partecipanti e gli ufficiali preposti per garantire un processo equo e accurato di ispezione tecnica.

### **1.1.2 Responsabile dell'ispezione**

Per facilitare il processo di ispezione tecnica, ogni squadra deve nominare un membro responsabile dell'ispezione. Questa persona deve essere adeguatamente preparata e in grado di dimostrare la conformità del veicolo a tutti i punti indicati nella scheda di ispezione tecnica. Inoltre, deve essere in grado di condurre l'ispezione tecnica in modo autonomo, osservato dagli ufficiali, se richiesto.

## 1.2 Eventi dinamici

Questo paragrafo esplora le complessità degli eventi dinamici, ovvero degli eventi che vengono eseguiti con la macchina in movimento, e ha come obiettivo quello di delineare le regole, le procedure e i meccanismi di punteggio di ciascun evento.

### 1.2.1 Skidpad Event

Nello Skidpad Event si valuta l'abilità della vettura nel mantenere la trazione durante le curve e fornisce un punteggio massimo pari a 75 punti. Il percorso è disegnato a forma di otto, come illustrato nella figura 1.2, e durante le quattro prove (due per ciascun pilota), si deve attraversare prima il cerchio destro due volte e poi quello sinistro altrettante volte.

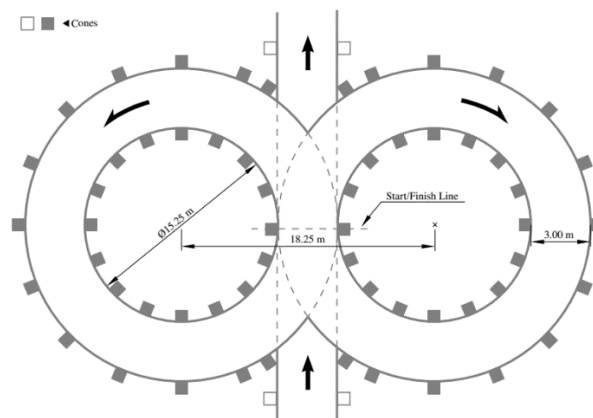


Figura 1.2 - Layout Skidpad Event

Si tiene in considerazione soltanto il secondo giro di ogni cerchio, e la media tra i due tempi viene inserita nella formula per il calcolo del punteggio che è definita dal regolamento nel seguente modo:

$$M_{SKIDPADSCORE} = 0.95 P_{max} \left( \frac{\left( \frac{T_{max}}{T_{team}} \right)^2 - 1}{0.5625} \right)$$

Dove:  $P_{max}$  è il punteggio massimo ottenibile nell'evento,  $T_{team}$  è il miglior tempo della squadra che ha effettuato la prova e  $T_{max}$  è 1,25 volte il tempo migliore tra tutte le squadre ed include anche le penalità se ci dovessero essere.

## 1.2.2 Acceleration Event

L'acceleration event fornisce un punteggio massimo pari a 75 punti e comporta un'accelerazione lungo una pista rettilinea di 75 metri, con partenza da fermo. Vengono eseguiti quattro cronometraggi, due per ogni pilota. Il calcolo del punteggio avviene con la seguente formula:

$$M_{ACCELERATION_{SCORE}} = 0.95 P_{max} \left( \frac{\frac{T_{max}}{T_{team}} - 1}{0.5} \right)$$

Dove:  $P_{max}$  è il punteggio massimo ottenibile nell'evento,  $T_{team}$  è il miglior tempo della squadra che ha effettuato la prova e  $T_{max}$  è 1,5 volte il tempo migliore tra tutte le squadre ed include anche le penalità se ci dovessero essere.

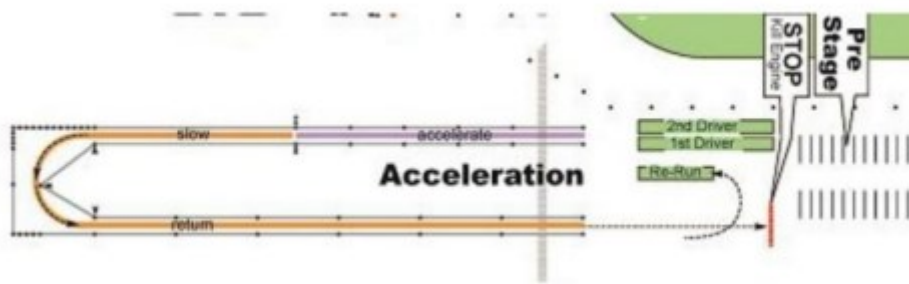


Figura 1.3 - Layout Acceleration Event

## 1.2.3 Autocross Event

L'autocross event fornisce un punteggio massimo pari a cento punti e riproduce una fase di qualifica. In un circuito lungo, intricato, tortuoso, e delimitato da coni, l'obiettivo principale è completare un giro completo nel minor tempo possibile, con quattro tentativi a disposizione. Se il pilota colpisce e fa cadere un cono, viene penalizzato con un aumento del tempo impiegato. Il tracciato è progettato dagli organizzatori seguendo le specifiche del regolamento:

- Rettilinei: non superano gli 80 metri di lunghezza;
- Curve a raggio costante: con un diametro massimo di 50 metri;
- Tornanti: con un diametro esterno minimo di 9 metri;
- Slalom: coni disposti in fila con una distanza tra loro compresa tra 7.5 e 12 metri;
- Larghezza minima della carreggiata: 3 metri.

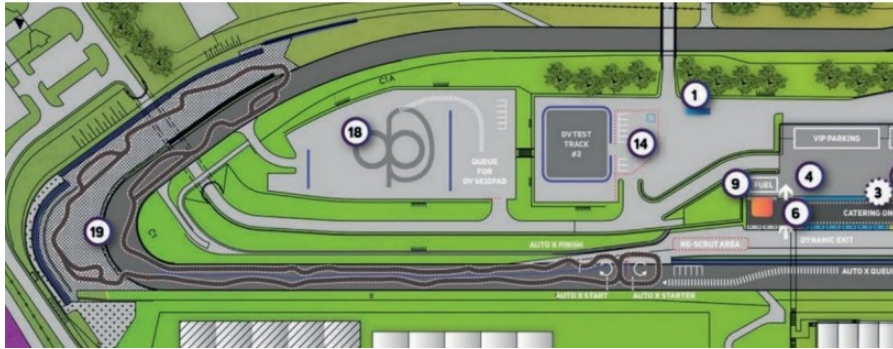


Figura 1.4 - Layout Autocross Event

Il punteggio viene calcolato attraverso la seguente formula:

$$AUTOCROSS_{SCORE} = 0.95 P_{max} \left( \frac{\frac{T_{max}}{T_{team}} - 1}{0.25} \right)$$

### 1.2.4 Endurance Event

L'endurance event simula una "gara", in cui la vettura deve affrontare lo stesso percorso dell'Autocross per una distanza di 22 chilometri, con cambio pilota a metà percorso. Inoltre, viene introdotto un bonus di 25 punti per il completamento dell'intera prova. La formula per calcolare il punteggio è la seguente:

$$ENDURANCE_{SCORE} = 0.9 P_{max} \left( \frac{\frac{T_{max}}{T_{team}} - 1}{0.333} \right)$$



Figura 1.5 - Endurance Event

## **1.3 Eventi statici**

Questo paragrafo espone gli eventi statici, ovvero degli eventi che vengono eseguiti con la macchina ferma, e ha come obiettivo quello di delineare le regole, le procedure e i meccanismi di punteggio di ciascun evento.

### **1.3.1 Business Plan Presentation Event**

L'Evento di Presentazione del Piano Aziendale mira a valutare la capacità di ciascuna squadra di presentare un piano aziendale incentrato sul proprio veicolo come prodotto. Qui, i giudici sono considerati come potenziali investitori. Durante questa fase, si discute esclusivamente dell'auto, evitando di trattare le performance. Tale prova fornisce un punteggio massimo pari a cento che deriva dalla valutazione delle varie categorie.

### **1.3.2 Cost and Manufacturing Event**

L'obiettivo dell'evento sui costi e sulla produzione è valutare la comprensione della squadra dei processi di produzione e dei costi associati alla costruzione di un prototipo di veicolo. Ciò include decisioni di compromesso tra contenuti e costi. Tale prova fornisce un massimo di cento punti, i quali derivano dalle varie categorie di questo evento.

### **1.3.3 Engineering Design Event**

L'engineering design event ha come obiettivo quello di valutare il processo ingegneristico degli studenti e lo sforzo impiegato nella progettazione di un veicolo, rispettando l'intento della competizione. I componenti e i sistemi proprietari che sono incorporati nella progettazione del veicolo non vengono valutati come unità progettate dagli studenti, ma vengono valutati solo in base alla selezione e all'applicazione di quel componente da parte della squadra.

## 1.4 Il Polimarche Racing Team

Il Polimarche Racing Team è nato nel 2013 come un'idea ambiziosa del Prof. Dario Amodio in collaborazione con i vari dipartimenti dell'università, che tutt'ora indirizzano lo sviluppo del Team e permettono di proseguire il progetto.

L'organizzazione presenta una struttura gerarchica ben definita, con un Team Leader in posizione di comando, affiancato da uno o più Direttori Tecnici. Ogni membro della squadra è assegnato a specifici dipartimenti, ciascuno guidato da un Responsabile incaricato di supervisionare le attività e collaborare con gli altri dipartimenti durante le riunioni. La squadra è suddivisa in diverse aree funzionali, ciascuna con responsabilità specifiche che sono:

- Ricerca e sviluppo: Questo team si occupa di spingere i confini della tecnologia e delle prestazioni per creare un veicolo da corsa e delle strutture all'avanguardia e competitive.
- Progettazione e sviluppo: Questo gruppo si occupa della progettazione concettuale e dettagliata del veicolo, utilizzando software avanzati di progettazione assistita dal computer (CAD) e simulazioni (CFD) per ottimizzare le prestazioni del veicolo.
- Produzione e manifattura: Questo team è responsabile della costruzione fisica del veicolo, coordinando le attività di assemblaggio, fabbricazione dei componenti e lavorazione dei materiali.
- Gestione del progetto: Questo gruppo si occupa della pianificazione strategica, del monitoraggio dei progressi e della gestione delle risorse della squadra. Sono responsabili anche della comunicazione interna ed esterna e della ricerca di sponsorizzazioni.
- Test e sviluppo: Questo team si occupa di testare il veicolo su pista e di analizzare i dati raccolti per identificare aree di miglioramento e ottimizzare le prestazioni.

Io per la stesura di questa tesi sono stato inserito nel reparto dell'aerodinamica e ho avuto la possibilità di utilizzare programmi di progettazione assistita e programmi per eseguire simulazioni di CFD.

# Capitolo 2

## L'aereodinamica

### 2.1 La storia

L'aereodinamica è una disciplina che traccia le sue radici nei primi voli dell'umanità. Tuttavia, la sua vera evoluzione come scienza iniziò nel XVIII secolo con gli studi pionieristici di scienziati come Sir Isaac Newton. La sua legge dell'azione e reazione, espressa nel suo lavoro "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica" del 1687, fornisce le basi teoriche per il movimento dei corpi nell'aria.

Nel corso del XIX secolo, con il crescente interesse per il volo umano, l'aereodinamica si sviluppò ulteriormente grazie a contributi significativi di figure come George Cayley e Otto Lilienthal, che eseguirono esperimenti pionieristici con alianti e deltaplani. Questi studi portarono a una maggiore comprensione dei concetti fondamentali di portanza, resistenza e stabilità.

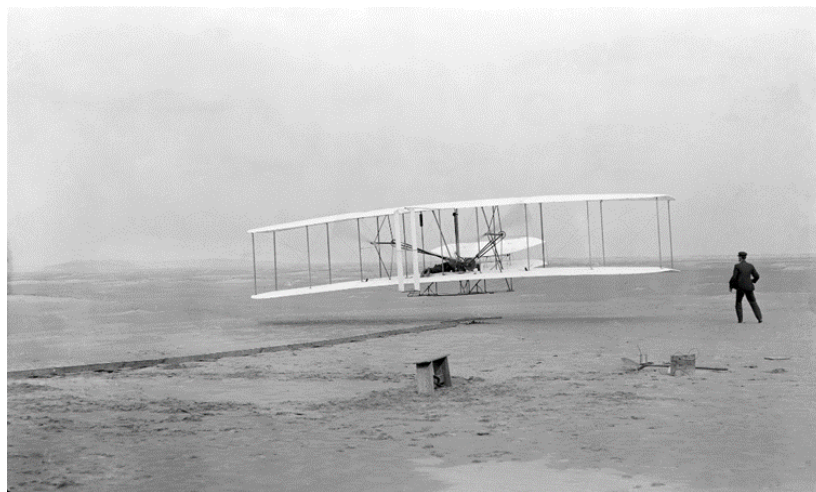


Figura 2.1 - Primo velivolo a motore dei fratelli Wright

Tuttavia, è stato solo nel XX secolo che l'aereodinamica ha fatto progressi significativi, alimentata dalle innovazioni nei materiali e nei motori. Le ricerche dei fratelli Wright, culminate nel primo volo controllato e motorizzato nel 1903, hanno segnato un punto di svolta nella storia dell'aeronautica, portando l'aereodinamica ad un livello completamente nuovo.

## 2.2 Lo sviluppo sulle automobili

L'applicazione dei principi dell'aerodinamica alle automobili è un fenomeno relativamente più recente rispetto al suo utilizzo nell'aviazione. Negli anni '20, le prime auto da corsa iniziarono a incorporare elementi aerodinamici rudimentali, come cofani profilati e spoiler, con lo scopo di migliorare la stabilità ad alte velocità.



Figura 2.2 - Ferrari 312B '70

Tuttavia, fu negli anni '70 e '80 che l'aerodinamica automobilistica fece veri progressi. Le competizioni automobilistiche, in particolare la Formula 1, divennero il banco di prova per tecnologie aerodinamiche sempre più avanzate. Vetture come la Lotus 79 del 1978, con il suo effetto suolo innovativo, dimostrarono il potenziale dell'aerodinamica nel migliorare le prestazioni delle auto da corsa.

Nel corso degli anni successivi, l'aerodinamica divenne sempre più cruciale anche per le auto stradali. I produttori iniziarono a incorporare design più aerodinamici non solo per migliorare l'efficienza del carburante, ma anche per aumentare la stabilità e la sicurezza ad alte velocità.

Oggi, l'aerodinamica è un aspetto fondamentale della progettazione automobilistica. Dalle piccole appendici alle sofisticate forme delle carrozzerie, ogni dettaglio è studiato e ottimizzato per ridurre la resistenza dell'aria e migliorare le prestazioni complessive dell'auto. Questo approccio non solo contribuisce a una maggiore efficienza del carburante, ma ha anche un impatto significativo sulla gestione del veicolo e sulla sicurezza, rendendo le auto moderne più sicure e piacevoli da guidare.



## 2.3 Concetti di Aerodinamica

In questo paragrafo verranno esposti alcuni concetti di aerodinamica in modo tale da poter comprendere e giustificare dal punto di vista fisico gli argomenti che verranno trattati successivamente nella tesi.

### 2.3.1 Legge di Bernoulli

La Legge di Bernoulli è uno dei pilastri fondamentali della fluidodinamica. Formulata dal matematico e fisico svizzero Daniel Bernoulli nel XVIII secolo, questa legge descrive il comportamento di un fluido ideale in movimento lungo una linea di flusso. Secondo Bernoulli, per un fluido incompressibile e privo di attrito, l'energia totale lungo una linea di flusso rimane costante. Questa energia totale è la somma dell'energia cinetica, dell'energia potenziale gravitazionale e dell'energia di pressione.

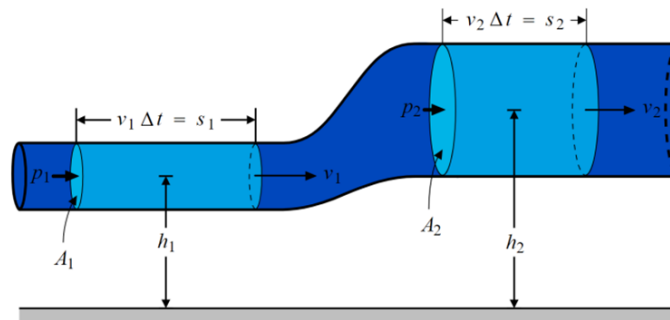


Figura 2.3 - Condotto convergente

Matematicamente, la Legge di Bernoulli è espressa come:

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

dove:

- $p$  è la pressione del fluido;
- $\rho$  è la densità del fluido;
- $v$  è la velocità del fluido;
- $g$  è l'accelerazione gravitazionale;
- $h$  è l'altezza rispetto a un livello di riferimento.

Siccome in campo automobilistico, la componente gravitazionale ( $gh$ ) è spesso trascurabile, l'equazione si semplifica a:

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

Dalla seguente equazione possiamo correlare tra loro la pressione e la velocità. Da tale correlazione si giunge all'obiettivo in campo automobilistico, ovvero quello di accelerare il flusso d'aria sotto il veicolo, in modo tale da crea una notevole riduzione della pressione locale, producendo una spinta verso il basso dovuta alla differenza tra la pressione sotto l'auto e quella atmosferica che agisce sulla parte superiore del veicolo.

Per analizzare questo fenomeno, possiamo considerare tre sezioni principali lungo il fondo della vettura:

- Sezione 1: situata all'inizio del fondo della vettura;
- Sezione 2: corrispondente alla sezione trasversale minima del fondo;
- Sezione 3: posta all'uscita del flusso d'aria, nella parte posteriore della vettura.

Queste sezioni rappresentano i punti chiave per comprendere come la variazione di velocità e pressione del flusso d'aria sotto la vettura contribuisca alla generazione della downforce, migliorando significativamente la performance del veicolo in gara.

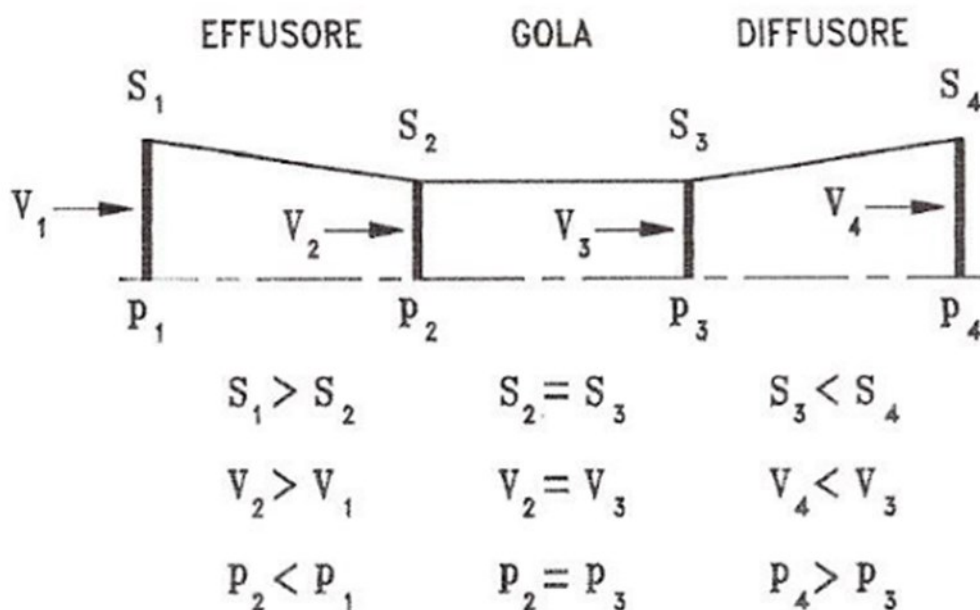


Figura 2.4 - Andamento pressioni e velocità in un canale

### 2.3.2 Numero di Reynolds

Il numero di Reynolds, indicato con il simbolo  $Re$ , è un parametro adimensionale di fondamentale importanza nell'analisi dei flussi fluidi. Introdotto da Osborne Reynolds nel 1883, il numero di Reynolds permette di caratterizzare il regime di flusso in un sistema fluido, distinguendo tra flusso laminare e flusso turbolento. La definizione matematica del numero di Reynolds è la seguente:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{v L}{\nu}$$

dove:

- $\rho$  è la densità del fluido ( $\text{kg/m}^3$ );
- $v$  è la velocità caratteristica del flusso ( $\text{m/s}$ );
- $L$  è una lunghezza caratteristica del sistema ( $\text{m}$ );
- $\mu$  è la viscosità dinamica del fluido ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ );
- $\nu$  è la viscosità cinematica del fluido ( $\nu=\mu/\rho$ ,  $\text{m}^2/\text{s}$ ).

Dal punto di vista fisico il numero di Reynolds rappresenta il rapporto tra le forze inerziali e le forze viscosi all'interno di un fluido. Questo parametro fornisce una misura della propensione di un flusso a transitare da un regime laminare, caratterizzato da strati di fluido che scorrono parallelamente senza mescolarsi, a un regime turbolento, in cui il flusso è irregolare e caratterizzato da vortici e turbolenze. Nello specifico, il regime laminare si verifica a bassi valori di  $Re$ . In questo regime, le forze viscosi predominano e il flusso del fluido è ordinato e prevedibile. Il regime turbolento, invece, si verifica a valori elevati di  $Re$ . In questo regime, le forze inerziali prevalgono e il flusso del fluido diventa caotico e imprevedibile. Tra questi due regimi, esiste una zona di transizione in cui il flusso può presentare caratteristiche sia laminari che turbolente.

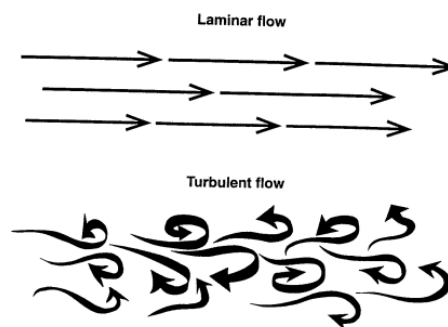


Figura 2.5 - particelle di fluido in regime laminare e turbolento

In ambito aerodinamico, il numero di Reynolds riveste un ruolo cruciale nella progettazione e nell'analisi delle prestazioni di veicoli e componenti aerodinamici come ali, profili alari, e superfici di controllo. Per i profili alari (che approfondiremo nel capitolo 2.3.4), il numero di Reynolds viene calcolato utilizzando la velocità relativa del fluido rispetto all'ala (velocità di volo) e la corda alare (la lunghezza caratteristica):

$$Re = \frac{\rho v_{inf} c}{\mu} = \frac{v_{inf} c}{\nu}$$

dove  $v_{inf}$  è la velocità dell'aria lontano dal profilo alare e  $c$  è la corda del profilo alare.

Infine, i coefficienti aerodinamici (che approfondiremo nel capitolo 2.3.5), come il coefficiente di portanza ( $C_L$ ) e il coefficiente di resistenza ( $C_D$ ), dipendono fortemente dal numero di Reynolds. In particolare:

- La portanza (Lift), aumentando il numero di Reynolds, tende ad aumentare fino a un certo punto, a causa della diminuzione dello strato limite viscoso e del ritardo nel distacco del flusso dal profilo.
- La resistenza (Drag) diminuisce con l'aumento di  $Re$  in regime laminare, ma può aumentare in regime turbolento a causa della maggiore irregolarità del flusso.

### 2.3.3 Strato limite

Lo strato limite è un concetto fondamentale nell'ambito della fluidodinamica, introdotto per la prima volta da Ludwig Prandtl nel 1904. Esso si riferisce a quella sottile regione di fluido, immediatamente adiacente ad una superficie solida, dove gli effetti della viscosità sono significativi e influenzano il comportamento del flusso. Comprendere lo strato limite è essenziale per molte applicazioni ingegneristiche, in particolare in campo aerodinamico, dove la gestione della resistenza e della portanza è cruciale, specialmente per veicoli ad alte prestazioni come le macchine da corsa.

Dal punto di vista teorico, lo strato limite può essere descritto attraverso le equazioni di Navier-Stokes, che governano il moto di fluidi viscosi. Tuttavia, queste equazioni sono complesse e spesso difficili da risolvere analiticamente. Per questo motivo, Prandtl propose una semplificazione basata sull'assunto che, lontano dalla superficie, la componente viscosità del flusso diventa trascurabile. Questa semplificazione permette di dividere il

problema in due regioni: lo strato limite, dove la viscosità è importante, e il flusso esterno, dove può essere trattato come non viscoso.

All'interno dello strato limite, la velocità del fluido varia da zero sulla superficie solida (a causa della condizione di non scorrimento) fino al valore della velocità del flusso libero al di fuori dello strato limite. Questa variazione di velocità genera uno sforzo tangenziale che può essere calcolato attraverso la derivata della velocità rispetto alla normale alla superficie.

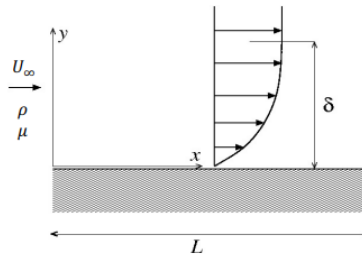


Figura 2.6 - Gradiente di velocità sullo strato limite

Un aspetto cruciale dello studio dello strato limite è la transizione dal regime laminare a quello turbolento. In un flusso laminare, il moto del fluido è ordinato e strati di fluido scorrono paralleli tra loro. Man mano che la distanza dalla superficie aumenta, o con l'incremento della velocità del fluido, il flusso può diventare instabile e passare a un regime turbolento, caratterizzato da moti caotici e vorticosi. Questa transizione ha implicazioni significative in termini di resistenza aerodinamica: lo strato limite turbolento, sebbene più spesso, è meno soggetto a separazione rispetto a quello laminare, ma genera una maggiore resistenza di attrito.

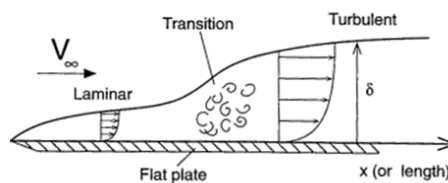


Figura 2.7 - Passaggio da strato limite laminare a turbolento

Nel contesto delle macchine da corsa, lo strato limite ha un impatto diretto sulle prestazioni del veicolo. Le superfici delle auto da corsa, come la carrozzeria e gli alettoni, sono progettate per minimizzare la resistenza e massimizzare la portanza. Un'attenta gestione dello strato limite è essenziale per ottenere questo obiettivo. Ad esempio, l'uso di superfici lisce e ben definite può aiutare a mantenere il flusso laminare, riducendo la resistenza di

attrito. D'altra parte, la progettazione di componenti come i diffusori e i winglet è mirata a controllare la separazione del flusso e la formazione di vortici, che possono incrementare la stabilità del veicolo e migliorare l'aderenza al suolo.

Gli ingegneri utilizzano numerosi strumenti per analizzare e ottimizzare lo strato limite in ambito aerodinamico. La galleria del vento e le simulazioni CFD (Computational Fluid Dynamics) sono metodi comuni per studiare il comportamento del flusso attorno alle superfici delle auto da corsa. Questi strumenti permettono di visualizzare la distribuzione dello strato limite, identificare aree di transizione e separazione, e testare modifiche progettuali in modo efficiente.

### 2.3.4 Profilo alare

Il profilo alare rappresenta uno degli elementi fondamentali nell'ambito dell'aerodinamica, sia per le applicazioni aeronautiche che automobilistiche. Un profilo alare è una sezione trasversale di un'ala e la sua forma determina le caratteristiche aerodinamiche principali, come la portanza, la resistenza e il comportamento alle diverse velocità e angoli di attacco. Nel contesto delle vetture di Formula SAE, l'adozione di profili alari è essenziale per ottimizzare il carico aerodinamico e migliorare la stabilità e le prestazioni del veicolo.

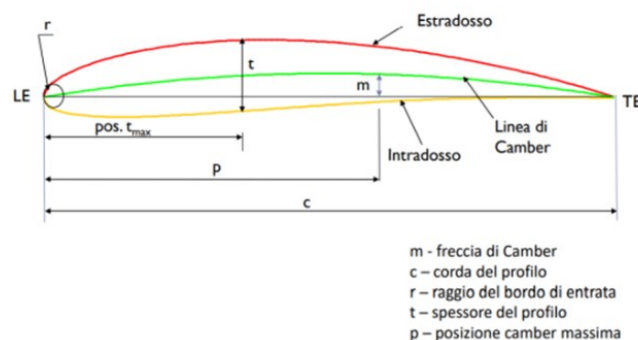


Figura 2.8 - Profilo alare

Il profilo alare può essere descritto matematicamente da curve che definiscono il bordo d'attacco, il bordo d'uscita, l'estradosso (la superficie superiore) e l'intradosso (la superficie inferiore). Le principali caratteristiche geometriche del profilo alare includono la corda ( $c$ ), che è la distanza rettilinea tra il bordo d'attacco e il bordo d'uscita, lo spessore massimo ( $t$ ), che è la massima distanza tra l'estradosso e l'intradosso, e il camber, che rappresenta la

curvatura del profilo e la deviazione della linea media dal filo della corda. La funzione principale di un profilo alare è generare portanza ( $L$ ), una forza perpendicolare alla direzione del flusso d'aria, e minimizzare la resistenza ( $D$ ), una forza che si oppone al moto. La portanza è cruciale per mantenere il veicolo aderente alla pista, mentre la resistenza deve essere minimizzata per ridurre il consumo energetico e migliorare l'efficienza complessiva.

Nel contesto della Formula SAE, l'applicazione dei profili alari è mirata a massimizzare il carico aerodinamico per migliorare la trazione e la stabilità del veicolo, specialmente nelle curve e durante le manovre ad alta velocità. Il diffusore posteriore, in particolare, utilizza il principio del profilo alare invertito per generare una depressione sotto il veicolo, aumentando così il carico aerodinamico (downforce). La progettazione di un profilo alare per una vettura di Formula SAE richiede una serie di considerazioni tecniche, tra cui l'angolo di attacco, lo spessore relativo e la curvatura (camber). L'angolo di attacco è l'angolo tra la corda del profilo alare e la direzione del flusso d'aria. Angoli di attacco più elevati aumentano il coefficiente di portanza fino a un certo limite, oltre il quale il flusso stalla, causando un drastico aumento della resistenza e una perdita di portanza. I profili con spessori maggiori tendono a generare più portanza, ma anche più resistenza. La scelta dello spessore deve bilanciare questi due aspetti in base alle esigenze specifiche del veicolo. I profili con una maggiore curvatura possono generare più portanza a parità di angolo di attacco, ma aumentano anche la resistenza.

### **2.3.5 Forze e coefficienti**

Le forze aerodinamiche influenzano la velocità massima, la stabilità e l'aderenza della vettura al suolo, e comprendono quattro componenti principali: la portanza (lift), la deportanza (downforce), la resistenza (drag) e la forza laterale (side force). Questo capitolo esplorerà questi concetti sia a livello teorico che pratico, con particolare attenzione all'applicazione di queste forze nel contesto dello sviluppo di un diffusore per una vettura di Formula SAE.

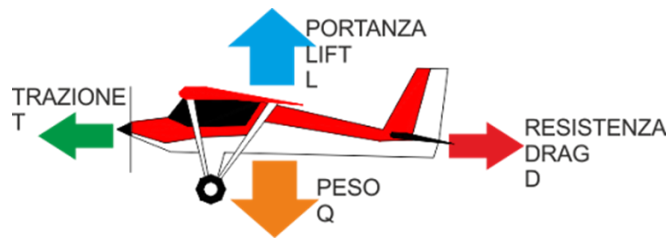


Figura 2.9 - Verso della portanza

La portanza è una forza aerodinamica che agisce perpendicolarmente alla direzione del flusso d'aria intorno a un corpo. Nei veicoli terrestri, la portanza può essere dannosa, in quanto tende a sollevare il veicolo, riducendo l'aderenza delle ruote alla strada. Questo fenomeno è comunemente sfruttato nell'aviazione per permettere agli aeroplani di volare, ma nelle vetture da corsa, un'eccessiva portanza può compromettere la stabilità e la manovrabilità. La portanza  $L$  può essere calcolata utilizzando la seguente equazione:

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_L$$

dove  $\rho$  è la densità dell'aria,  $v$  è la velocità del veicolo rispetto all'aria,  $S$  è la superficie di riferimento, e  $C_L$  è il coefficiente di portanza ed è definito dalla formula inversa della portanza come:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho v^2 S}$$

Nel contesto di una vettura di Formula SAE, il coefficiente di portanza è generalmente negativo, indicando una forza diretta verso il basso che aumenta l'aderenza delle ruote al suolo.

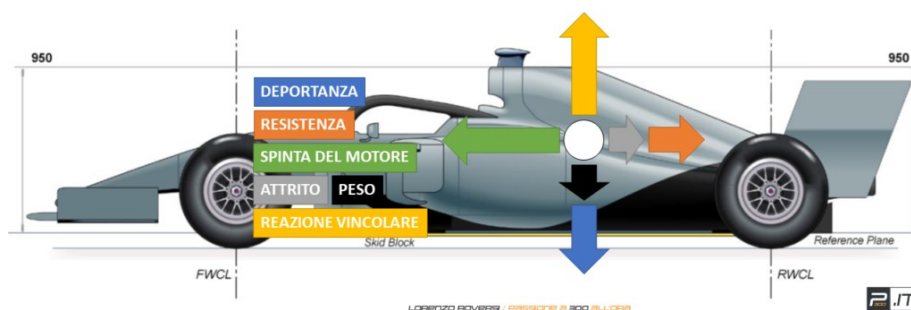


Figura 2.10 - Verso deportanza



La deportanza è la forza che agisce verso il basso, migliorando l'aderenza delle ruote al suolo e quindi la trazione del veicolo. In una vettura di Formula SAE, la deportanza è essenziale per mantenere alti livelli di aderenza nelle curve ad alta velocità e durante le frenate brusche. A differenza della portanza, la deportanza è una forza desiderata nelle auto da corsa perché aumenta la forza normale sulle ruote, migliorando la capacità del veicolo di generare forze laterali e longitudinali. La deportanza  $D$  può essere descritta con un'equazione simile a quella della portanza:

$$D = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_D$$

dove  $C_D$  è il coefficiente di deportanza, che è solitamente negativo rispetto al coefficiente di portanza per indicare la forza diretta verso il basso. Il coefficiente di deportanza ( $C_D$ ) è calcolabile anch'esso attraverso la formula inversa della deportanza:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho v^2 S}$$

La resistenza aerodinamica, o drag, è una forza che si oppone al movimento del veicolo attraverso l'aria. Questa forza è un fattore critico perché riduce l'efficienza e la velocità massima del veicolo. La resistenza aerodinamica è causata dalla pressione dell'aria sul fronte del veicolo e dalla turbolenza generata dietro di esso. La resistenza totale può essere calcolata come:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 S C'_D$$

dove  $C'_D$  in questo contesto rappresenta il coefficiente di resistenza e  $U_\infty$  rappresenta la velocità d'avanzamento. Ridurre la resistenza è essenziale per migliorare le prestazioni e l'efficienza del veicolo. Ciò può essere ottenuto ottimizzando la forma del veicolo per minimizzare la turbolenza e migliorare il flusso d'aria.

Infine, si ha che l'efficienza aerodinamica di un veicolo è definita come il rapporto tra la deportanza generata e la resistenza aerodinamica. È espressa dalla formula:

$$\eta = \frac{C_D}{C'_D}$$

dove  $C_D$  è il coefficiente di deportanza e  $C'_D$  è il coefficiente di resistenza. Un'elevata efficienza aerodinamica indica che il veicolo genera una grande forza di deportanza rispetto alla resistenza aerodinamica, migliorando la stabilità e le prestazioni complessive.

### 2.3.6 Vortici di estremità

I vortici di estremità sono fenomeni aerodinamici che si verificano in presenza di superfici alari o elementi aerodinamici caratterizzati da una differenza di pressione tra la parte superiore e quella inferiore. Questo capitolo approfondisce le cause dei vortici di estremità, le basi teoriche che li descrivono e le soluzioni adottate per mitigarne gli effetti negativi, con particolare attenzione allo sviluppo di un diffusore per una vettura di Formula SAE.



Figura 2.11 - Vortici d'estremità sull'ala posteriore

I vortici di estremità si formano a causa della differenza di pressione tra il lato a bassa pressione e ad alta pressione di un profilo alare o di un componente aerodinamico come un diffusore. Questa differenza di pressione induce il fluido ad avvolgersi attorno alle estremità del profilo, creando un flusso vorticoso. Nel contesto di una vettura di Formula SAE, i vortici di estremità possono essere osservati alle estremità dei diffusori e delle ali posteriori.

La formazione dei vortici di estremità può essere descritta attraverso la teoria dei vortici di Prandtl e la teoria della circolazione di Kutta-Joukowski. Secondo Prandtl, l'effetto combinato della distribuzione della pressione lungo un'ala e la viscosità del fluido porta alla formazione di un sistema di vortici lungo il bordo d'uscita e alle estremità delle ali. I vortici

principali generati alle estremità sono chiamati vortici di estremità, e la loro intensità dipende dall'angolo di attacco e dalla differenza di pressione tra il lato superiore e inferiore del profilo. La teoria della circolazione di Kutta-Joukowski postula che la forza di portanza su un'ala è proporzionale alla circolazione del flusso intorno al profilo. La differenza di pressione tra il lato superiore e inferiore induce la circolazione, che è massima lungo il bordo d'uscita e decresce verso le estremità, contribuendo alla formazione dei vortici di estremità.

I vortici di estremità hanno effetti significativi sulle prestazioni aerodinamiche di una vettura di Formula SAE. Essi aumentano la resistenza aerodinamica (drag) e riducono l'efficienza del diffusore o dell'ala, compromettendo la generazione di deportanza (downforce) necessaria per migliorare la stabilità e l'aderenza del veicolo in curva.

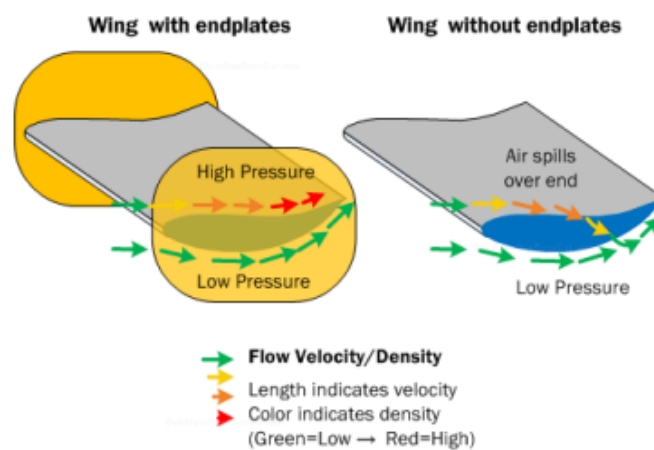


Figura 2.12 - Ala con e senza endplate

Per ridurre gli effetti negativi dei vortici di estremità, diverse strategie possono essere adottate. L'uso di endplates (piastre terminali) alle estremità delle ali e dei diffusori aiuta a ridurre la differenza di pressione tra il lato superiore e inferiore, limitando la formazione dei vortici. Gli endplates possono essere progettati con geometrie ottimizzate per minimizzare la resistenza indotta dai vortici. Le winglets sono piccoli profili aggiunti alle estremità delle ali che alterano la circolazione del flusso, riducendo l'intensità dei vortici. Nel contesto dei diffusori, piccoli deflettori possono svolgere una funzione simile. L'angolo di inclinazione e la geometria del diffusore possono essere ottimizzati per ridurre la formazione dei vortici di estremità.

### 2.3.7 Streamline

Le streamline, o linee di flusso, sono uno strumento fondamentale nello studio dell'aerodinamica, utilizzate per visualizzare il comportamento dei fluidi in movimento intorno a un oggetto. Nel contesto dello sviluppo di un diffusore per una vettura di Formula SAE, comprendere e analizzare le streamline permette di ottimizzare il design per migliorare le prestazioni aerodinamiche, ridurre la resistenza e aumentare la deportanza.

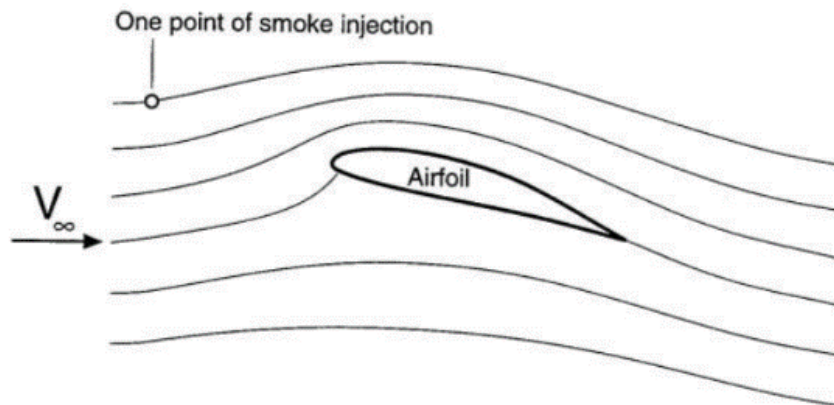


Figura 2.13 - Streamline

Le streamline rappresentano il percorso che una particella di fluido segue in un campo di flusso stazionario. Una caratteristica cruciale delle streamline è che non si intersecano mai in un flusso stazionario, poiché ciò implicherebbe due diverse direzioni di velocità in un singolo punto, il che è fisicamente impossibile.

Nell'aerodinamica, le streamline sono utilizzate per analizzare e visualizzare il comportamento del flusso d'aria intorno a un corpo. Queste linee sono fondamentali per identificare zone di alta e bassa pressione, separazione del flusso, vortici e altre caratteristiche critiche che influenzano le prestazioni aerodinamiche. Nel design automobilistico, e in particolare per una vettura di Formula SAE, le streamline aiutano a comprendere come l'aria interagisce con il diffusore, influenzando la deportanza e la resistenza.

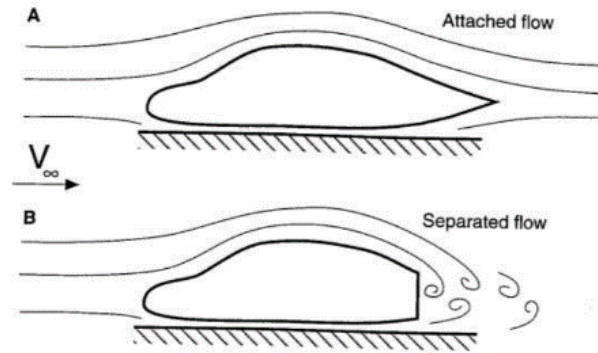


Figura 2.14 - Differenza tra flusso attaccato (A) e staccato (B)

Analizzando le streamline attorno al diffusore, si possono identificare aree dove il flusso è ottimale e dove, invece, si possono verificare problematiche come la separazione del flusso. La separazione del flusso riduce l'efficienza del diffusore, aumentando la resistenza e riducendo la deportanza. L'obiettivo è quindi progettare il diffusore in modo che le streamline rimangano attaccate alla superficie il più a lungo possibile, massimizzando la generazione di deportanza.

### 2.3.8 Angolo di stallo

L'angolo di stallo è un concetto cruciale sia nella teoria dell'aerodinamica che nelle applicazioni pratiche dei profili alari, e ha un'importanza particolare nello sviluppo di componenti aerodinamici come il diffusore per una vettura di Formula SAE.

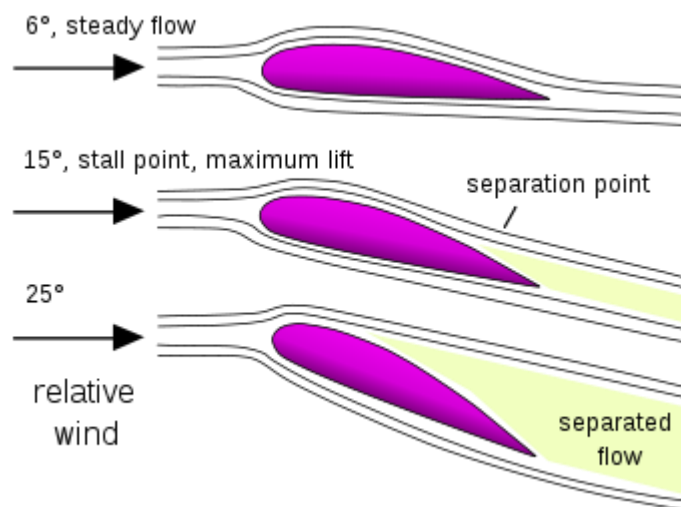


Figura 2.15 - Esempio di profilo alare che stalla

L'angolo di stallo rappresenta l'angolo di incidenza oltre il quale un profilo alare, o in questo caso il diffusore, non è più in grado di generare il carico aerodinamico desiderato. Questo avviene quando il flusso d'aria che scorre lungo la superficie del diffusore si separa, formando turbolenze e vortici che riducono drasticamente la portanza o, nel caso del diffusore, l'efficacia nella gestione del flusso d'aria sotto la vettura.

# Capitolo 3

## CFD

La Fluidodinamica Computazionale (CFD, Computational Fluid Dynamics) è una disciplina che utilizza metodi numerici e algoritmi per risolvere e analizzare problemi che coinvolgono flussi di fluidi. Con l'ausilio di computer ad alte prestazioni, il CFD consente di simulare il comportamento dei fluidi in una vasta gamma di applicazioni ingegneristiche, dall'aerodinamica delle auto e degli aerei, alla progettazione di impianti industriali e alle previsioni meteorologiche.

I principali vantaggi dell'utilizzo del CFD includono:

- **Riduzione dei costi:** Le simulazioni CFD riducono la necessità di costosi test sperimentali e prototipi fisici;
- **Rapidità:** Le analisi possono essere condotte in tempi relativamente brevi rispetto ai metodi sperimentali tradizionali;
- **Dettaglio e Precisione:** Il CFD permette di ottenere dettagliate distribuzioni di grandezze fisiche come pressione, velocità e temperatura in tutto il dominio di calcolo.
- **Flessibilità:** È possibile analizzare un'ampia varietà di scenari operativi e condizioni al contorno senza la necessità di modifiche fisiche al setup sperimentale.

Tuttavia, il CFD presenta anche alcuni limiti:

- **Costi computazionali:** Le simulazioni richiedono significative risorse computazionali, specialmente per problemi complessi.
- **Complessità di modellazione:** La qualità dei risultati dipende fortemente dai modelli fisici e numerici utilizzati, come i modelli di turbolenza.

## 3.1 Basi Teoriche

Il CFD si basa sulla soluzione numerica delle equazioni che governano il movimento dei fluidi, tra cui le equazioni di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia.

Queste equazioni derivano dai principi fondamentali della fisica:

- Conservazione della Massa: La legge di conservazione della massa, o equazione di continuità, afferma che la massa di fluido deve essere conservata in ogni punto del dominio di calcolo.
- Conservazione della Quantità di Moto: Le equazioni di Navier-Stokes descrivono la conservazione della quantità di moto, considerando le forze interne (come la viscosità) ed esterne (come la pressione).
- Conservazione dell'Energia: L'equazione dell'energia tiene conto delle variazioni di energia interna del fluido a causa della conduzione termica, del lavoro fatto dalle forze viscosi e dalla compressibilità del fluido.

La discretizzazione di queste equazioni, mediante metodi come i volumi finiti, gli elementi finiti o le differenze finite, consente di risolverle numericamente su una griglia di punti che rappresenta il dominio del problema.

### 3.1.1 Equazioni di Navier-Stokes

Un software CFD risolve le equazioni di Navier-Stokes, che rappresentano la formalizzazione matematica di tre principi fisici fondamentali a cui i fluidi rispondono:

- Principio di conservazione della massa (equazione di continuità).
- Secondo principio della dinamica (bilancio della quantità di moto).
- Primo principio della termodinamica (conservazione dell'energia).

Le equazioni di Navier-Stokes permettono di descrivere completamente qualsiasi flusso fluido, anche turbolento, ma risultano difficili da risolvere analiticamente a causa della loro complessità, per questo motivo vengono utilizzati i software CFD per risolvere i calcoli che ne derivano.



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

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

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

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

Figura 3.1 - Equazioni di Navier-Stokes

### 3.1.2 Turbolenze

La turbolenza è un fenomeno complesso caratterizzato da moti irregolari e vorticosi del fluido, che si manifestano a numeri di Reynolds elevati. La modellazione della turbolenza rappresenta una delle sfide principali nella CFD, in quanto i moti turbolenti coinvolgono una vasta gamma di scale temporali e spaziali.

Esistono vari approcci per modellare la turbolenza:

- Direct Numerical Simulation (DNS): Risolve direttamente tutte le scale della turbolenza, richiedendo risorse computazionali molto elevate, generalmente impraticabili per applicazioni ingegneristiche su larga scala.

- Large Eddy Simulation (LES): Risolve direttamente le grandi strutture vorticali, mentre modella le piccole scale tramite modelli di sotto filtro. Richiede ancora risorse significative, ma è più praticabile del DNS.

- Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS): Modella tutte le scale della turbolenza tramite equazioni mediate, introducendo termini addizionali che rappresentano gli effetti turbolenti. È il metodo più comunemente utilizzato nell'ingegneria pratica a causa del suo costo computazionale relativamente basso.

La scelta del modello di turbolenza dipende dal compromesso tra accuratezza e costo computazionale, in funzione delle specifiche esigenze del progetto.

## 3.2 Step di una simulazione CFD

In questo paragrafo saranno esposti tutti i passaggi necessari per impostare una simulazione CFD sul programma STAR-CCM+, un prodotto Siemens, azienda partner della squadra. Le simulazioni discusse in questa tesi sono state condotte utilizzando il computer di squadra e quello personale, formati rispettivamente dai seguenti componenti:

- CPU: Intel Core i9-10900K 3.70 GHz e Intel Core i9-14900KF 6 GHz;
- RAM: 128 GB e 64 GB;
- GPU: due NVIDIA Quadro RTX4000 e 4080 super.

### 3.2.1 Modifica del CAD

Nonostante l'alto livello delle prestazioni dei due computer, nelle simulazioni CFD è generalmente consigliabile semplificare il modello da importare nel software di calcolo, rimuovendo le parti che non influenzano significativamente l'aerodinamica, al fine di ottenere una mesh più leggera e ridurre così il tempo necessario per trovare la soluzione.



Figura 3.2 - CAD completo della macchina

Il primo passo per preparare le simulazioni consiste nel modificare il disegno 3D della macchina (realizzata con NX), passando dal modello complessivo di tutti i componenti della vettura (Figura 3.2) a uno semplificato e ottimizzato per il software CFD (Figura 3.3). Il

vano motore è stato chiuso secondo il profilo del telaio, inclusa l'apertura per il pilota. È stato inoltre aggiunto un modello di manichino per osservare il comportamento del flusso con il casco. Un'altra modifica rilevante è stata trattare le ruote come cilindri completamente chiusi per evitare problemi nella discretizzazione del modello, poiché ciò avrebbe richiesto una mesh molto più densa senza migliorare significativamente i risultati finali.

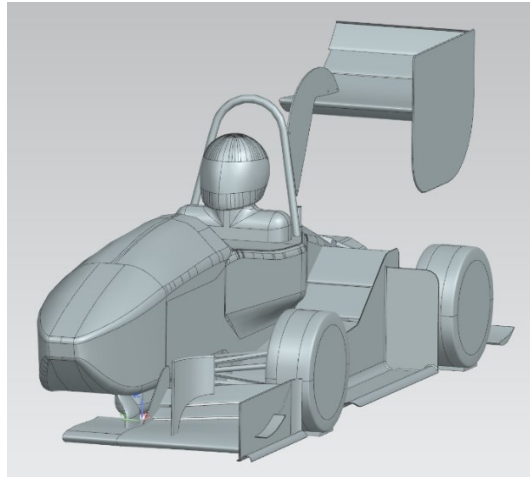


Figura 3.3 - CAD semplificato della macchina

Successivamente, il modello semplificato dell'auto viene diviso secondo il piano di simmetria, permettendo di eseguire i calcoli su una sola metà se le condizioni della simulazione sono simmetriche, riducendo così il tempo di risoluzione del problema. Il modello viene quindi importato in STAR-CCM+ in formato Parasolid (.x\_t) (Figura 3.4). Importare il modello in formato Parasolid (.x\_t) ci consente di avere una superficie unica per ogni parte dell'auto, che successivamente verrà suddivisa in diverse macrocategorie per ottenere risultati specifici per ciascuna di esse.

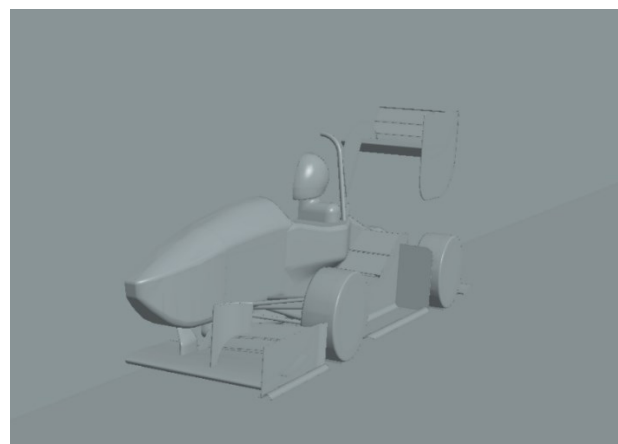


Figura 3.4 - Importazione di metà auto in STAR-CCM+

È fondamentale prestare particolare attenzione alla definizione del contatto tra le ruote dell'auto e il fondo del dominio, ossia l'asfalto. Sulla superficie dello pneumatico che dovrà entrare in contatto viene aggiunto un tallone durante la fase di modellazione (Figura 3.5), il quale, nella definizione del dominio, dovrà essere intersecato correttamente per simulare la deformazione della ruota sotto il peso dell'auto.



Figura 3.5 - Tallone che simula il contatto dello pneumatico con l'asfalto

### 3.2.2 Dominio di calcolo

Nella simulazione fluidodinamica computazionale (CFD) utilizzata per analizzare l'aerodinamica dei veicoli, il dominio di calcolo rappresenta una parte cruciale del modello. Questo dominio definisce il volume di fluido (nel nostro caso, aria) che circonda e interagisce con l'autoveicolo. La scelta corretta delle dimensioni del dominio di calcolo è fondamentale per ottenere risultati accurati e affidabili.

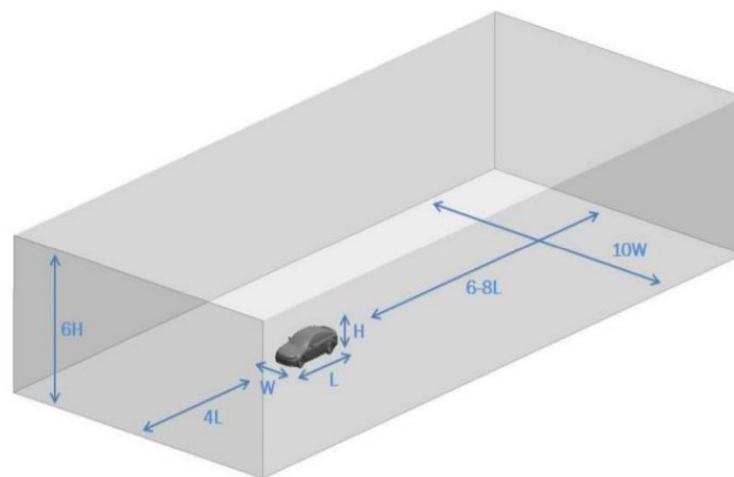


Figura 3.6 - Dominio di calcolo con le sue dimensioni caratteristiche

Il dominio di calcolo in STAR-CCM+ è rappresentato da un parallelepipedo tridimensionale che contiene l'auto e l'aria circostante. Le dimensioni di questo parallelepipedo sono

determinate in modo da garantire che le influenze del bordo del dominio non alterino il flusso d'aria attorno al veicolo, evitando la generazione di carichi aerodinamici non corretti. Le dimensioni specifiche del dominio di calcolo sono proporzionali agli ingombri del veicolo nelle tre direzioni principali. Questa proporzionalità è stata suggerita dagli esperti della Siemens per assicurare la massima accuratezza possibile dei risultati.

La distanza tra il muso dell'auto e la parte frontale del dominio deve essere pari a quattro volte la lunghezza dell'auto. Questo spazio è necessario per permettere al flusso d'aria di stabilizzarsi prima di interagire con il veicolo. La distanza tra la parte posteriore dell'auto e la fine del volume deve essere compresa tra sei e otto volte la lunghezza dell'auto, per consentire un'adeguata gestione del flusso d'aria a valle del veicolo, dove si formano scie e turbolenze. L'altezza del parallelepipedo deve essere pari a sei volte l'altezza del veicolo. Questo valore assicura che l'aria possa muoversi liberamente sopra il veicolo senza essere influenzata dai bordi superiori del dominio. La larghezza del dominio deve essere pari a dieci volte la carreggiata del veicolo. Tuttavia, nel caso di simulazioni simmetriche, dove si considera solo metà del veicolo, la larghezza può essere ridotta a cinque volte la carreggiata. Questa configurazione permette di ridurre il numero di elementi di calcolo necessari, ottimizzando le risorse computazionali senza compromettere la precisione dei risultati.

Nelle simulazioni fluidodinamiche di questo tipo, il corpo del veicolo rimane fermo mentre il fluido si muove attorno ad esso, generando una velocità relativa tra il veicolo e il fluido. Questo approccio, noto come "approccio di riferimento euleriano", è comune nelle analisi CFD poiché facilita la modellazione del flusso e la raccolta dei dati necessari per l'analisi aerodinamica.

La definizione accurata del dominio di calcolo è essenziale per ottenere simulazioni CFD affidabili e precise. Le dimensioni del dominio devono essere scelte con cura per assicurare che il flusso d'aria attorno al veicolo non sia influenzato dai bordi del dominio. In STAR-CCM+, questa configurazione richiede un equilibrio tra dettaglio e efficienza computazionale, assicurando che il dominio sia sufficientemente ampio per rappresentare correttamente il flusso d'aria mentre si mantiene gestibile il numero di elementi di calcolo. La corretta impostazione del dominio di calcolo permette di ottenere risultati utili per l'ottimizzazione del design aerodinamico dei veicoli, contribuendo allo sviluppo di auto più efficienti e performanti.

### 3.2.3 Suddivisione della vettura

Come primo passo nell'analisi aerodinamica della vettura di Formula SAE, è fondamentale suddividere il modello in diverse parti. Questo consente una discretizzazione più regolare delle superfici e permette di stimare in modo più accurato il contributo aerodinamico di ciascuna parte, sia in termini di deportanza che di resistenza all'avanzamento. Inoltre, affrontando aree della vettura con dimensioni e raggi di curvatura variabili, si può densificare la mesh dove necessario e semplificarla dove le superfici sono più facili da discretizzare, evitando così un sovraccarico del solutore.

Le principali parti nelle quali la vettura è stata suddivisa sono le seguenti:

- Ala posteriore;
- Ala anteriore;
- Fondo;
- Diffusore;
- Macchina;
- Ruota anteriore;
- Ruota posteriore.

La sezione denominata "Macchina" comprende tutte le superfici del telaio, i braccetti delle sospensioni, le pance laterali, la parte superiore del fondo, il casco del pilota e il main hoop. Questa suddivisione permette di gestire in modo più efficace le varie componenti aerodinamiche della vettura, attribuendo a ciascuna parte una mesh ottimizzata in funzione delle esigenze specifiche di calcolo.

Inoltre, per l'analisi CFD con il software STAR-CCM+, è stata effettuata una suddivisione delle facce più esterne del dominio, assegnando condizioni al contorno specifiche a ciascuna di esse. Le condizioni al contorno sono state applicate come segue:

- Ingresso del volume fluido (figura 3.7): Questa faccia rappresenta il punto di ingresso del flusso d'aria nel dominio di calcolo. Viene impostata una condizione di velocità costante per simulare l'aria in entrata;

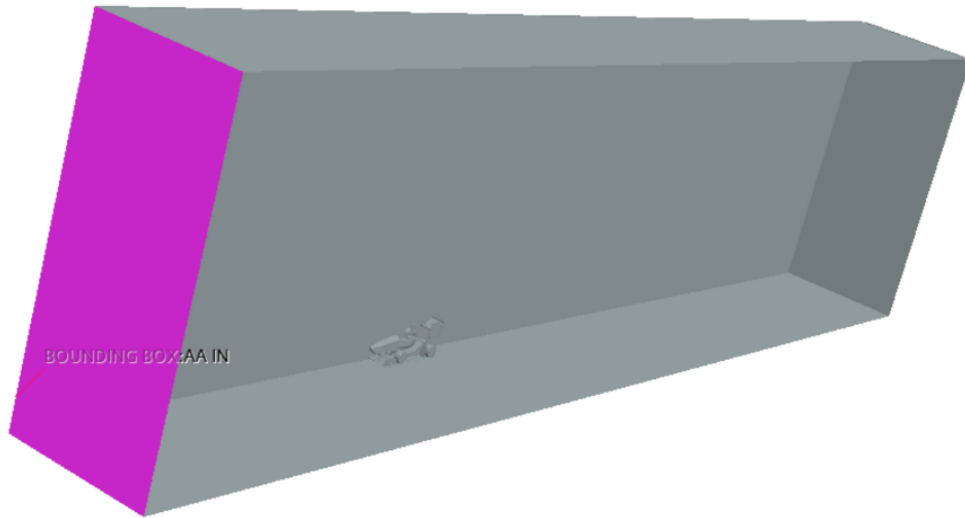


Figura 3.7 - Faccia dell'ingresso del fluido nel dominio

- Uscita del volume fluido (figura 3.8): Rappresenta il punto di uscita del flusso d'aria. Qui viene applicata una condizione di pressione costante per simulare l'aria che lascia il dominio;

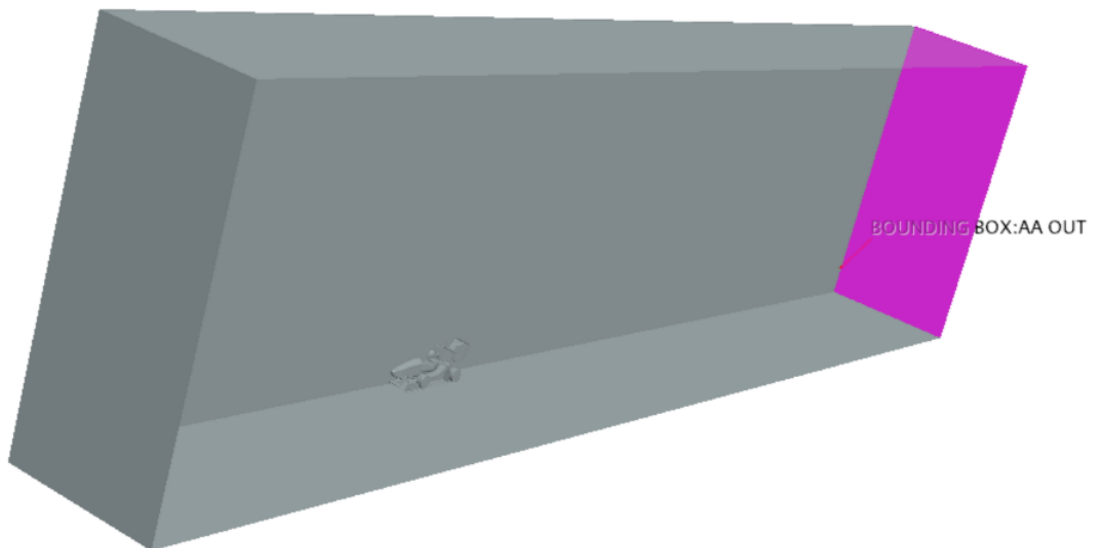


Figura 3.8 - Faccia dell'uscita del fluido nel dominio

- Parete comprendente soffitto e lato sinistro dell'auto (figura 3.9): Su questa faccia viene applicata una condizione di parete scivolante o no-slip, a seconda della necessità di simulare l'interazione con il suolo e le strutture circostanti;

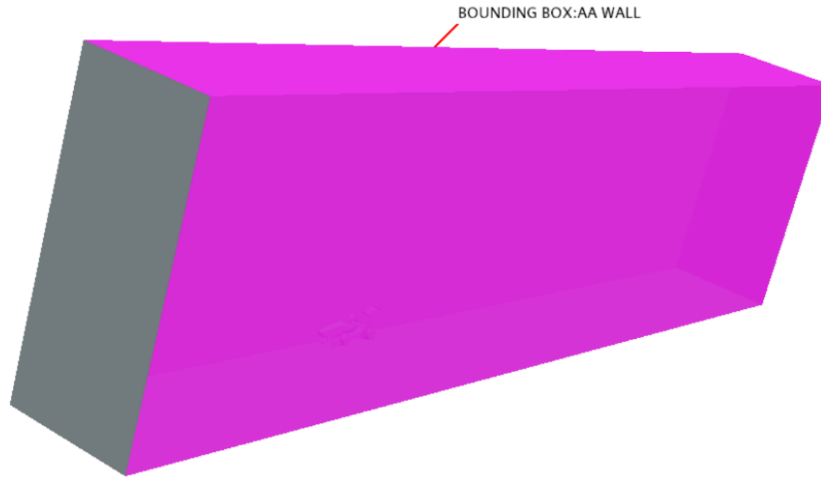


Figura 3.9 - Parete del dominio

- Parete di simmetria (figura 3.10): Questa condizione al contorno è utilizzata per ridurre il dominio di calcolo, assumendo che la vettura e il flusso siano simmetrici rispetto a un piano centrale.

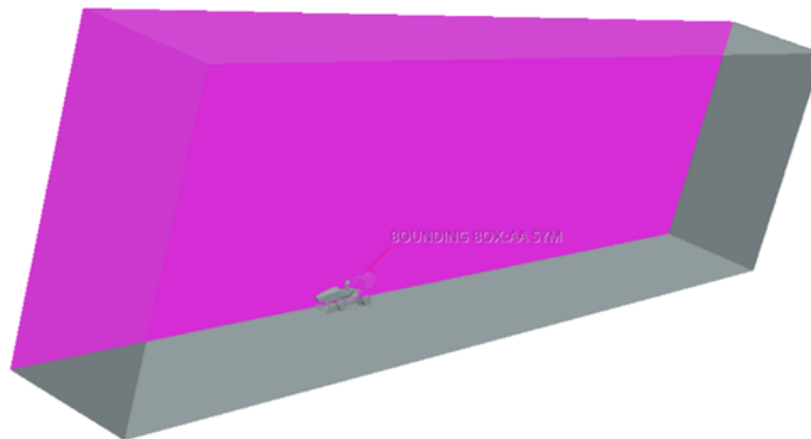


Figura 3.10 - Parete di simmetria del dominio

L'utilizzo di STAR-CCM+ per la suddivisione e la discretizzazione del modello della vettura permette di ottenere simulazioni aerodinamiche ad alta precisione. La possibilità di personalizzare la mesh e le condizioni al contorno per ciascuna parte del modello consente di ottimizzare le risorse computazionali e di migliorare l'accuratezza dei risultati.



### 3.2.4 Surface wrapper

Il surface wrapper, implementato in STAR-CCM+, rappresenta uno strumento fondamentale per la generazione di una mesh di superficie particolarmente utile nelle simulazioni di flussi attorno a corpi caratterizzati da geometrie complesse o con un elevato livello di dettaglio. Questa funzionalità consente di suddividere la superficie del corpo in esame in una griglia di elementi, la cui densità e dimensione possono essere regolate tramite vari parametri, permettendo una gestione automatica e flessibile del processo di discretizzazione.

Uno dei parametri principali su cui si basa il surface wrapper è il "Base size". Questo valore rappresenta la dimensione di base degli elementi della griglia che discretizzeranno la superficie. Definire accuratamente il "Base size" è cruciale poiché la maggior parte degli altri parametri della mesh di superficie vengono espressi in relazione a questo valore, spesso in termini percentuali. Questo approccio semplifica la gestione della mesh e permette una maggiore coerenza nella definizione della griglia.

Un altro parametro importante è il "Target surface size", che specifica la lunghezza desiderata del bordo degli elementi della griglia. Questo valore può essere impostato sia come percentuale della "Base size" sia come un valore assoluto. Il "Target surface size" determina quindi la risoluzione media della mesh di superficie, influenzando direttamente la qualità della simulazione.

Il "Minimum surface size" rappresenta la dimensione minima che possono raggiungere i bordi degli elementi della griglia. Anche questo valore può essere espresso come percentuale della "Base size" o come valore assoluto. Ridurre il "Minimum surface size" permette di ottenere una maggiore rifinitura nelle regioni di interesse, sebbene ciò comporti un aumento dei tempi di calcolo dovuto al maggior numero di elementi da processare.

Un parametro aggiuntivo da considerare è la "Surface curvature (Pts/circle)", che determina il numero di triangoli o celle necessari per rappresentare una superficie cilindrica a 360°. In pratica, questo parametro definisce quanti spigoli vengono utilizzati per approssimare una superficie curva, influenzando la capacità della mesh di adattarsi fedelmente a geometrie complesse.

Dopo l'applicazione del surface wrapper, può accadere che alcuni elementi della griglia non soddisfino le condizioni desiderate. In tali casi, STAR-CCM+ offre uno strumento denominato "repair surface", che consente di correggere e modificare gli elementi indesiderati tramite diverse funzioni, sia automatiche sia manuali. Questo strumento è essenziale per affinare ulteriormente la mesh, garantendo che rispecchi accuratamente le

caratteristiche geometriche e i requisiti della simulazione. Nelle simulazioni che andremo ad analizzare sarà sempre eseguito per evitare spiacevoli inconvenienti.

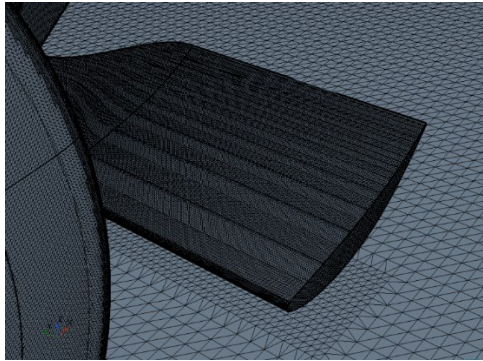


Figura 3.11 - Risultato visivo del surface wrapper

### 3.2.5 Mesh volumetrica

La creazione della mesh volumetrica è un passo cruciale nel processo di simulazione CFD (Computational Fluid Dynamics), in quanto permette di suddividere l'intero dominio fluido in elementi discreti. Questo approccio facilita l'assegnazione delle proprietà fisiche e delle condizioni al contorno necessarie per ottenere risultati accurati dalle simulazioni.

Dopo aver effettuato la discretizzazione delle superfici della vettura con una mesh superficiale, si passa alla generazione della mesh volumetrica. Questo processo prende avvio dalla mesh superficiale e si espande verso l'esterno, creando un reticolo tridimensionale che copre tutto il dominio di interesse. Le celle della mesh sono più fitte nelle vicinanze delle superfici del corpo in analisi, dove le variazioni dei campi fisici sono maggiormente significative. Man mano che ci si allontana dalla superficie, le celle diventano progressivamente più grandi, poiché le variazioni in queste zone sono meno rilevanti e quindi richiedono meno dettaglio.

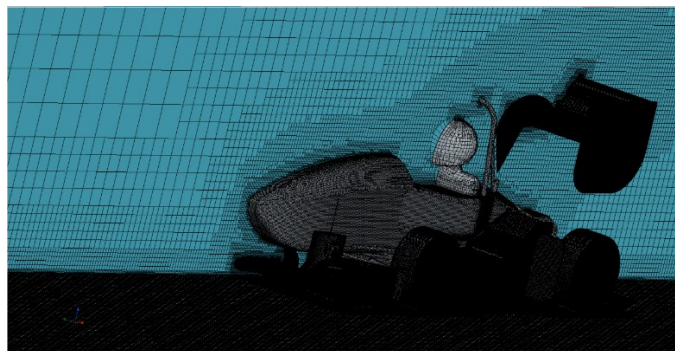


Figura 3.12 - Andamento della mesh

Il software STAR-CCM+ offre strumenti avanzati per la generazione della mesh volumetrica, tra cui la funzione "automated mesh", che automatizza gran parte del processo di creazione e ottimizzazione della mesh. Questo strumento consente di configurare le dimensioni delle celle e le transizioni di densità in modo che siano ottimizzate per le specifiche esigenze del progetto.

Una pratica comune per migliorare la qualità della mesh è l'utilizzo di volumi di controllo. Questi volumi sono definiti per concentrare le celle fitte solo nelle regioni di interesse, riducendo il numero totale di celle e quindi i tempi di calcolo senza compromettere la precisione dei risultati. Nel contesto dell'analisi aerodinamica di una vettura, i volumi di controllo possono essere suddivisi come segue:

- Blocco grande vettura e scia (figura 3.13): Questo volume include la vettura e la regione di scia immediatamente dietro di essa. È essenziale per catturare accuratamente i fenomeni di separazione del flusso e di turbolenza che si verificano in queste aree;

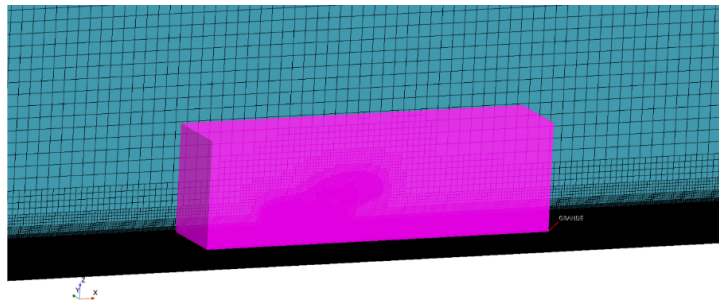


Figura 3.13 - Blocco grande vettura e scia

- Blocco piccolo vettura e scia (figura 3.14): Una versione ridotta del blocco grande, concentrata sulle aree di maggiore interesse come la zona intorno alla vettura dove si verificano le interazioni più complesse tra il flusso e la superficie del veicolo;

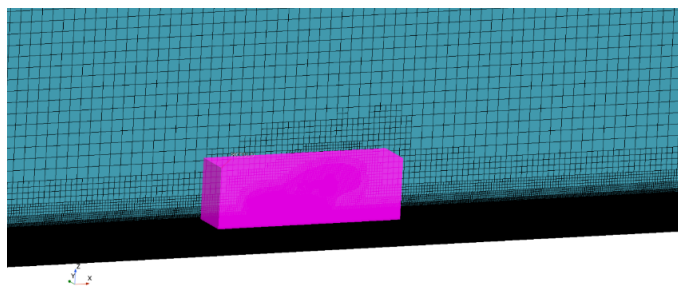


Figura 3.14 - Blocco piccolo vettura e scia

- Offset della vettura (figura 3.15): Utilizzando le funzioni CAD del software di simulazione, si può creare una geometria che segue l'andamento delle superfici della vettura con un certo offset. Questo permette di definire un'area di discretizzazione precisa vicino alla superficie della vettura, migliorando la risoluzione dei fenomeni di flusso critici;

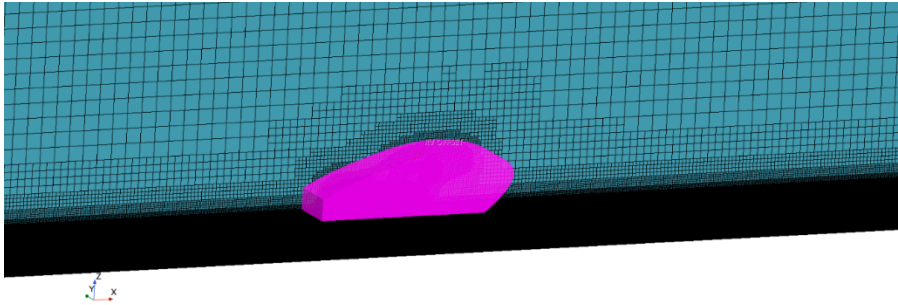


Figura 3.15 - Offset della vettura

- Blocco low (figura 3.16): Questo volume si riferisce alla regione inferiore della vettura, che include il sottoscocca e le aree circostanti. La discretizzazione di questo blocco è fondamentale per catturare accuratamente i fenomeni di flusso sotto la vettura, dove si possono verificare effetti di aspirazione e turbolenze che influenzano significativamente la resistenza aerodinamica e la deportanza del veicolo. La mesh in questa zona deve essere particolarmente fitta vicino al sottoscocca per risolvere i dettagli delle interazioni tra il flusso d'aria e le superfici inferiori della vettura. Questo è essenziale per calcolare correttamente le forze aerodinamiche che agiscono sulla vettura e per ottimizzare le prestazioni globali del veicolo.

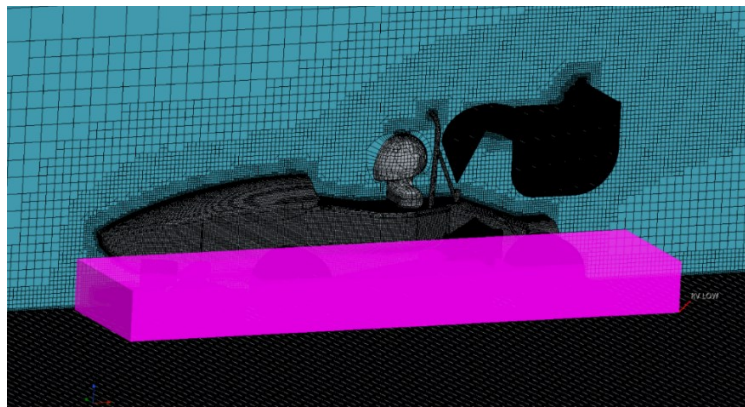


Figura 3.16 - Blocco low

- Blocco ruota anteriore (figura 3.17): Questo volume si concentra sulla zona immediatamente circostante le ruote anteriori del veicolo, dove le interazioni tra il flusso d'aria e le ruote in movimento generano vortici e turbolenze significative. Una mesh dettagliata in questa area è cruciale per catturare le variazioni di pressione e le forze aerodinamiche che influenzano la stabilità e la manovrabilità del veicolo. Inoltre, il movimento relativo tra le ruote e la superficie stradale deve essere modellato con precisione, richiedendo una mesh più fitta vicino alla superficie del terreno e intorno al punto di contatto della ruota.

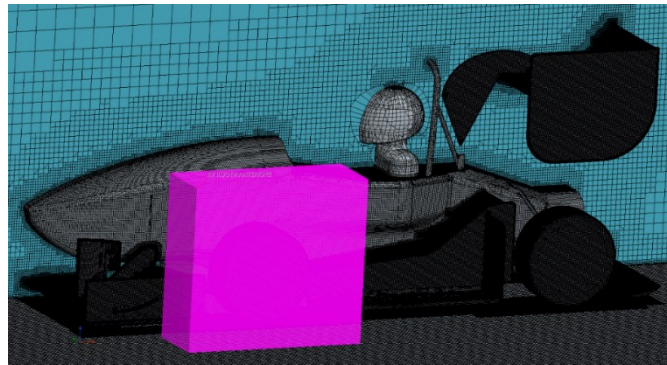


Figura 3.17 - Blocco ruota anteriore

- Blocco ruota posteriore (figura 3.18): Simile al blocco ruota anteriore, questo volume copre la regione intorno alle ruote posteriori, dove il flusso d'aria turbolento e le interazioni con componenti aerodinamici come i diffusori posteriori e l'ala posteriore devono essere modellati con precisione. Le forze generate intorno alle ruote posteriori hanno un impatto diretto sulla trazione e sulla stabilità del veicolo, rendendo necessaria una discretizzazione accurata per calcolare correttamente queste forze.

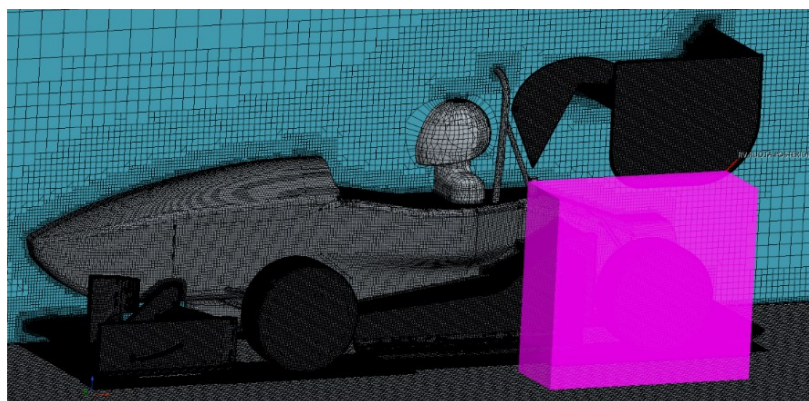


Figura 3.18 - Blocco ruota posteriore

La creazione di una mesh volumetrica efficiente e accurata richiede un equilibrio tra la necessità di risolvere dettagli minuti e il bisogno di mantenere i tempi di calcolo entro limiti accettabili. Utilizzando strumenti avanzati come STAR-CCM+ e implementando tecniche di controllo della mesh, è possibile ottenere una rappresentazione dettagliata e accurata del dominio fluido, essenziale per analisi CFD affidabili e precise.

### **3.2.6 Condizioni al contorno**

Le condizioni al contorno rappresentano un elemento cruciale per la corretta impostazione delle simulazioni, in particolare quando si utilizzano software di fluidodinamica computazionale (CFD) come STAR-CCM+. La loro definizione precisa è fondamentale per garantire la validità e l'accuratezza dei risultati ottenuti. In questo capitolo, verranno illustrate le condizioni al contorno adottate per le simulazioni relative a un veicolo da competizione Formula SAE.

Per le simulazioni iniziali, la velocità di riferimento è stata impostata a 16 m/s (circa 60 km/h), una velocità rappresentativa delle prove di autocross e di endurance. Tuttavia, questa velocità non è stata mantenuta costante per tutte le simulazioni, poiché diverse fasi operative del veicolo richiedono condizioni specifiche per rappresentare con fedeltà la realtà. Ad esempio, durante la fase iniziale della prova di accelerazione, la velocità del veicolo è notevolmente inferiore rispetto a quella raggiunta in fase di crociera o durante la frenata in fondo a un rettilineo.

Le condizioni al contorno per le superfici esterne del dominio fluido sono state definite in modo da riprodurre accuratamente l'interazione tra il flusso d'aria e il veicolo. Per le superfici di ingresso (inlet) del dominio, è stata impostata una condizione di velocità costante pari a quella di riferimento per ciascuna simulazione specifica. Le superfici di uscita (outlet) sono state invece definite con una condizione di pressione ambiente, in modo da permettere al fluido di uscire liberamente dal dominio senza influenzare le condizioni interne.

Le pareti laterali e superiori del dominio sono state trattate come superfici di simmetria, assumendo che il flusso sia parallelo e non influenzato da effetti esterni. Questa assunzione semplifica il modello, riducendo il carico computazionale senza compromettere significativamente l'accuratezza dei risultati per le condizioni considerate.

Per le superfici della vettura all'interno del dominio fluido, le condizioni al contorno sono state impostate considerando l'interazione diretta tra il flusso e le diverse parti del veicolo.



Le superfici esterne del corpo vettura, come il cofano, le fiancate e l'alettone, sono state trattate come superfici no-slip, implicando che la velocità del fluido in contatto con queste superfici è zero rispetto alla vettura stessa. Questo riflette il comportamento fisico reale, dove l'aria aderisce alla superficie del veicolo, influenzando i coefficienti di resistenza e di portanza.

Per le ruote del veicolo, le condizioni al contorno sono state definite in modo da tener conto della loro rotazione. La modellazione delle ruote rotanti è essenziale per ottenere una simulazione accurata del flusso d'aria intorno alla vettura, in quanto le ruote contribuiscono in modo significativo alla generazione di vortici e turbolenze. In STAR-CCM+, questa condizione viene implementata utilizzando un riferimento rotante per le superfici delle ruote, sincronizzato con la velocità di traslazione del veicolo.

### **3.2.7 Impostazioni della fisica**

Per la configurazione del modello fisico delle simulazioni, è stato necessario fare riferimento alle impostazioni raccomandate dai tutorial di STAR-CCM+ che presentavano le maggiori analogie con le condizioni di simulazione del nostro caso di studio. Le ipotesi di base adottate sono state le seguenti:

- Modello stazionario.
- Moto del fluido turbolento descritto tramite il modello "K-Omega turbulence", con il trattamento "All y+ Wall".
- Grandezze fisiche costanti, permettendo l'uso del solutore basato sulle equazioni di Navier-Stokes mediate.

Un aspetto cruciale nella configurazione del modello di turbolenza è rappresentato dalla scelta del modello K-Omega. Questo modello non richiede correzioni nello strato limite, riuscendo a rappresentare adeguatamente flussi con gradiente di pressione avverso e in transizione. È applicabile anche a flussi separati e con ricircolo senza necessitare di modifiche al modello base. Tuttavia, presenta alcune limitazioni, come la difficoltà nel simulare l'interazione tra onde d'urto e lo strato limite, oltre a comportarsi in modo meno accurato su superfici curve. Il modello K-Omega cerca di prevedere la turbolenza attraverso due equazioni differenziali alle derivate parziali per le variabili  $k$  e  $\omega$ . La variabile  $k$  rappresenta l'energia cinetica turbolenta, mentre  $\omega$  è la velocità specifica di dissipazione.

Per quanto riguarda le equazioni di Navier-Stokes mediate (RANS, Reynolds Averaged Navier-Stokes equations), queste sono una versione mediata delle equazioni di Navier-Stokes. Le grandezze coinvolte non sono più istantanee ma mediate su un periodo di tempo. Questo periodo deve essere sufficientemente piccolo rispetto ai fenomeni di interesse ma grande abbastanza da smorzare le fluttuazioni turbolente. Per molte applicazioni pratiche, la conoscenza delle grandezze medie è sufficiente per risolvere il problema, poiché questo approccio consente di ridurre significativamente i tempi di calcolo. Le scale del moto medio sono infatti molto più grandi di quelle delle fluttuazioni turbolente, permettendo una simulazione più efficiente. Un flusso turbolento può essere visto come la sovrapposizione di un moto medio e di fluttuazioni temporali.

Le impostazioni selezionate nel software STAR-CCM+ per descrivere la fisica del problema sono state accuratamente scelte per garantire una simulazione precisa e attendibile. Utilizzando il modello stazionario con turbolenza K-Omega e grandezze fisiche costanti, abbiamo potuto ottenere risultati significativi in tempi di calcolo ridotti. La Figura 3.19 illustra le configurazioni specifiche utilizzate, evidenziando come queste impostazioni siano state implementate nel contesto della simulazione. Questo approccio ha permesso di risolvere con efficacia le complessità del problema, garantendo al contempo un buon compromesso tra accuratezza e tempo di calcolo.

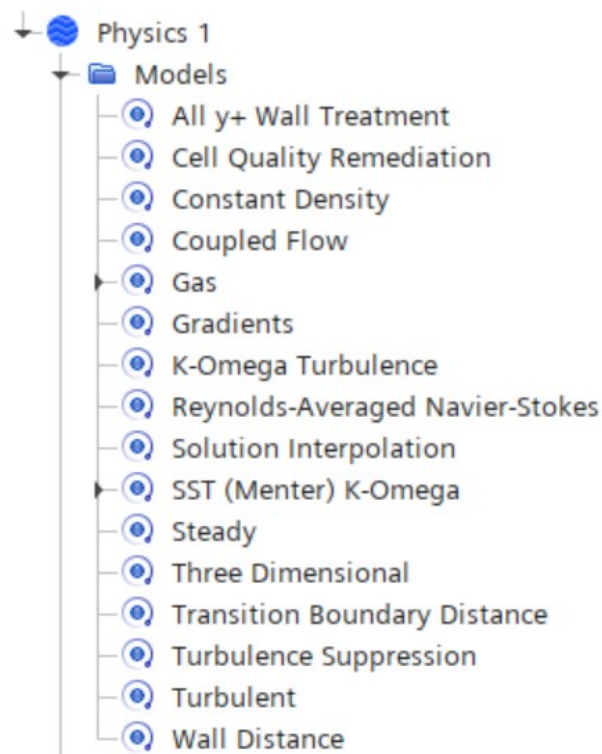


Figura 3.19 - Configurazioni della fisica in STAR-CCM+



### 3.2.8 Analisi Convergenza

Per valutare la qualità e l'affidabilità dei risultati di una simulazione fluidodinamica, è essenziale effettuare un'analisi approfondita della convergenza. Questo processo permette di comprendere se le soluzioni numeriche ottenute sono stabili e rappresentano accuratamente il fenomeno fisico simulato. In questo contesto, i residui giocano un ruolo cruciale.



Figura 3.20 - Andamento dei residui

I residui rappresentano la differenza normalizzata tra i valori delle variabili di interesse in due iterazioni successive del calcolo numerico. In STAR-CCM+, il monitoraggio dei residui è uno strumento fondamentale per l'analisi della convergenza. Un residuo basso indica che le variazioni tra iterazioni consecutive sono minime, suggerendo che il sistema sta raggiungendo una soluzione stabile. Tipicamente, si considera che una simulazione abbia raggiunto la convergenza quando i residui si riducono a un valore molto basso, dell'ordine della seconda cifra decimale. Questo significa che le variazioni tra una iterazione e la successiva sono trascurabili, e che la soluzione numerica si sta stabilizzando. Inoltre, si ha che le varie linee che si hanno nel grafico si possono trovare nella figura 3.20 rappresentano rispettivamente:

- Continuity: Questa linea rappresenta il residuo dell'equazione di continuità, che è un principio di conservazione della massa. Un basso residuo di continuità indica che il flusso di massa è bilanciato attraverso il dominio di calcolo, segnalando che la simulazione sta rispettando la conservazione della massa;

- Sdr (Specific Dissipation Rate): Questa linea rappresenta il residuo dell'equazione del tasso di dissipazione specifica dell'energia turbolenta. Il tasso di dissipazione è una misura della quantità di energia cinetica turbolenta convertita in calore per unità di tempo. Un residuo basso per questa variabile suggerisce che l'energia turbolenta viene correttamente dissipata, contribuendo alla stabilità del modello turbolento;
- Tke (Turbulent Kinetic Energy): Questa linea rappresenta il residuo dell'energia cinetica turbolenta. L'energia cinetica turbolenta è l'energia associata al moto caotico dei fluidi turbolenti. Un basso residuo per questa variabile indica che la distribuzione dell'energia turbolenta nel dominio di calcolo è stabile e accurata;
- X-Momentum, Y-Momentum, Z-Momentum: Queste linee rappresentano i residui delle equazioni di quantità di moto nelle direzioni X, Y e Z rispettivamente. La quantità di moto è una misura della massa in movimento e le equazioni della quantità di moto descrivono come questa massa si muove attraverso il dominio di calcolo. Un basso residuo per ciascuna di queste componenti indica che le forze e i flussi di velocità nelle rispettive direzioni sono stabili e accuratamente bilanciati.

Oltre ai residui, anche i risultati dei report (Figura 3.21) definiti in precedenza devono essere monitorati. Questi report possono includere variabili di interesse specifiche come velocità, pressione, o coefficiente di resistenza aerodinamica. Se i valori ottenuti da questi report tendono a un valore costante senza oscillare significativamente, si può concludere che i risultati della simulazione sono attendibili.

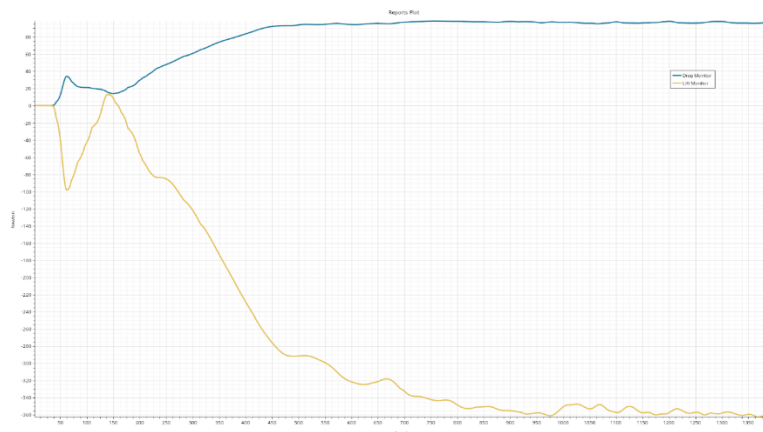


Figura 3.21 - Andamento del drag e del Lift della macchina

### 3.2.9 Visualizzazione dei risultati

Una volta terminata la simulazione, si procede con l'analisi delle singole componenti del veicolo. Ad esempio, per il fondo del veicolo, è possibile creare un report di forza che si concentra esclusivamente su questa superficie. Questo report fornirà informazioni dettagliate sulla resistenza e sulla portanza generate dal fondo, che sono essenziali per comprendere come questa parte contribuisce all'aerodinamica complessiva del veicolo. Analogamente, report separati devono essere creati per l'ala anteriore e posteriore, permettendo di isolare e analizzare le forze generate da ciascuna di queste componenti.

Per visualizzare i risultati, STAR-CCM+ offre diversi strumenti grafici. I grafici di andamento temporale delle forze e dei coefficienti aerodinamici sono utili per verificare la convergenza della simulazione e per identificare eventuali fenomeni transitori. Le mappe di pressione e di velocità sulle superfici del veicolo consentono di individuare zone critiche dove si verificano separazioni del flusso o elevate pressioni dinamiche. Inoltre, è possibile generare streamline e vettori di velocità nel campo fluido circostante il veicolo, che offrono una rappresentazione visiva del comportamento del flusso e delle interazioni tra le diverse componenti del veicolo.

# Capitolo 4

## Diffusori, modifiche e miglioramenti

### 4.1 Vincoli regolamentari

La progettazione di un diffusore per una vettura da competizione di Formula SAE è un processo complesso che deve tenere conto di una serie di vincoli regolamentari rigorosi stabiliti dall'organizzazione della competizione. Il regolamento della Formula SAE 2024 fornisce dettagli precisi riguardo le dimensioni, la sicurezza e le caratteristiche tecniche che ogni squadra deve rispettare nella progettazione del diffusore, al fine di garantire la sicurezza, l'equità e la competizione leale tra tutte le squadre partecipanti.

In primo luogo, è essenziale considerare le dimensioni massime consentite per il diffusore. Il regolamento specifica che il diffusore deve rientrare all'interno di un volume definito dalla silhouette laterale della vettura, senza sporgere oltre la sagoma del veicolo stesso. Questo implica che il diffusore deve essere progettato in modo tale da seguire la conformazione della parte posteriore della vettura, assicurando che non vi siano parti che si estendano oltre i limiti definiti. Le dimensioni precise da rispettare sono: la larghezza massima del veicolo, che è di 1400 mm, non devono sporgere i dispositivi aerodinamici nella parte posteriore più di 250 mm dalla ruota, inoltre non devono occupare la zona dietro la ruota per 75 mm e non devono superare l'altezza minima da terra stabilita dal regolamento di 30 mm.

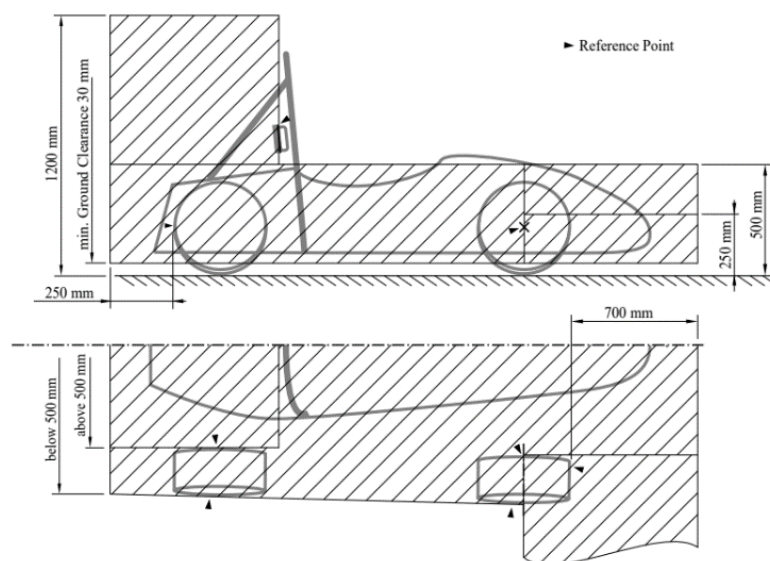


Figura 4.1 - Dimensioni massime e posizionamento dei dispositivi aerodinamici

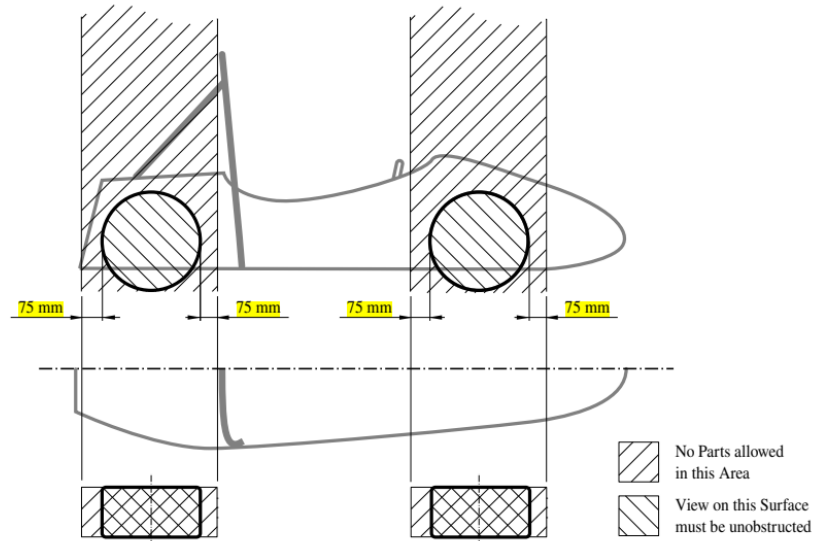


Figura 4.2 - Dimensioni massime e posizionamento dei dispositivi aerodinamici rispetto gli pneumatici

Un altro aspetto cruciale è il rispetto delle norme di sicurezza. Il diffusore deve essere progettato per non compromettere la sicurezza del pilota in caso di collisione o ribaltamento. Questo significa che tutte le superfici e i bordi del diffusore devono essere privi di spigoli vivi o parti taglienti che potrebbero rappresentare un pericolo. Inoltre, il diffusore deve essere solidamente fissato al telaio del veicolo per evitare che si stacchi durante la competizione, causando incidenti o danni ad altre vetture.

## 4.2 Prima configurazione di diffusore

Come prima configurazione di diffusore, è stata presa in considerazione l'installazione di un'ala collocata immediatamente dietro la scocca del veicolo.

### 4.2.1 Scelta del profilo alare

La scelta del profilo alare è stata effettuata tenendo ben presente l'obiettivo principale di questo studio che è quello di sviluppare un diffusore per la futura vettura del 2026 del Polimarche Racing Team, con l'intento di ottenere una notevole downforce.

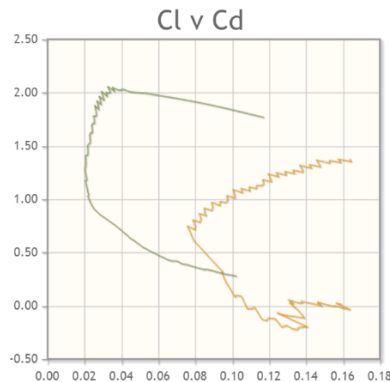


Figura 4.3 - Grafico col confronto tra coefficiente di portanza e di resistenza del NACA CH10

Per raggiungere questo scopo, è stata eseguita una ricerca su [airfoiltools.com](http://airfoiltools.com) per selezionare un profilo alare che massimizzi il coefficiente di portanza ( $C_l$ ) e oltre a questo si è calcolato il numero di Reynolds (vedi capitolo 2.3.2) pari a circa 145,738 per una densità dell'aria che per  $25^\circ$  vale  $1,1845 \text{ kg/m}^3$ , per una velocità del flusso che vale 16 m/s, una corda pari a 0,168 m e una viscosità che vale  $1,8444 \times 10^{-5} \text{ Pa s}$  in modo tale da poter identificare nei grafici il coefficiente di portanza e di resistenza. Alla fine, si è giunti alla conclusione che il profilo naca migliore è il CH10.

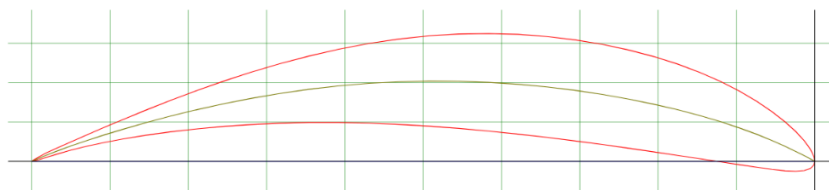


Figura 4.4 - Forma del profilo NACA CH10

## 4.2.2 Variazioni angolo d'attacco

Dopo aver scelto il profilo e realizzato il modello con NX, sono state eseguite diverse prove per identificare l'angolo d'attacco ottimale del profilo alare. L'analisi è iniziata con l'esame del grafico in Figura 4.5, che mette in relazione il coefficiente di portanza con l'angolo di stallo. Da questo grafico si deduce che il profilo alare scelto stalla a circa 13°. Tuttavia, poiché tale analisi non tiene conto della presenza di elementi come le ruote posteriori e la scocca, sono state effettuate ulteriori prove per eliminare ogni dubbio. Gli angoli analizzati tramite CFD sono stati 5.785°, 10°, 12° e 15°.

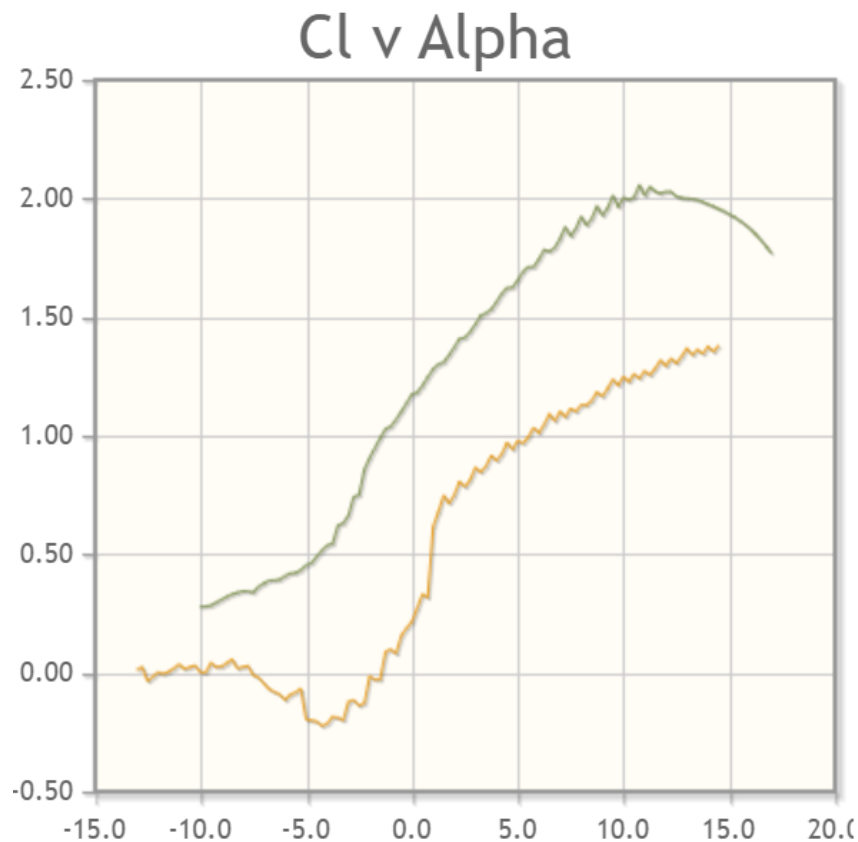


Figura 4.5 - Grafico del profilo CH10 che relaziona il coefficiente di portanza con l'angolo di stallo

Una volta ottenuti i risultati delle simulazioni, si è proceduto con un'analisi dettagliata. In primo luogo, sono stati analizzati i grafici dei coefficienti di pressione di ogni simulazione in tre zone differenti del diffusore, rispettivamente a 0,1 m, a 0,3 m e a 0,72 m. Dall'analisi dei grafici (da figura 4.6 a 4.9) è emerso che nella zona a 0,1 m il diffusore con l'angolo d'attacco migliore è quello a 10°, in quanto presenta un coefficiente di pressione minimo pari a -0,95, rispetto ai circa -0,85 dell'angolo a 5.875°, ai circa -0,91 dell'angolo a 12° e ai -0,86 per l'angolo a 15°.

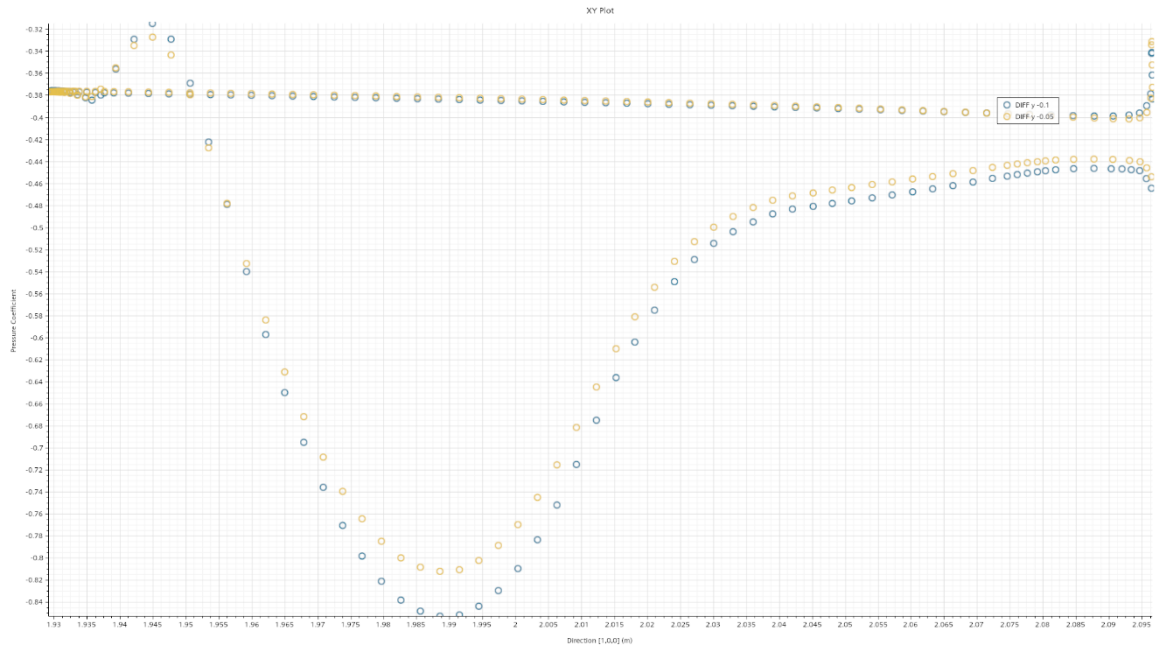


Figura 4.6 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m con angolo di attacco a  $5,875^\circ$

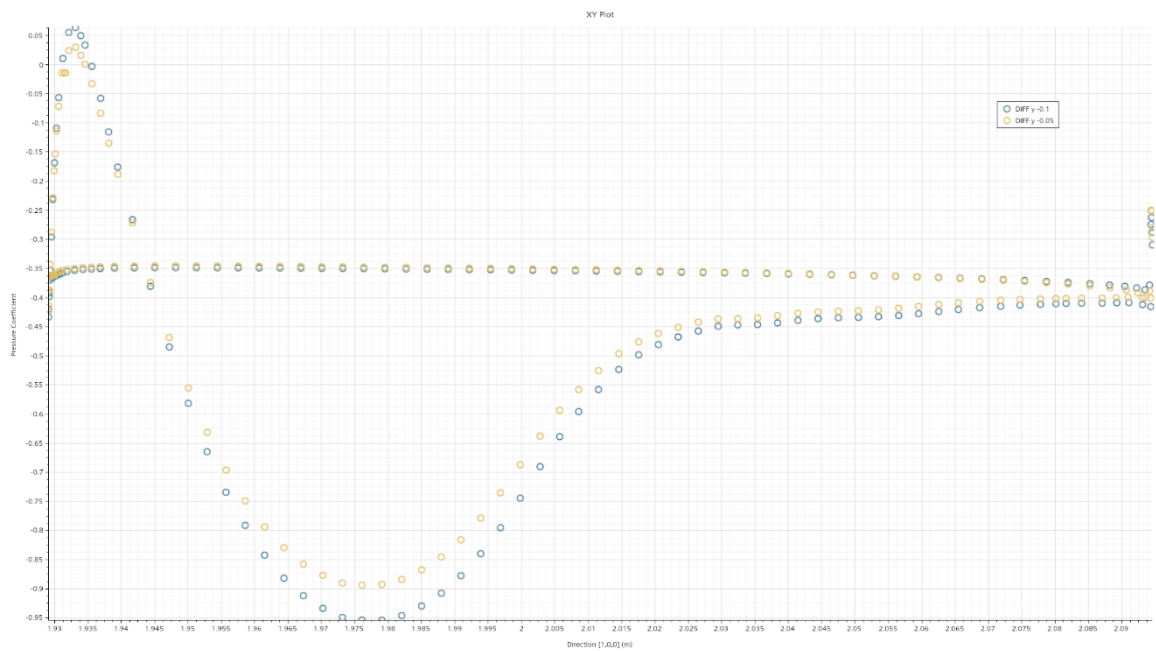


Figura 4.7 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m con angolo di attacco a  $10^\circ$



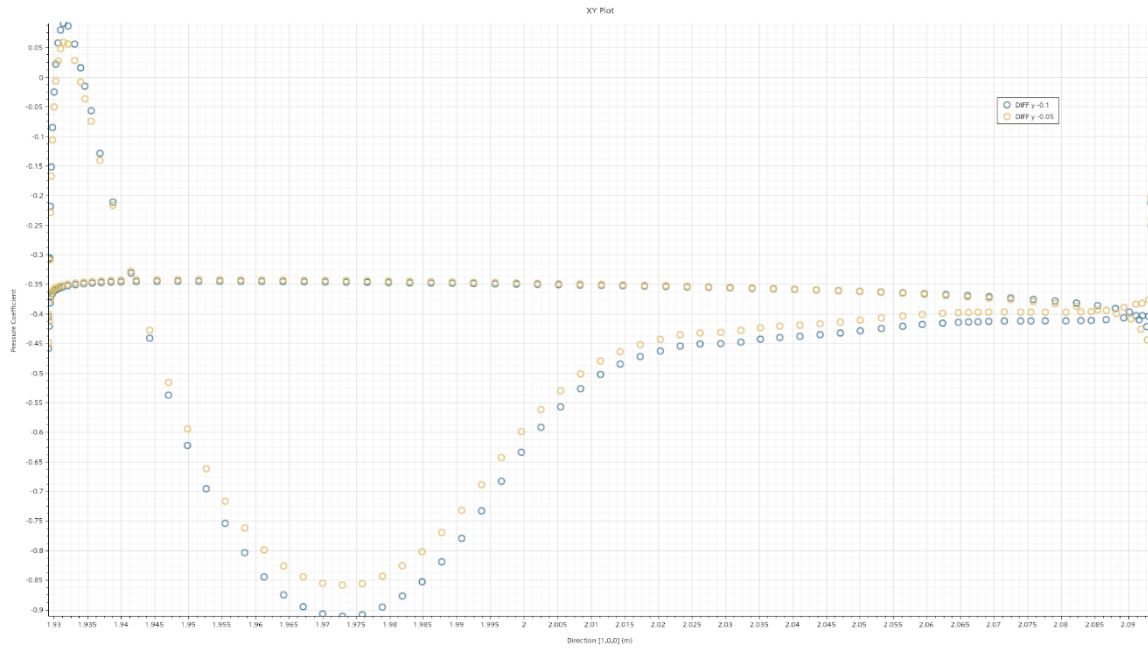


Figura 4.8 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m con angolo di attacco a 12°

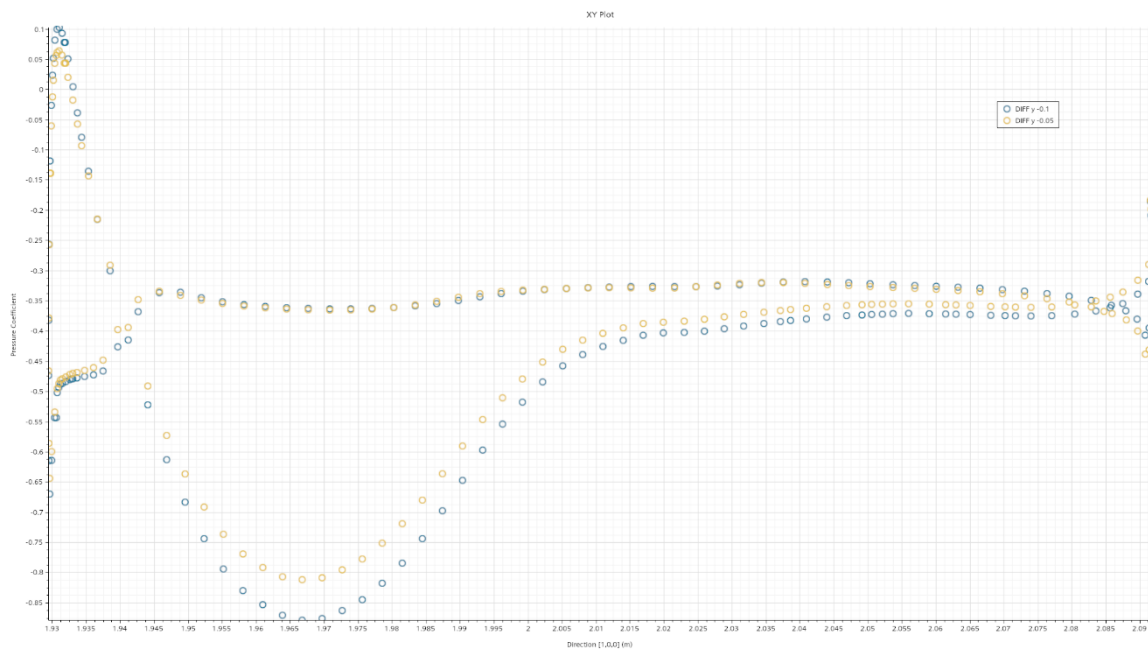


Figura 4.9 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m con angolo di attacco a 15°

Successivamente, sono stati analizzati i grafici dei  $C_p$  a 0,3 m (da figura 4.10 a 4.13). Da questi, si è dedotto che il coefficiente di pressione migliore, pari a -1,4, si ottiene per un angolo pari a 5.875°. Seguono gli angoli di 12° e 10° con un  $C_p$  di circa -1,35, e infine l'angolo di 15° con un  $C_p$  pari a -1,3.

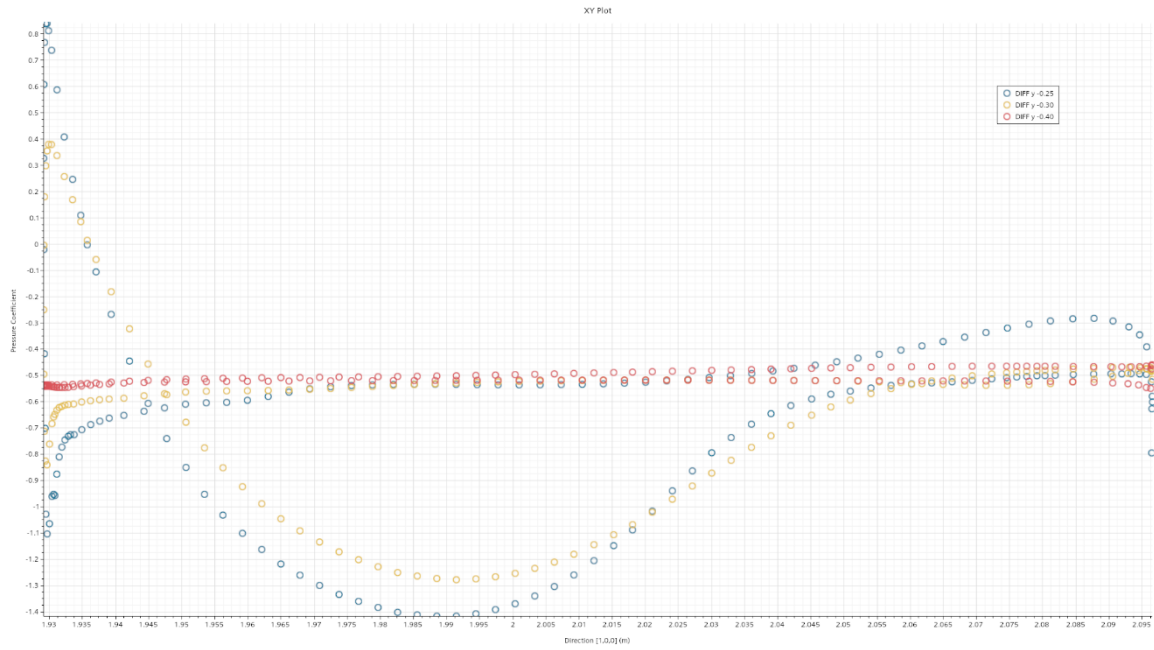


Figura 4.10 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,3 m con angolo di attacco a  $5,875^\circ$

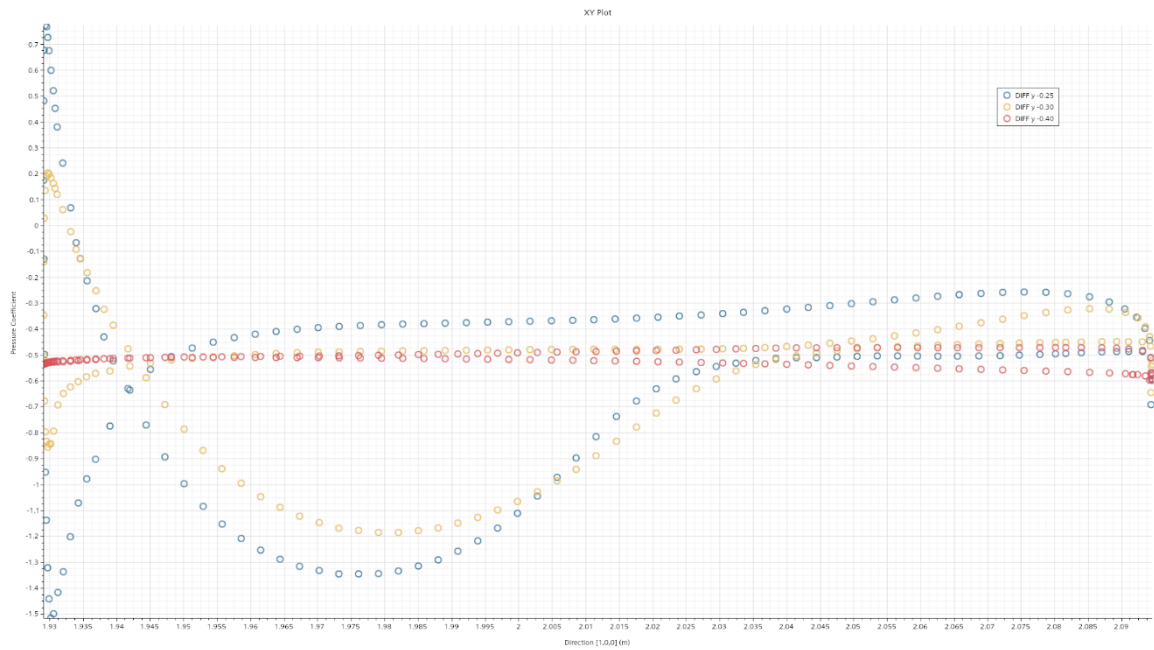


Figura 4.11 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,3 m con angolo di attacco a  $10^\circ$

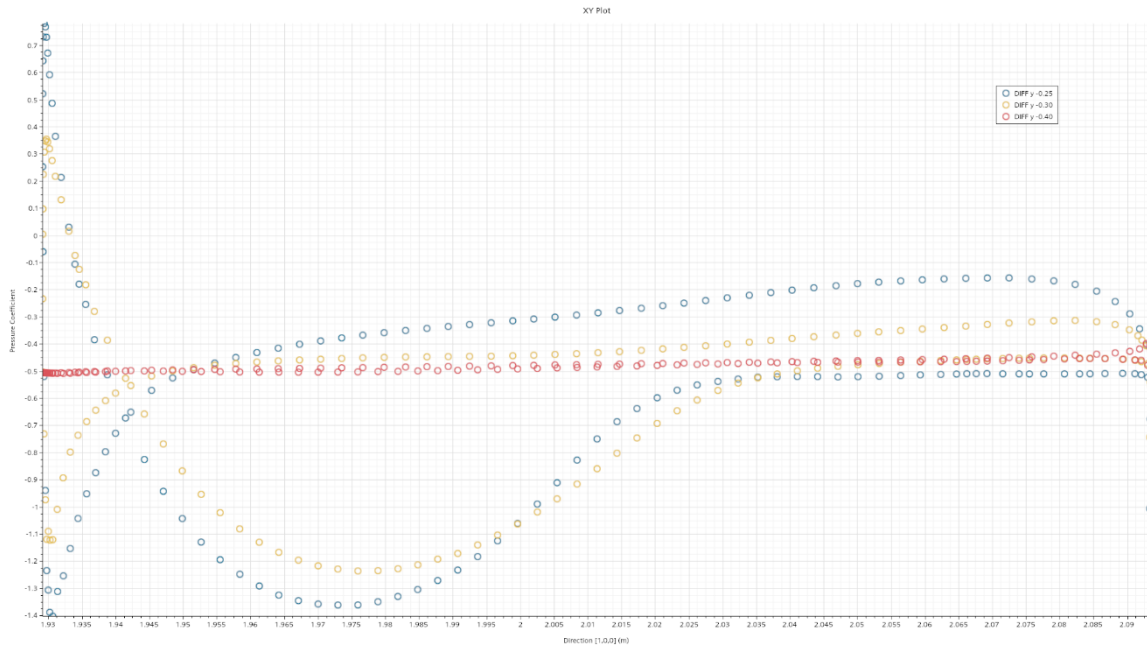


Figura 4.12 - Grafico del coefficiente di pressione 0,3 m con angolo di attacco a 12°

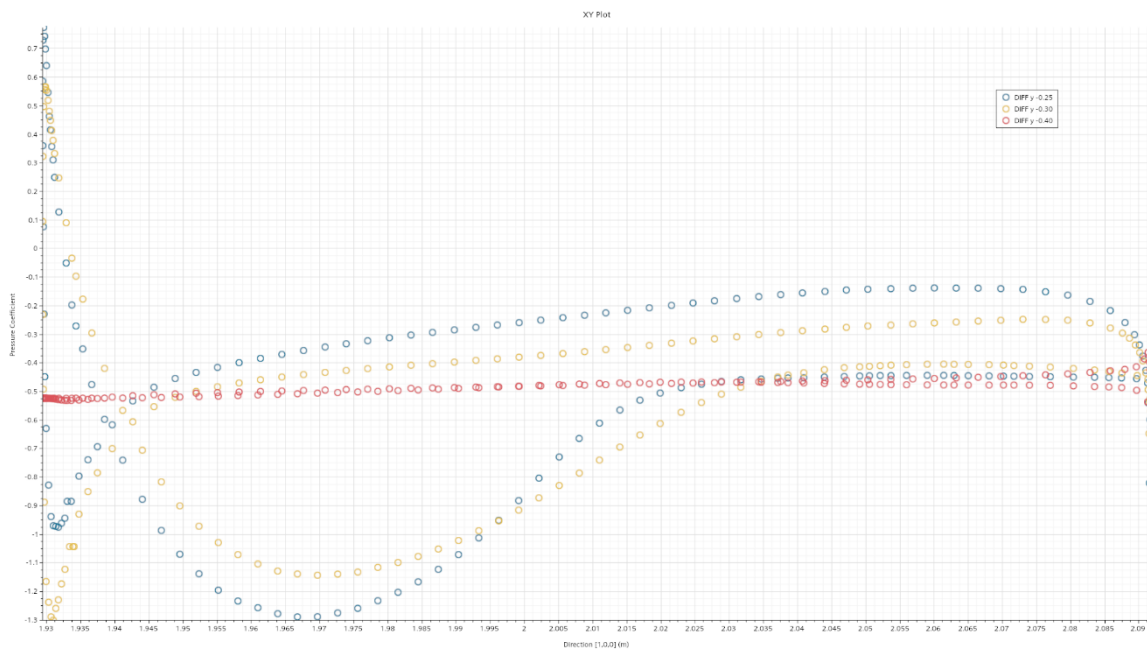


Figura 4.13 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,3 m con angolo di attacco a 15°

Infine, dal confronto dei grafici dei coefficienti di pressione a 0,72 m (figura 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17), risulta che il coefficiente di pressione migliore, pari a -1,5, si ottiene per l'angolo di 15°. Seguono il coefficiente di pressione pari a circa -1,4 per gli angoli di 12° e 5.875°, e infine il valore di -0,76 per l'angolo a 10°. Da questi coefficienti di pressione si deduce che il miglior angolo d'attacco è quello di 10°.

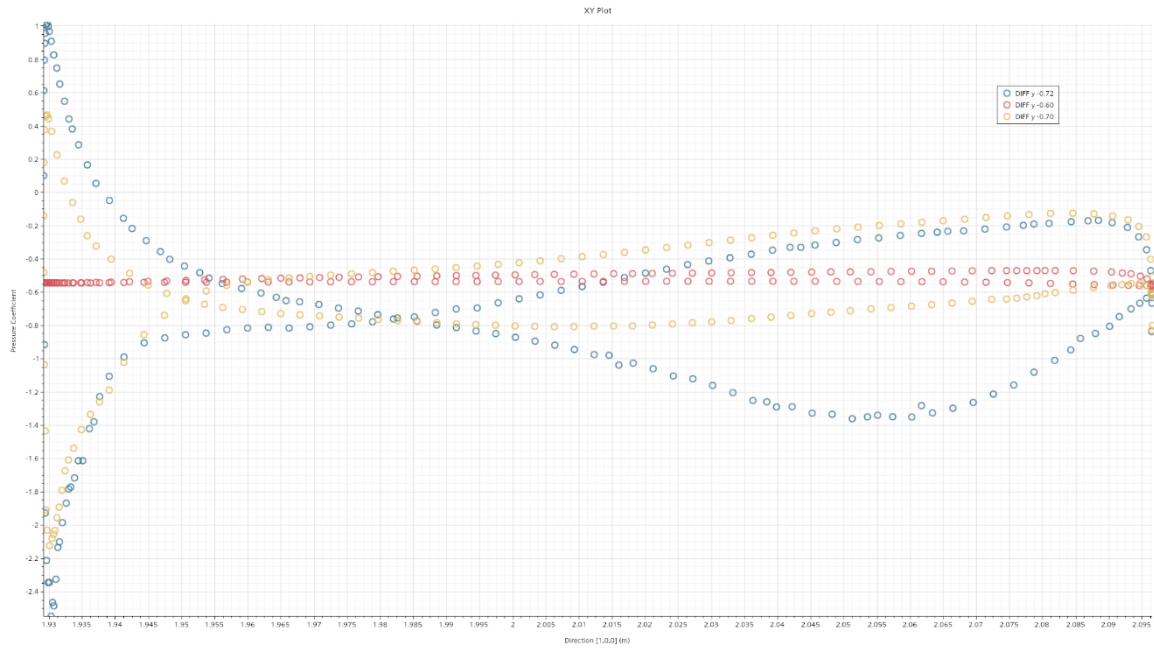


Figura 4.14 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m con angolo di attacco a 5,875°

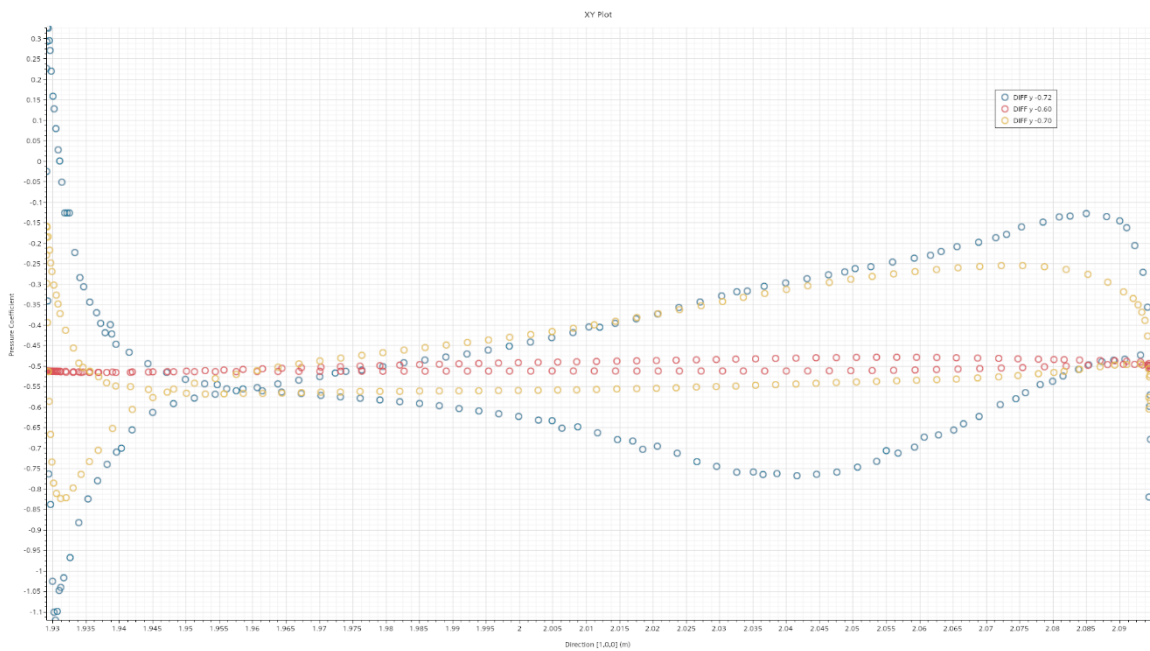


Figura 4.15 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m con angolo di attacco a 10°

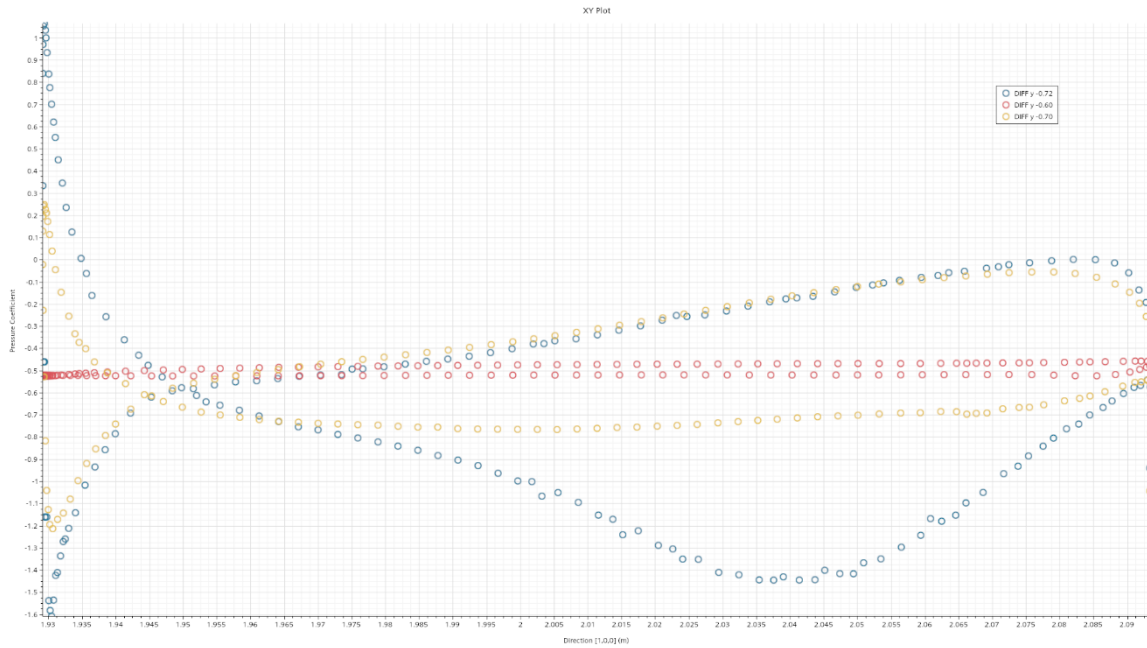


Figura 4.16 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m con angolo di attacco a  $12^\circ$

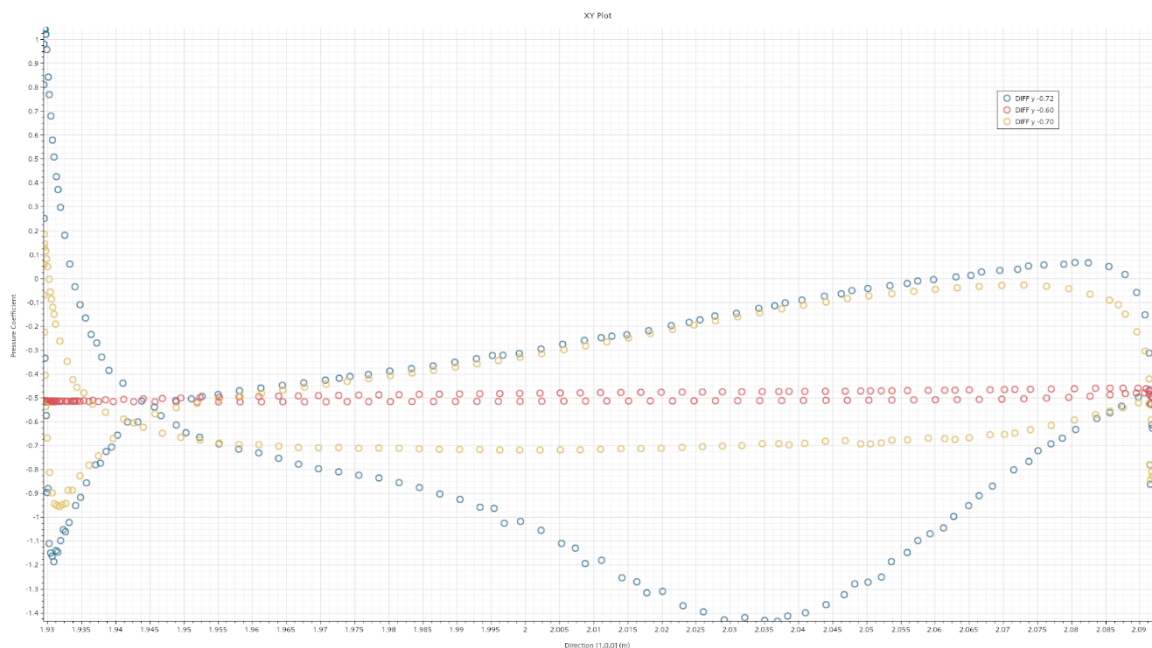


Figura 4.17 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m con angolo di attacco a  $15^\circ$

Successivamente, è stato effettuato il confronto delle pressioni sviluppate sia sulla parte superiore che su quella inferiore del diffusore. Dall'analisi delle pressioni nella parte superiore del diffusore (figura 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21), è emerso che il diffusore che lavora meglio è quello con l'angolo d'attacco a  $15^\circ$ , poiché presenta delle zone di alta pressione molto più estese rispetto agli altri angoli di attacco. Seguono in ordine gli angoli di  $12^\circ$ ,  $10^\circ$  e  $5.785^\circ$ , questi ultimi due a pari merito.

Simcenter STAR-CCM+

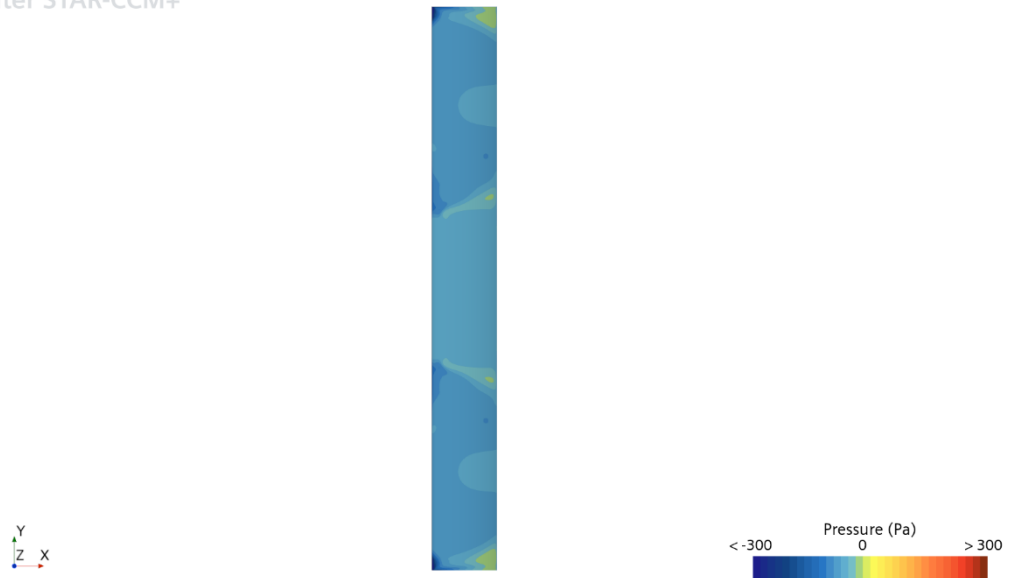


Figura 4.18 - Pressioni nella parte superiore del diffusore con angolo di attacco a  $5.785^\circ$

Simcenter STAR-CCM+

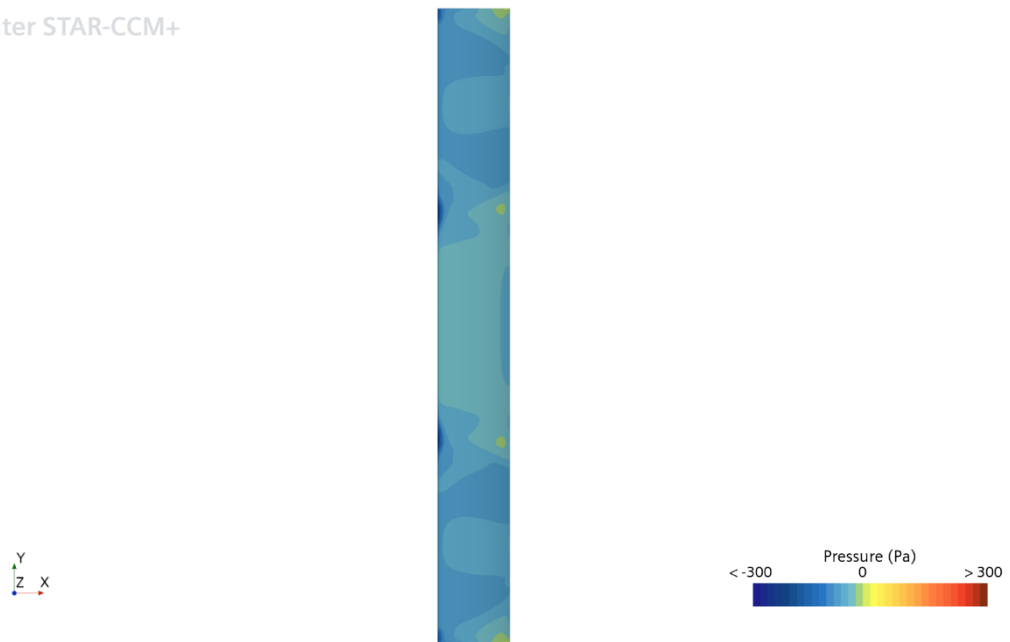


Figura 4.19 - Pressioni nella parte superiore del diffusore con angolo di attacco a  $10^\circ$

Simcenter STAR-CCM+

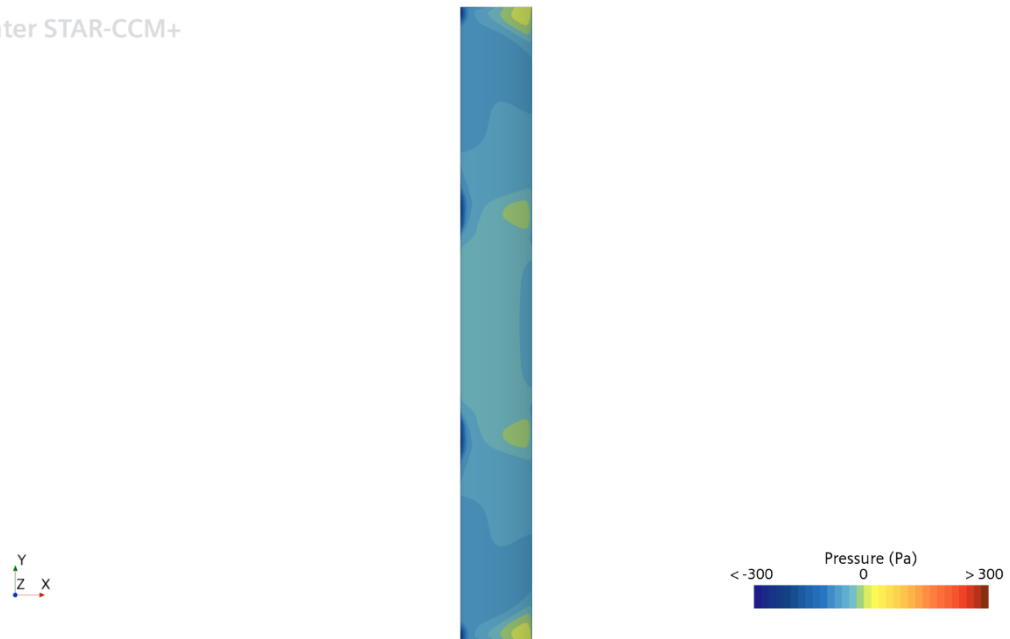


Figura 4.20 - Pressioni nella parte superiore del diffusore con angolo di attacco a  $12^\circ$

Simcenter STAR-CCM+

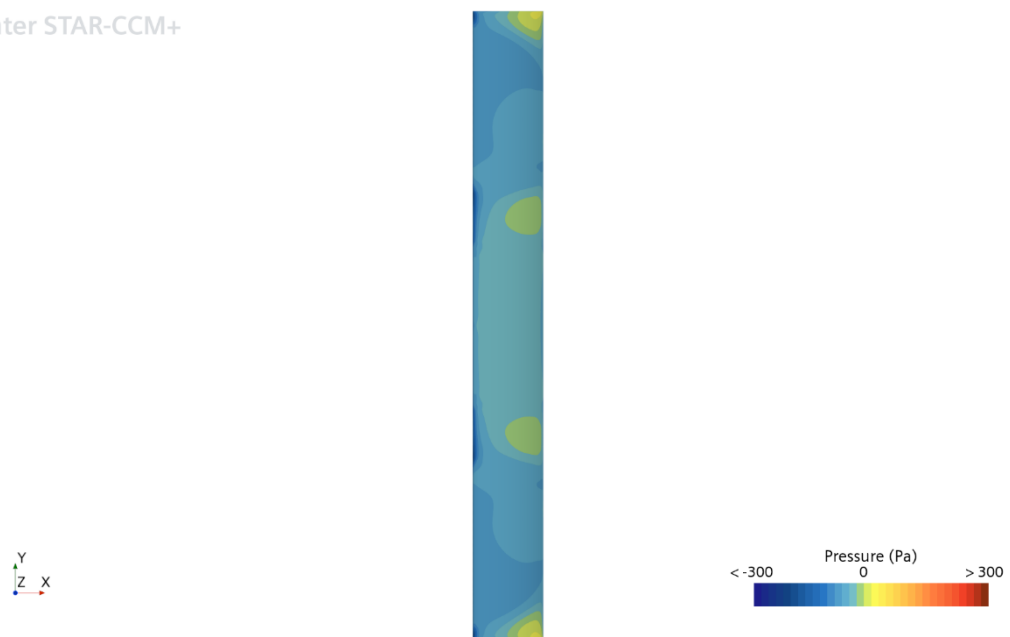


Figura 4.21 - Pressioni nella parte superiore del diffusore con angolo di attacco a  $15^\circ$

Analizzando le pressioni nella parte inferiore del diffusore (figura 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25), si nota che la parte centrale del diffusore lavora abbastanza bene in tutte le prove, con un'estensione maggiore per l'angolo di  $10^\circ$ . Seguono gli angoli di  $12^\circ$ ,  $15^\circ$  e  $5.785^\circ$ . Inoltre, si osserva che in tutte le configurazioni le parti esterne lavorano meno efficientemente.

Simcenter STAR-CCM+

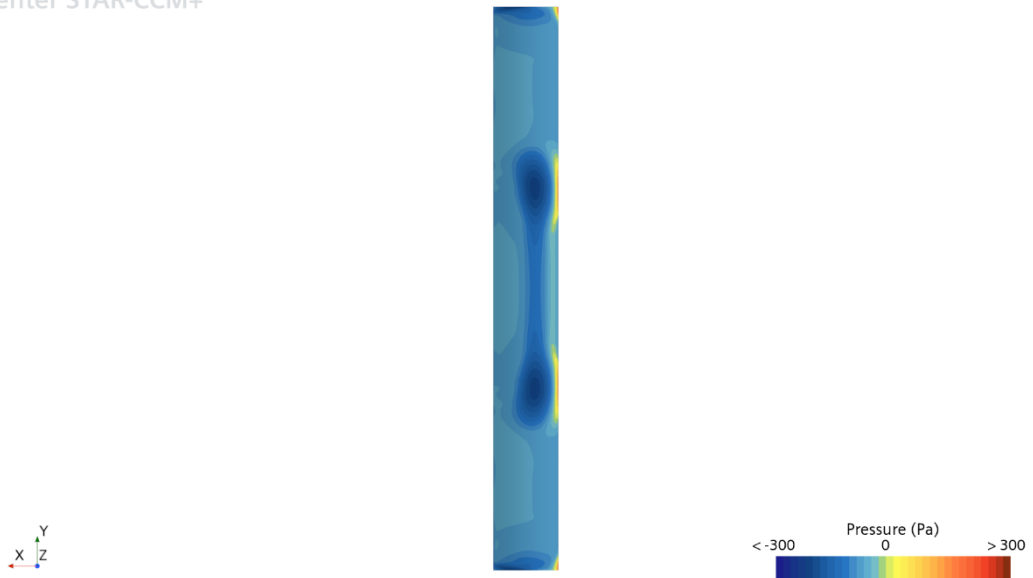


Figura 4.22 - Pressioni nella parte inferiore del diffusore con angolo di attacco a  $5.785^\circ$

Simcenter STAR-CCM+

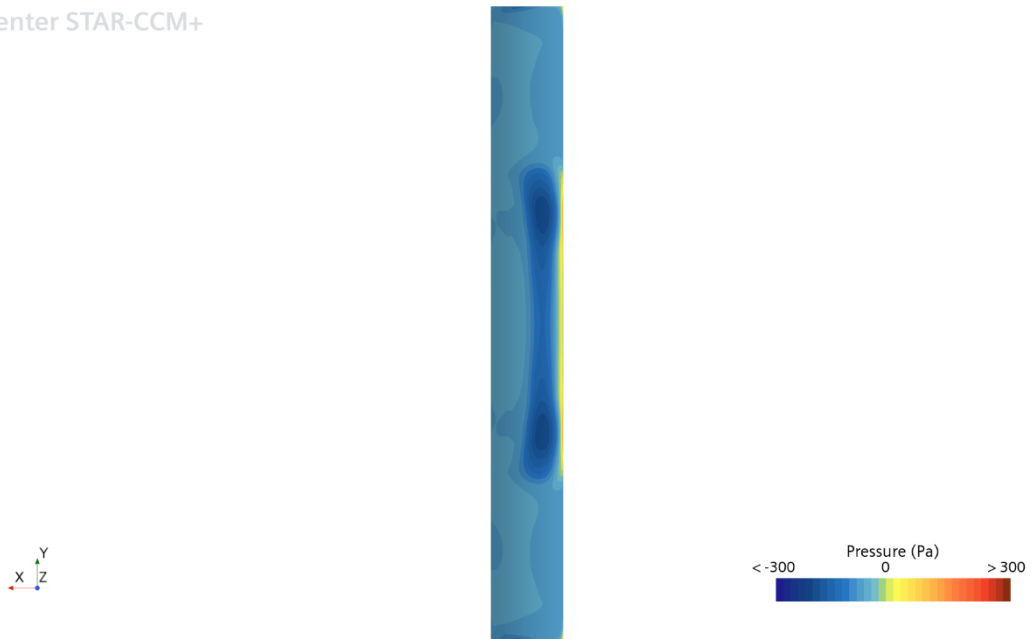


Figura 4.23 - Pressioni nella parte inferiore del diffusore con angolo di attacco a  $10^\circ$



Simcenter STAR-CCM+

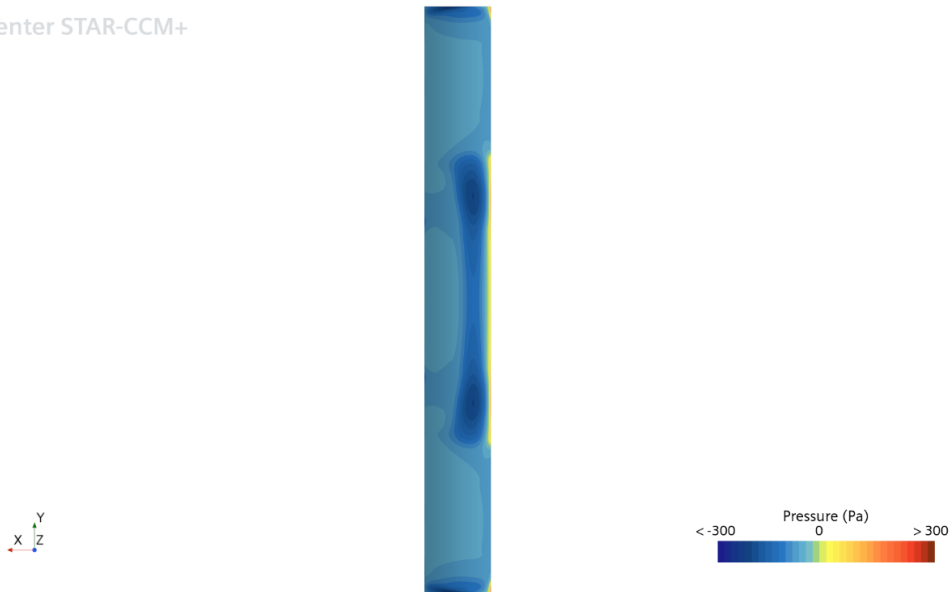


Figura 4.24 - Pressioni nella parte inferiore del diffusore con angolo di attacco a 12°

Simcenter STAR-CCM+

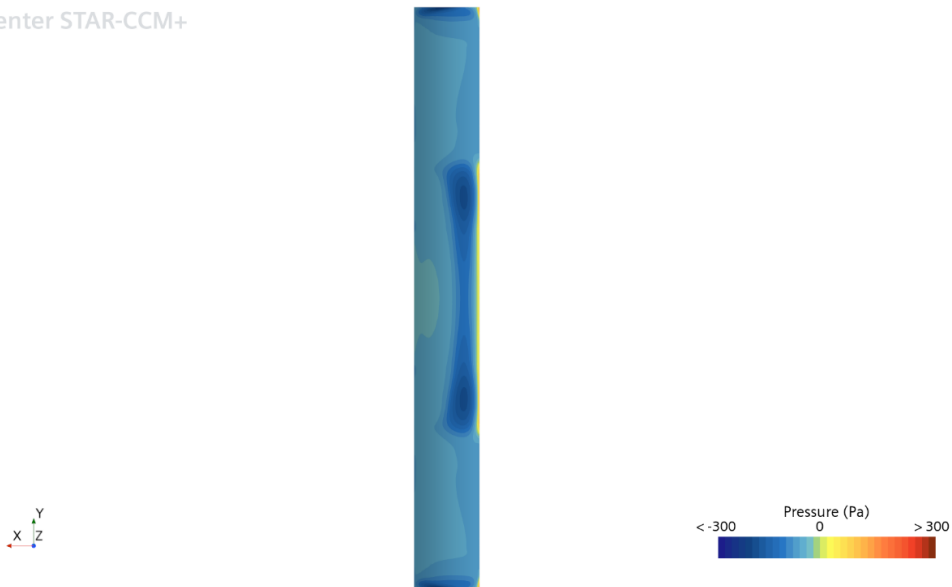


Figura 4.25 - Pressioni nella parte inferiore del diffusore con angolo di attacco a 15°

In conclusione, dalle analisi delle pressioni, si può affermare che l'angolo d'attacco migliore del diffusore è quello a 12°.

Dai reports nelle tabelle (tabella 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4) si nota come variano il drag e la downforce dei vari componenti, con l'ala anteriore, l'ala posteriore, il fondo e il diffusore, e le ground wing della macchina. È possibile osservare che l'angolo a 12° produce più downforce dal diffusore. Tuttavia, analizzando la downforce totale della macchina, il miglior risultato si ottiene con l'angolo a 15°.

Tabella 4.1 - Reports simulazione angolo d'attacco a 5,875°

ANGOLO 5,875°	DRAG	DOWNFORCE	CENTER OF LOADS
ALA ANTERIORE	15,022 N	-106,217 N	-0,663 m
GROUND WING	25,100 N	-107,704 N	0,771 m
FONDO E DIFFUSORE	0,690 N	-42,634 N	0,849 m
ALA POSTERIORE	32,465 N	-107,578 N	1,831 m
RUOTA ANTERIORE	3,159 N	1,271 N	
RUOTA POSTERIORE	-0,113 N	2,251 N	
MONOCOQUE	20,553 N	2,251 N	0,997 m
DIFFUSORE	0,428 N	-2,079 N	2,017 m
MACCHINA	96,877 N	-358,559 N	0,727 m

Tabella 4.2 - Reports simulazione angolo d'attacco a 10°

ANGOLO 10°	DRAG	DOWNFORCE	CENTER OF LOADS
ALA ANTERIORE	15,931 N	-114,868 N	-0,704 m
GROUND WING	24,871 N	-106,672 N	0,762 m
FONDO E DIFFUSORE	0,661 N	-41,993 N	0,860 m
ALA POSTERIORE	33,284 N	-108,558 N	1,832 m
RUOTA ANTERIORE	2,520 N	1,469 N	
RUOTA POSTERIORE	0,054 N	2,185 N	
MONOCOQUE	20,402 N	0,038 N	1,046 m
DIFFUSORE	0,398 N	-2,258 N	2,003 m
MACCHINA	97,724 N	-368,399 N	0,698 m

Tabella 4.3 - Reports simulazione angolo d'attacco a 12°

ANGOLO 12°	DRAG	DOWNFORCE	CENTER OF LOADS
ALA ANTERIORE	15,159 N	-107,327 N	-0,663 m
GROUND WING	23,911 N	-108,639 N	0,761 m
FONDO E DIFFUSORE	0,876 N	-42,608 N	0,857 m
ALA POSTERIORE	32,474 N	-108,232 N	1,830 m
RUOTA ANTERIORE	2,958 N	1,521 N	
RUOTA POSTERIORE	1,394 N	2,547 N	
MONOCOQUE	20,839 N	1,872 N	1,041 m
DIFFUSORE	0,608 N	-2,555 N	2,008 m
MACCHINA	97,611 N	-360,865 N	0,724 m

Tabella 4.4 - Reports simulazione angolo d'attacco a 15°

ANGOLO 15°	DRAG	DOWNFORCE	CENTER OF LOADS
ALA ANTERIORE	15,448 N	-110,155 N	-0,644 m
GROUND WING	24,567 N	-112,331 N	0,755 m
FONDO E DIFFUSORE	0,845 N	-43,500 N	0,856 m
ALA POSTERIORE	32,488 N	-109,107 N	1,829 m
RUOTA ANTERIORE	2,679 N	1,909 N	
RUOTA POSTERIORE	0,480 N	2,524 N	
MONOCOQUE	20,767 N	0,278 N	1,041 m
DIFFUSORE	0,577 N	-2,400 N	2,008 m
MACCHINA	97,275 N	-370,383 N	0,714 m

In conclusione, si deduce che l'angolo d'attacco migliore è quello di 10°. Pertanto, nelle prossime simulazioni si utilizzerà sempre un angolo d'attacco di 10°.

### 4.2.3 Miglioramenti del fondo

Attraverso la vorticità (figura 4.26) è stato osservato che, nonostante la presenza del tubolatore utilizzato per creare vortici che schermano il fondo, l'aria riesce comunque a entrare nel fondo, permettendo la formazione di un vortice che scherma la parte del diffusore compresa tra la scocca e la ruota.

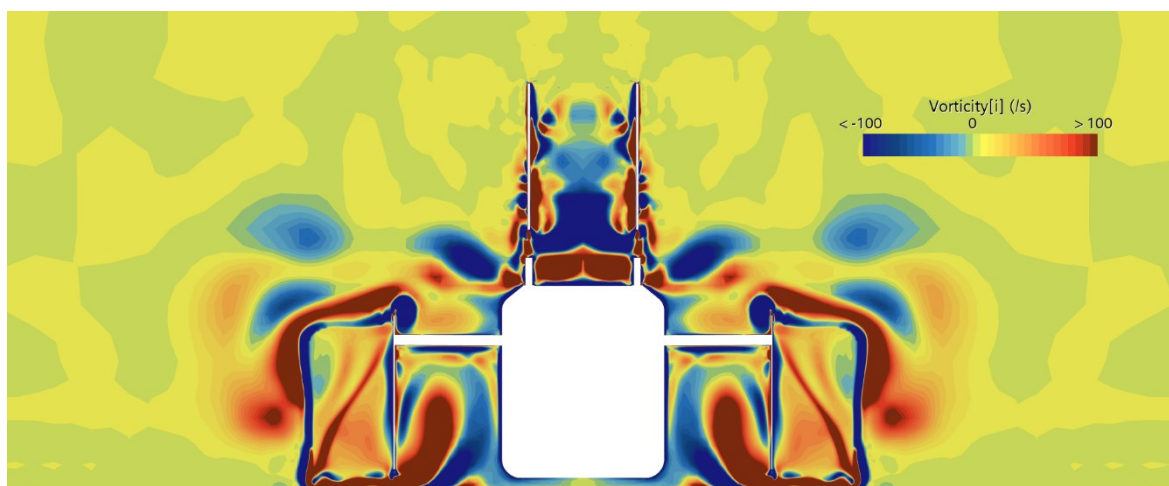


Figura 4.26 - Vorticità nella zona critica sotto il fondo nella simulazione con angolo a 10°

Per questo motivo si è proceduto alla ricerca di soluzioni per ridurre o eliminare tali vortici. Le idee proposte sono state le seguenti: creare uno strake verticale nel fondo, ovvero una lamina verticale spessa 3 mm, in modo tale da permettere al flusso d'aria di attaccarsi alla superficie e ridurre la formazione di vortici; creare uno strake verticale che arriva fino all'altezza minima da terra consentita dal regolamento; creare una lamina orizzontale con la superficie più bassa alla stessa altezza del fondo; cambiare il raccordo del footplate facendolo passare da 30 mm a 40 mm, in quanto un miglior raccordo può stabilizzare il flusso d'aria lungo questi bordi, riducendo la forza di taglio e, di conseguenza, l'intensità dei vortici. Nelle pagine successive, identificheremo la prima modifica come "strake", la seconda come "strake 2", la terza come "strake 3" e l'ultima come "footplate".

Una volta realizzato il pezzo col CAD e concluse le simulazioni, si è proceduto a confrontare i risultati con quelli ottenuti con un angolo d'attacco di 10°. Analizzando i coefficienti di

pressione nella zona di 0,1 m (da figura 4.27 a 4.30), si è potuto notare che le simulazioni migliorano tutte tranne quella con la lamina piana.

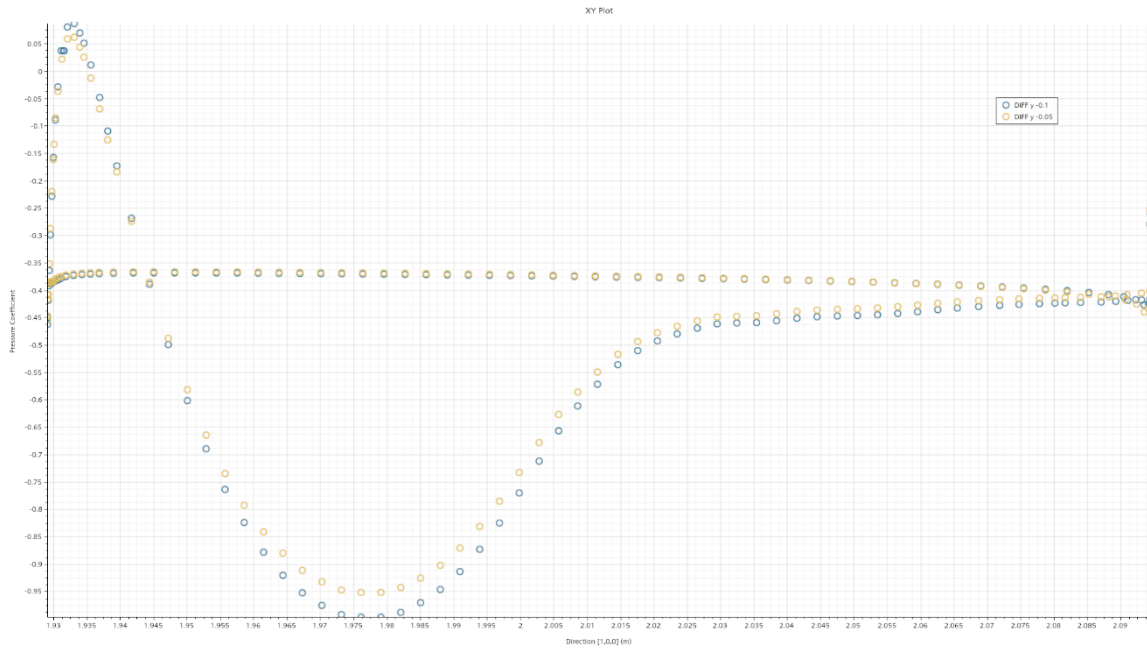


Figura 4.27 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m della simulazione con lo strake

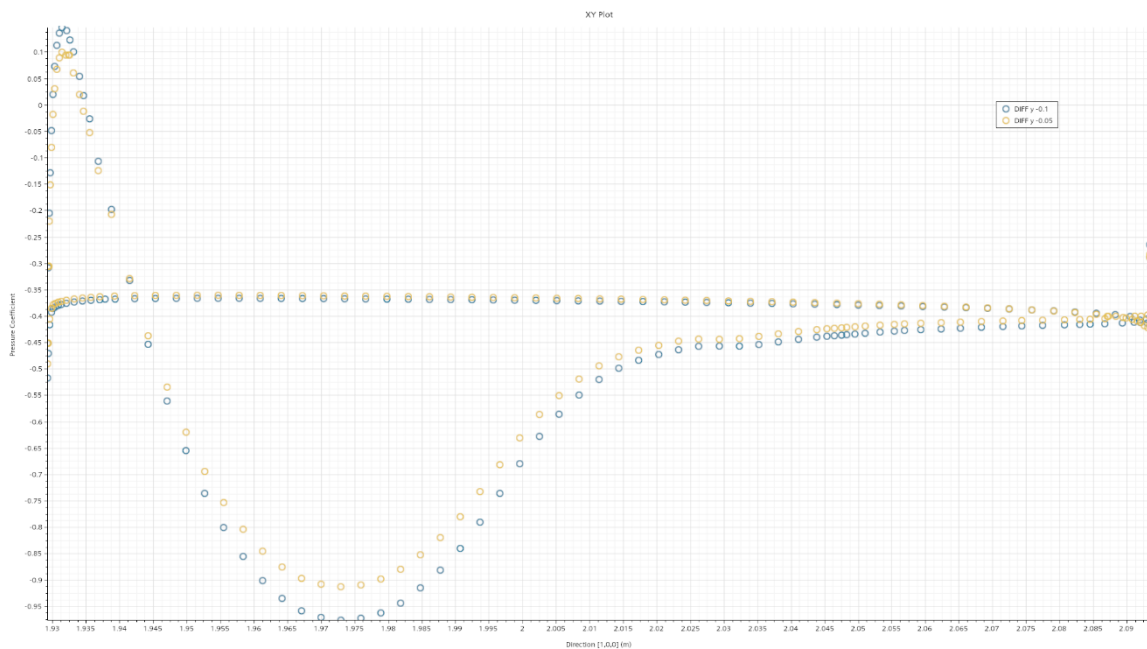


Figura 4.28 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m della simulazione con lo strake 2

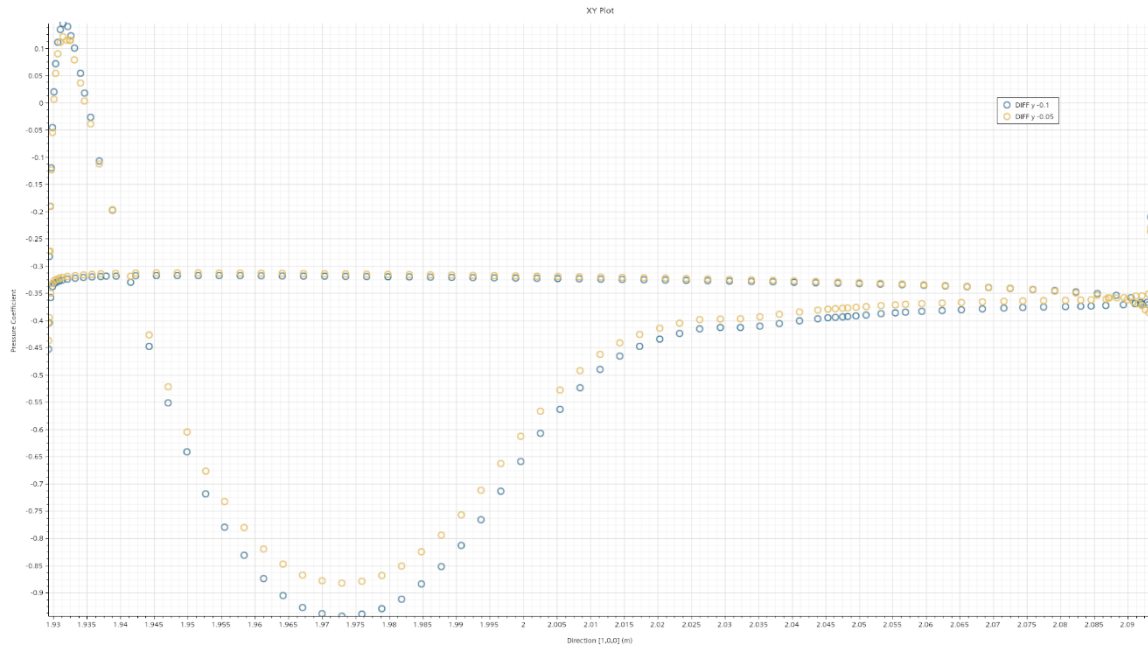


Figura 4.29 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m della simulazione con lo strake 3

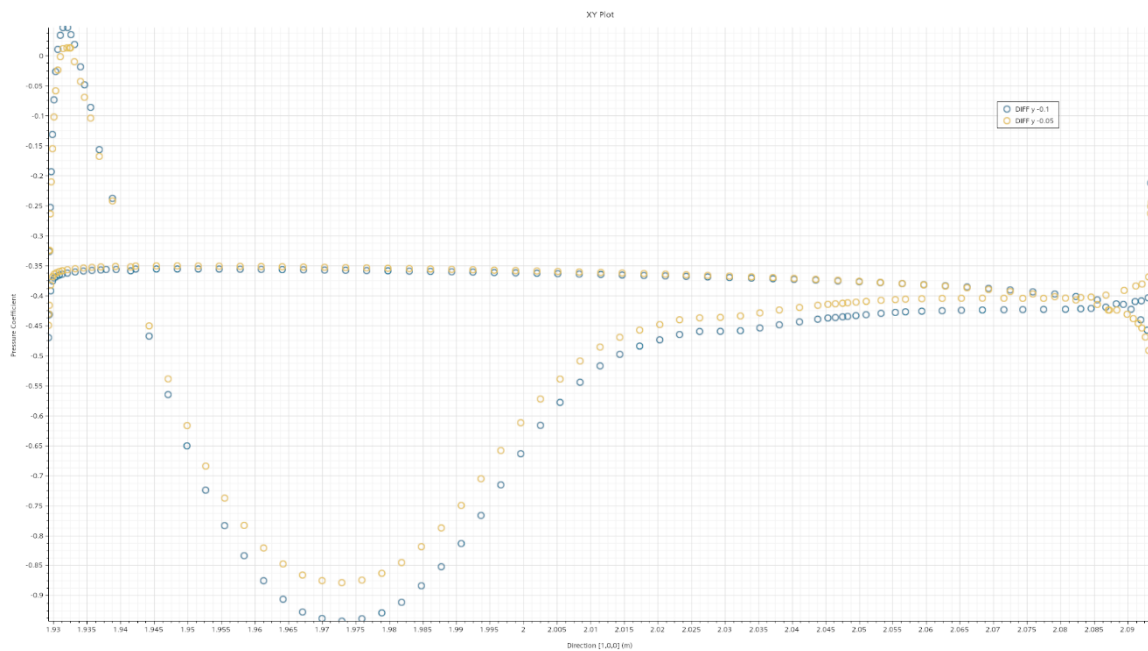


Figura 4.30 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m della simulazione con il footplate

Proseguendo con l'analisi nella zona di 0,3 m (figura 4.31, 4.32, 4.33 e 4.34), si osserva invece che, rispetto alla simulazione con l'angolo d'attacco di  $10^\circ$ , tutte le soluzioni peggiorano, tranne quella con il footplate modificato.

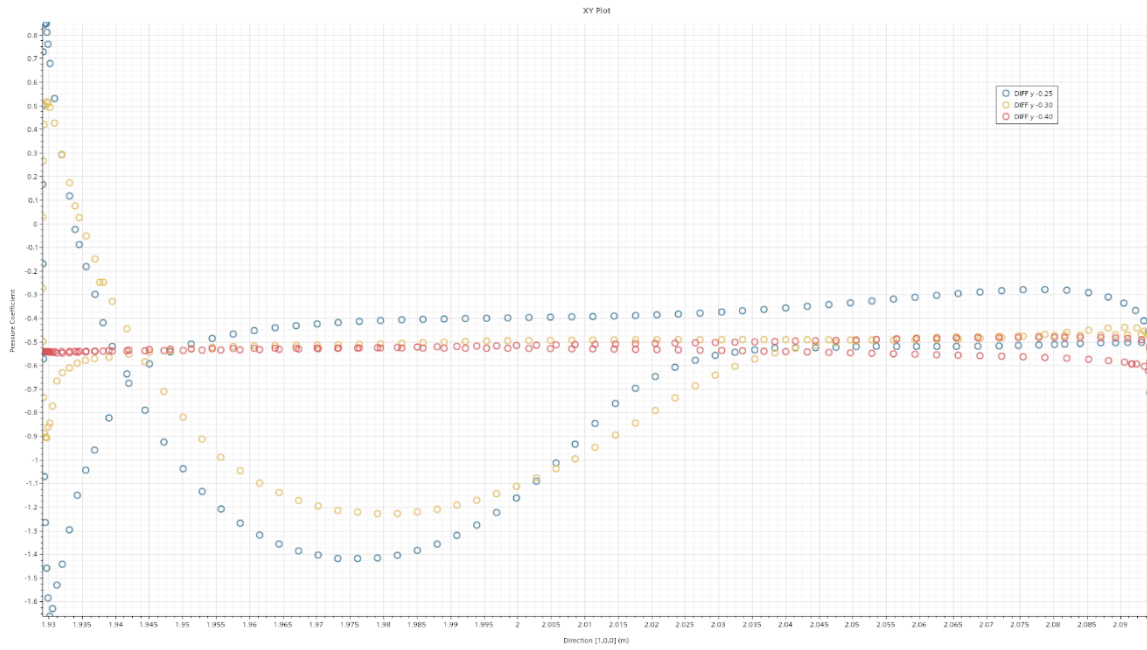


Figura 4.31 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,3 m della simulazione con lo strake

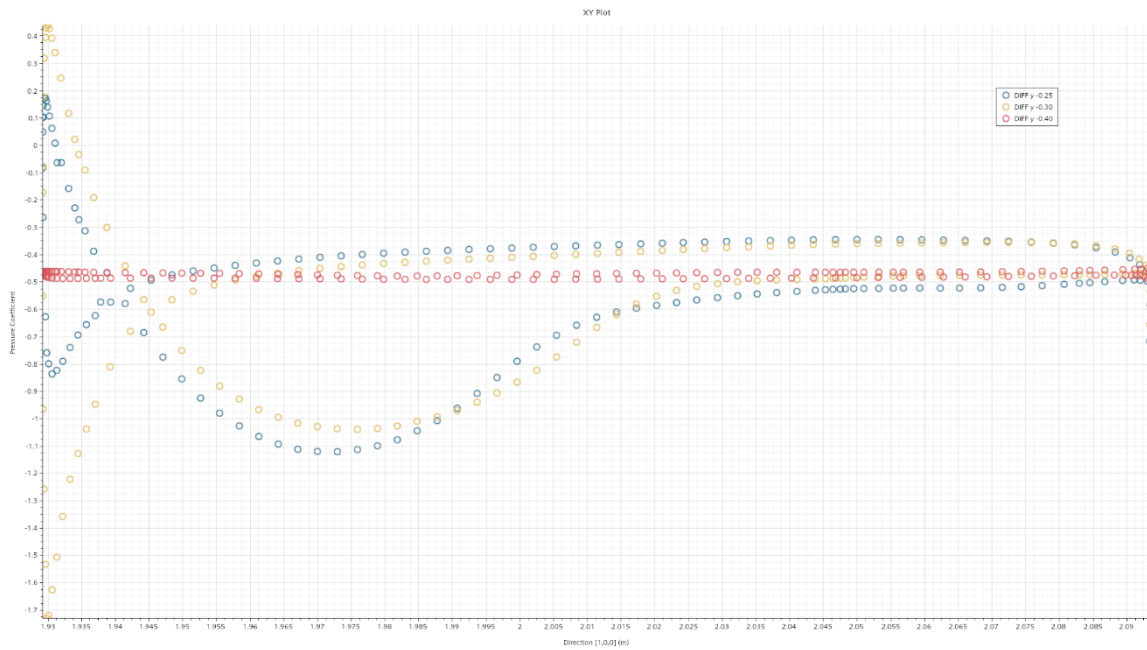


Figura 4.32 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,3 m della simulazione con lo strake 2

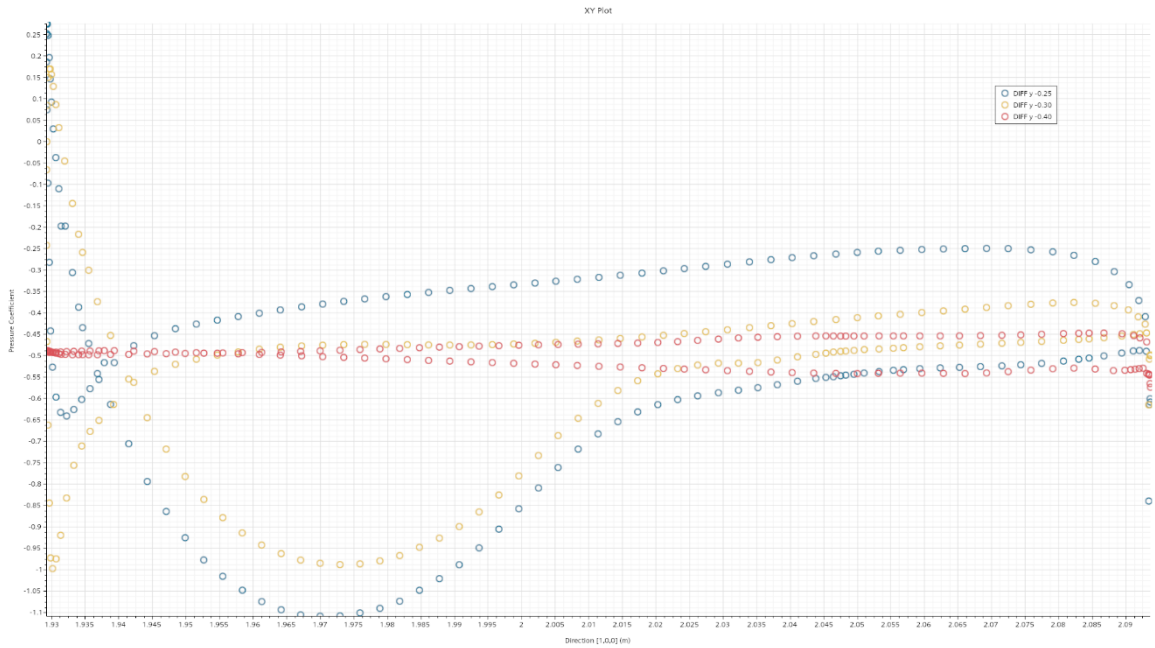


Figura 4.33 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,3 m della simulazione con lo strake 3

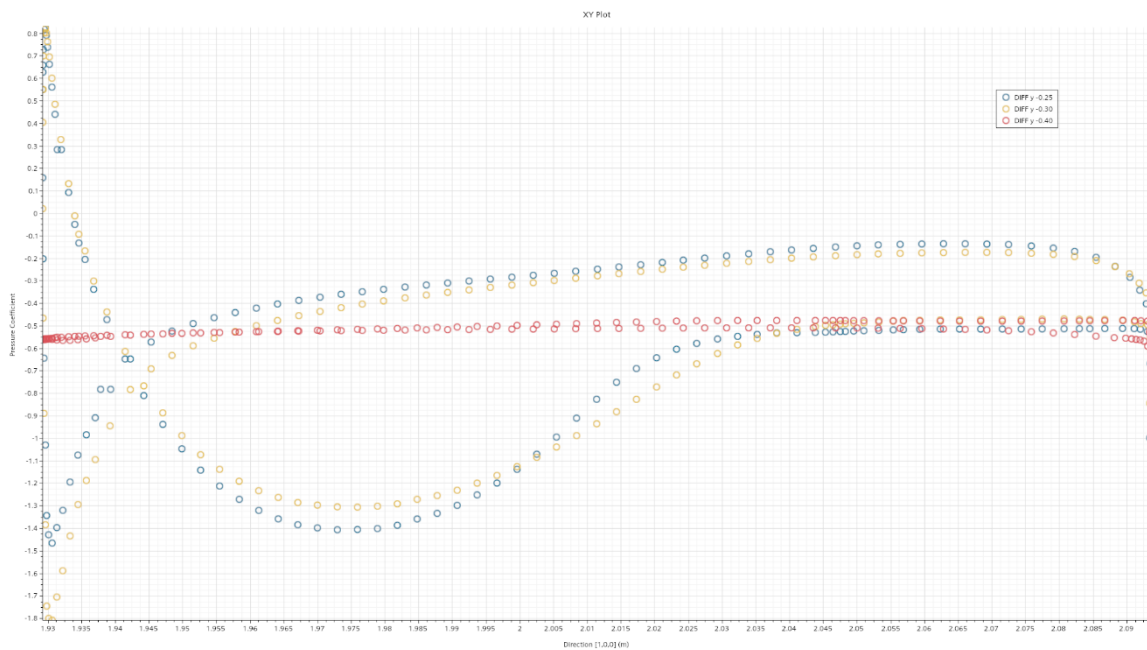


Figura 4.34 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,3 m della simulazione con il footplate

Concludendo con i coefficienti di pressione nella zona di 0,72 m (figura 4.35, 4.36, 4.37 e 4.38), ovvero la zona maggiormente soggetta ai vortici, si nota che il miglior coefficiente di pressione si ottiene con il footplate modificato, con un valore pari a circa 1,6.



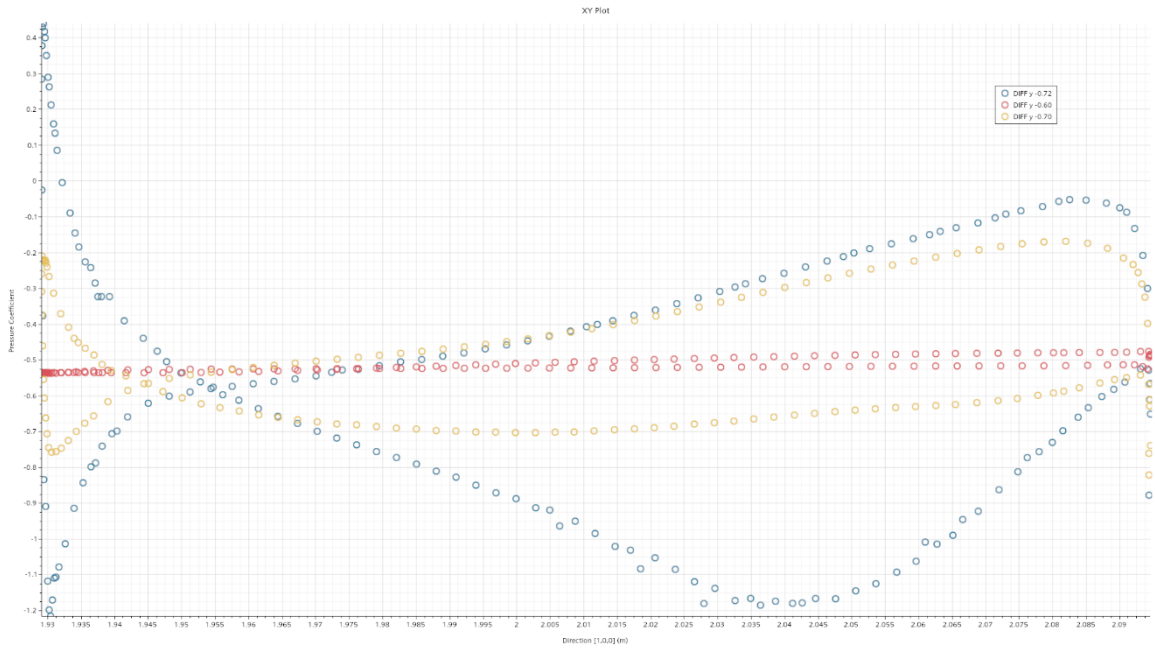


Figura 4.35 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m della simulazione con lo strake

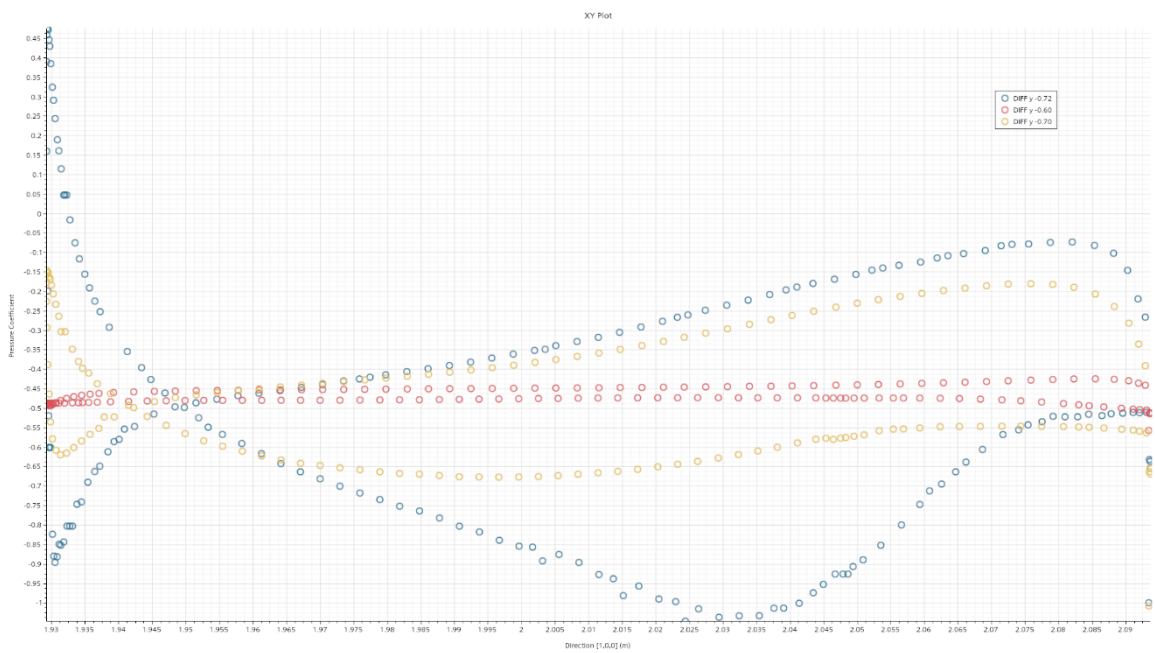


Figura 4.36 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m della simulazione con lo strake 2

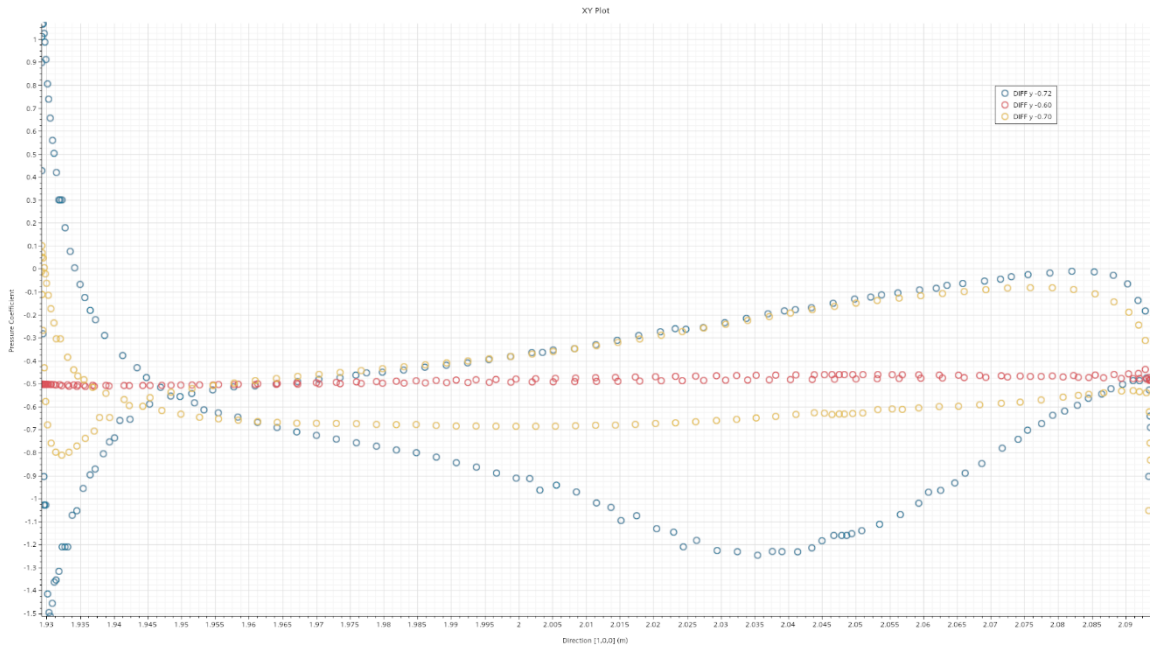


Figura 4.37 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m della simulazione con lo strake 3

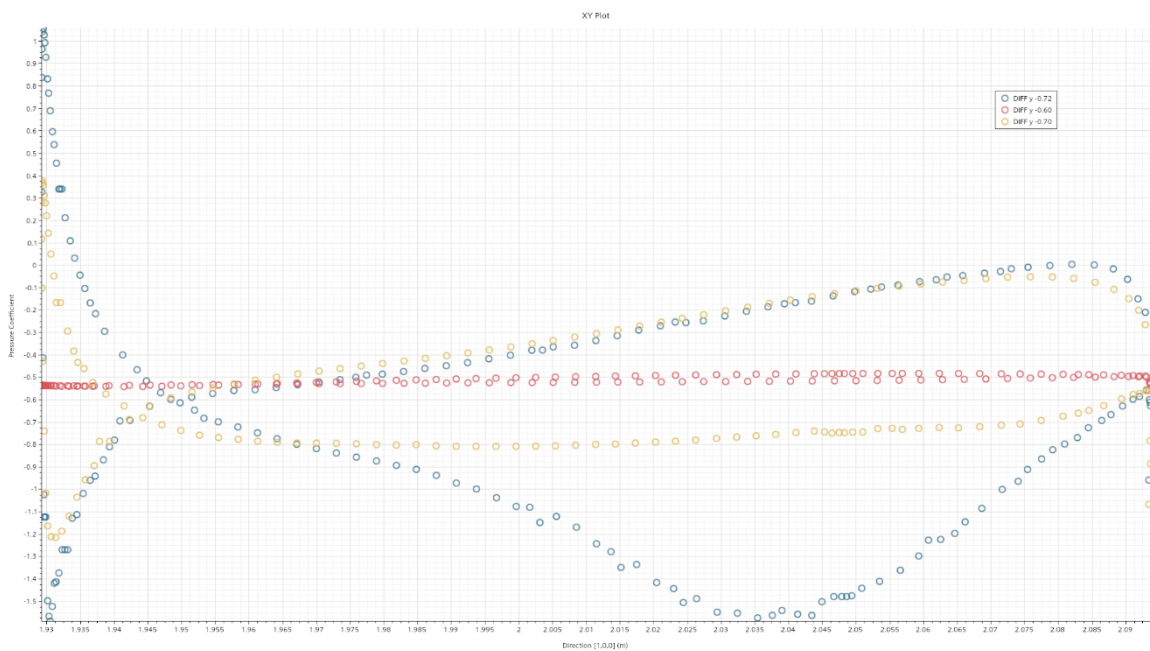


Figura 4.38 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m della simulazione con il footplate

Continuando con l'analisi delle pressioni sul diffusore nella parte superiore (figura 4.39, 4.40, 4.41 e 4.42), si può notare che il vero miglioramento si ottiene nella simulazione con il footplate modificato, in quanto si riescono a ottenere estese zone di alta pressione che non si riscontrano nelle altre prove.

Simcenter STAR-CCM+

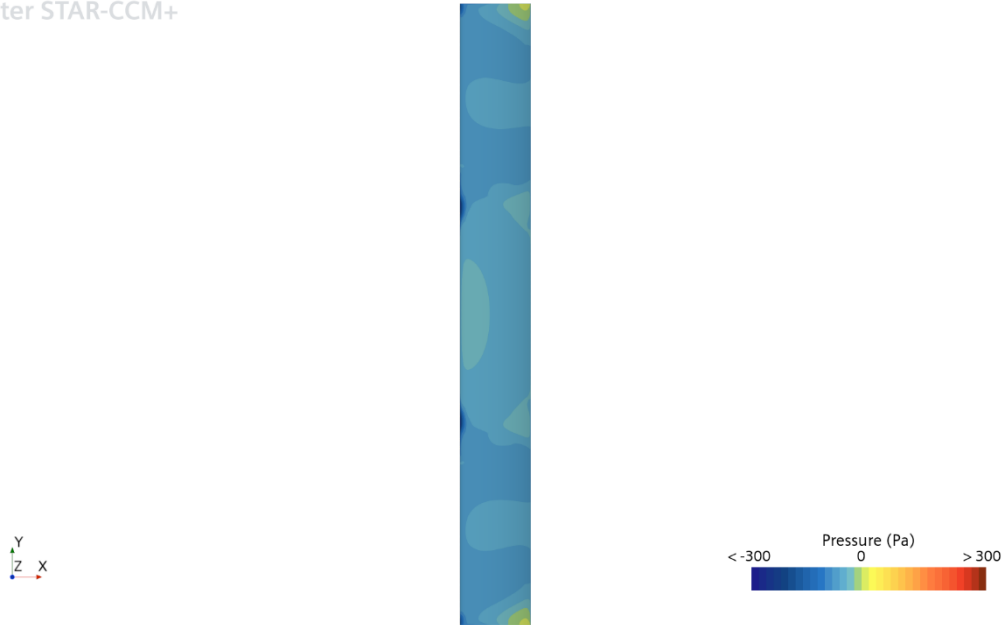


Figura 4.39 - Pressioni nella parte superiore del diffusore con strake

Simcenter STAR-CCM+

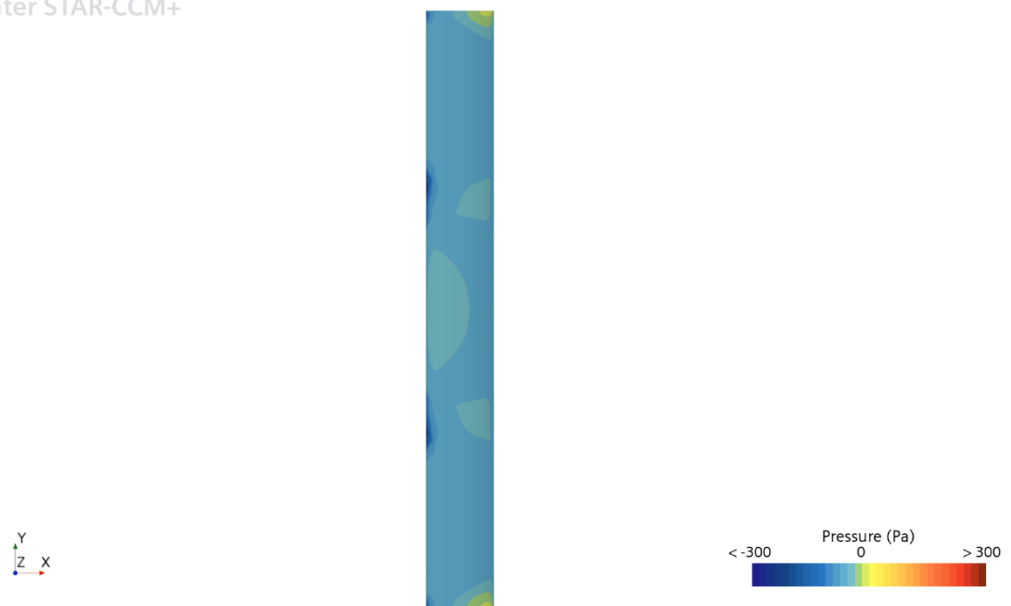


Figura 4.40 - Pressioni nella parte superiore del diffusore con strake 2

Simcenter STAR-CCM+

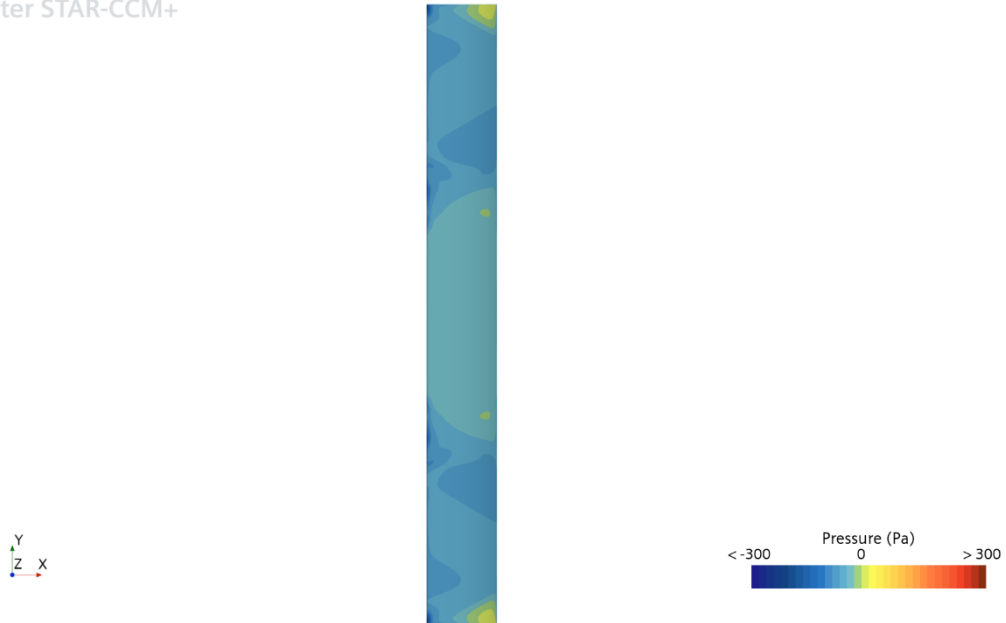


Figura 4.41 - Pressioni nella parte superiore del diffusore con strake 3

Simcenter STAR-CCM+

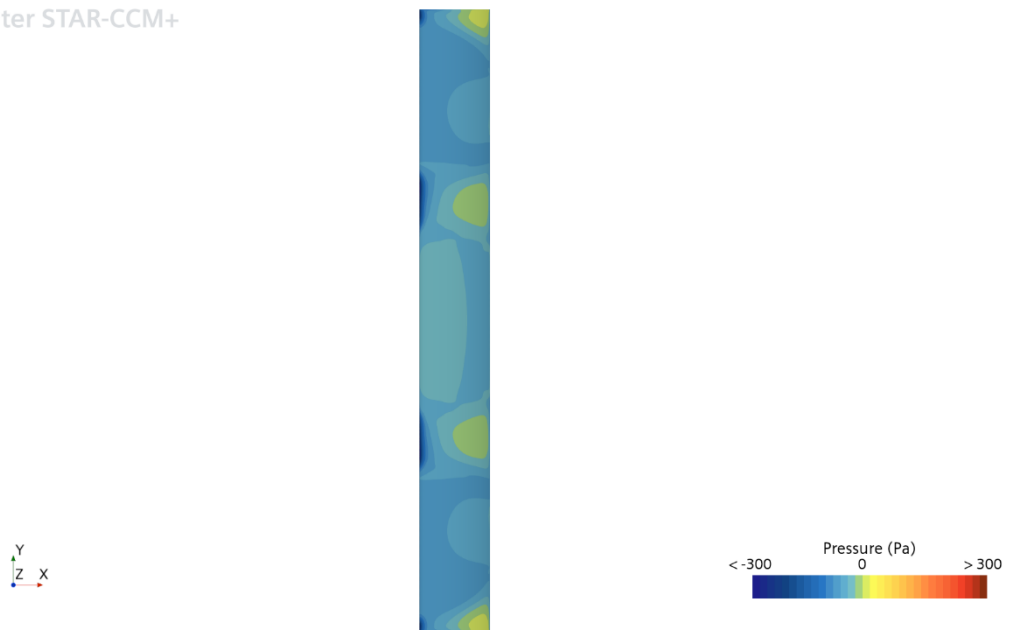


Figura 4.42 - Pressioni nella parte superiore del diffusore con footplate

Nella parte inferiore del diffusore (figura 4.43, 4.44, 4.45 e 4.46), le pressioni ottenute nelle varie prove sono abbastanza simili tra loro, con l'unica differenza nell'estensione della zona di bassa pressione, che è più ampia nella simulazione strake.

Simcenter STAR-CCM+

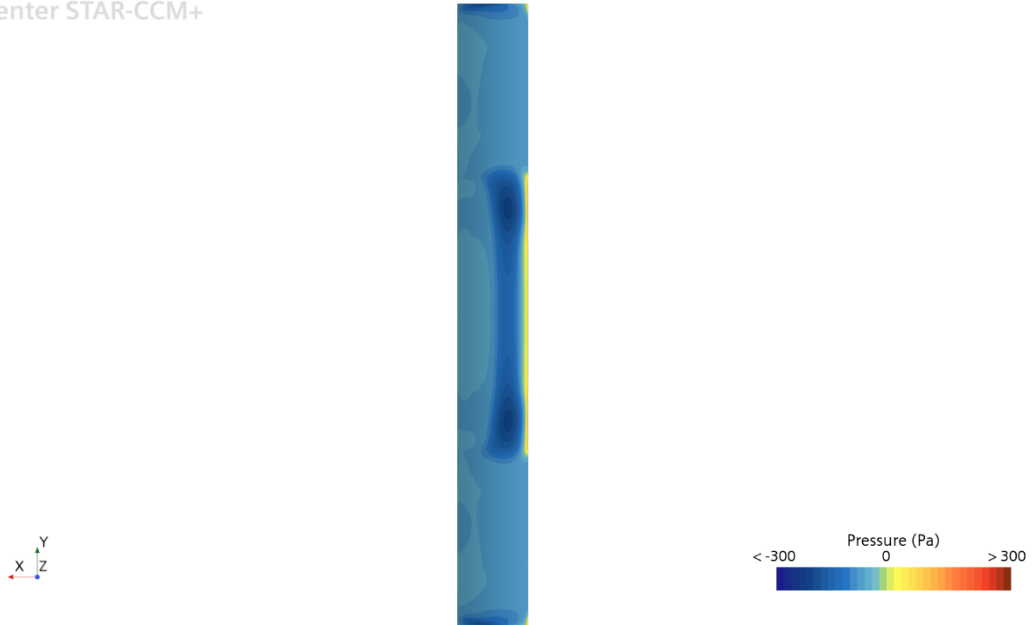


Figura 4.43 - Pressioni nella parte inferiore del diffusore con strake

Simcenter STAR-CCM+

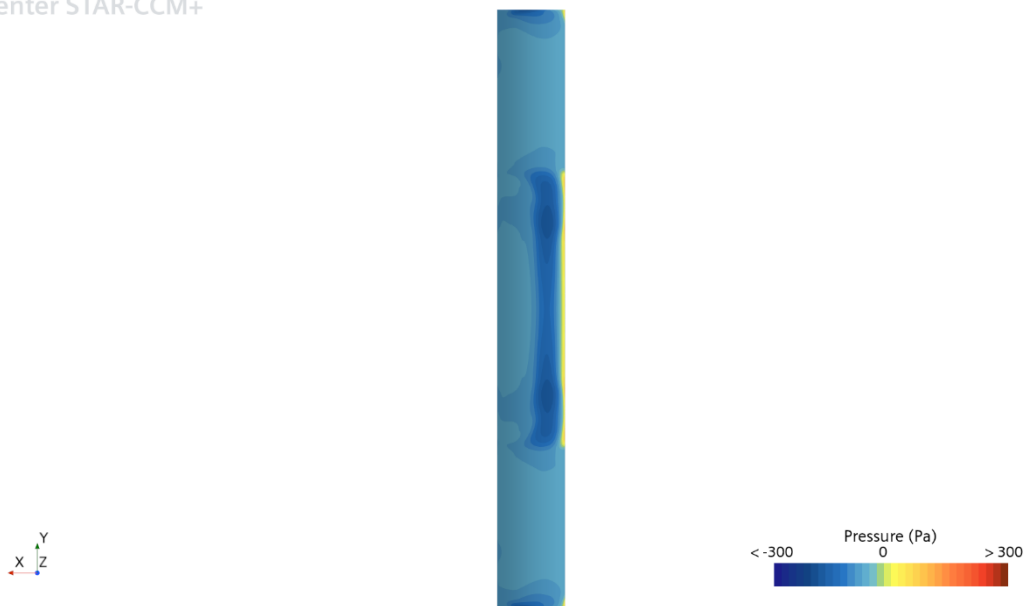


Figura 4.44 - Pressioni nella parte inferiore del diffusore con strake 2

Simcenter STAR-CCM+

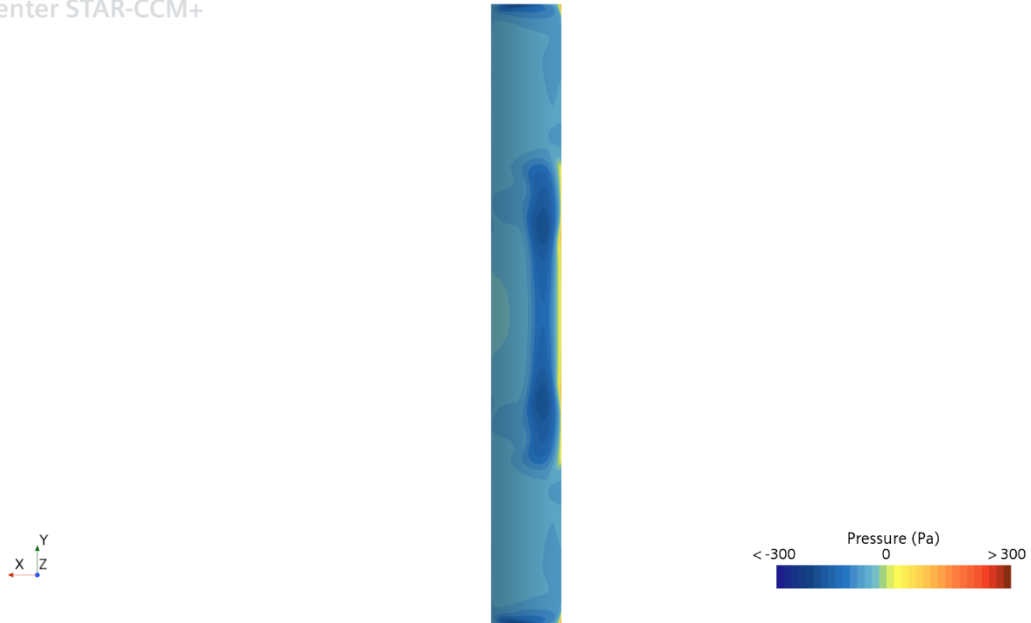


Figura 4.45 - Pressioni nella parte inferiore del diffusore con strake 3

Simcenter STAR-CCM+

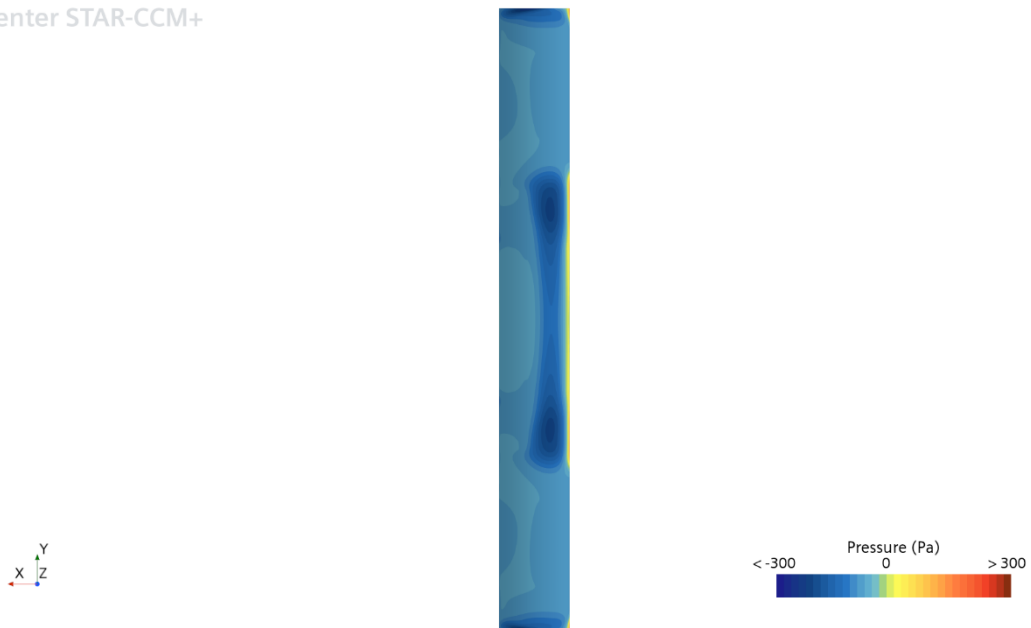


Figura 4.46 - Pressioni nella parte inferiore del diffusore con footplate

Infine, dai reports (tabella 4.5 e 4.8) si osserva un netto peggioramento della downforce della macchina nelle simulazioni strake 2 e strake 3, mentre si ha un netto miglioramento sia della downforce generale della macchina che della downforce generata dal diffusore nella prova con il footplate modificato.

Tabella 4.5 - Reports simulazione strake

STRAKE	DRAG	DOWNFORCE	CENTER OF LOADS
ALA ANTERIORE	15,332 N	-111,151 N	-0,665 m
GROUND WING	24,378 N	-100,083 N	0,773 m
FONDO E DIFFUSORE	0,700 N	-39,890 N	0,862 m
ALA POSTERIORE	33,190 N	-109,247 N	1,832 m
RUOTA ANTERIORE	2,928 N	1,561 N	
RUOTA POSTERIORE	0,520 N	2,330 N	
MONOCOQUE	15,632 N	-1,481 N	1,046 m
DIFFUSORE	0,441 N	-2,372 N	2,003 m
MACCHINA	97,505 N	-354,500 N	0,714 m

Tabella 4.6 - Reports simulazione strake 2

STRAKE 2	DRAG	DOWNFORCE	CENTER OF LOADS
ALA ANTERIORE	15,180 N	-104,076 N	-0,703 m
GROUND WING	25,778 N	-89,763 N	0,820 m
FONDO E DIFFUSORE	0,739 N	-35,331 N	0,885 m
ALA POSTERIORE	33,495 N	-104,831 N	1,839 m
RUOTA ANTERIORE	2,737 N	1,802 N	
RUOTA POSTERIORE	0,623 N	1,775 N	
MONOCOQUE	20,128 N	1,149 N	1,091 m
DIFFUSORE	0,489 N	-2,165 N	2,005 m
MACCHINA	97,048 N	-329,275 N	0,746 m

Tabella 4.7 - Reports simulazione strake 3

<b>STRAKE 3</b>	<b>DRAG</b>	<b>DOWNFORCE</b>	<b>CENTER OF LOADS</b>
ALA ANTERIORE	15,690 N	-110,682 N	-0,702 m
GROUND WING	24,966 N	-103,604 N	0,772 m
FONDO E DIFFUSORE	0,744 N	-39,875 N	0,850 m
ALA POSTERIORE	33,051 N	-99,573 N	1,890 m
RUOTA ANTERIORE	2,271 N	2,025 N	
RUOTA POSTERIORE	0,794 N	2,702 N	
MONOCOQUE	20,166 N	1,845 N	1,052 m
DIFFUSORE	0,472 N	-2,373 N	2,001 m
MACCHINA	97,712 N	-347,164 N	0,701 m

Tabella 4.8 - Reports simulazione footplate

<b>FOOTPLATE</b>	<b>DRAG</b>	<b>DOWNFORCE</b>	<b>CENTER OF LOADS</b>
ALA ANTERIORE	15,480 N	-108,815 N	-0,663 m
GROUND WING	25,885 N	-111,536 N	0,777 m
FONDO E DIFFUSORE	0,950 N	-44,669 N	0,892 m
ALA POSTERIORE	32,728 N	-109,728 N	1,829 m
RUOTA ANTERIORE	2,913 N	1,360 N	
RUOTA POSTERIORE	0,681 N	2,641 N	
MONOCOQUE	15,917 N	-2,620 N	1,011 m
DIFFUSORE	0,676 N	-2,974 N	2,012 m
MACCHINA	99.379 N	-369.860 N	0.732 m



Inoltre, analizzando il piano che mostra la vorticità (figura 4.47, 4.48, 4.49 e 4.50), è possibile notare che l'obiettivo prefissato a inizio paragrafo è stato raggiunto attraverso la modifica al footplate. Per questo motivo, d'ora in poi verranno utilizzati i footplate modificati per migliorare ulteriormente il diffusore.

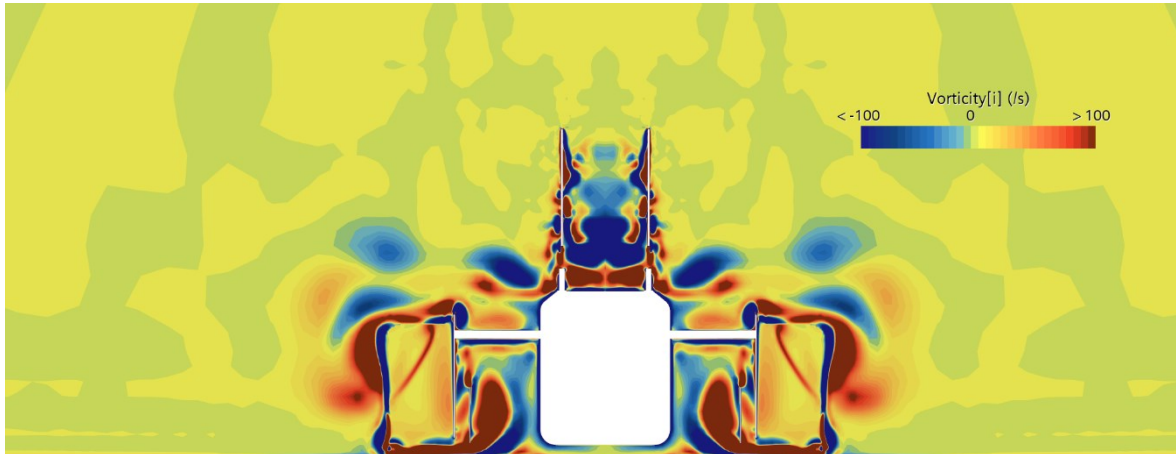


Figura 4.47 - Vorticità nella zona critica sotto il fondo nella simulazione con strake

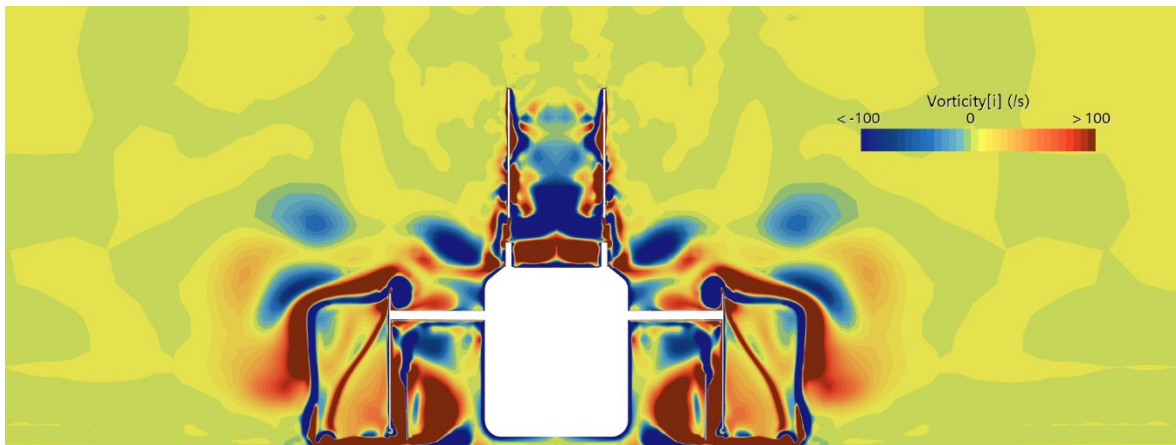


Figura 4.48 - Vorticità nella zona critica sotto il fondo nella simulazione con strake 2

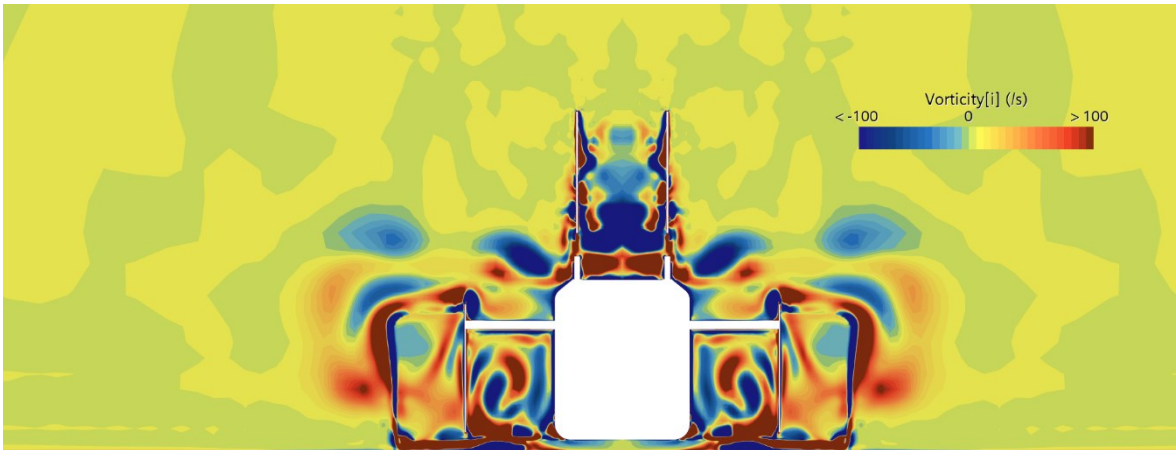


Figura 4.49 - Vorticità nella zona critica sotto il fondo nella simulazione con strake 3

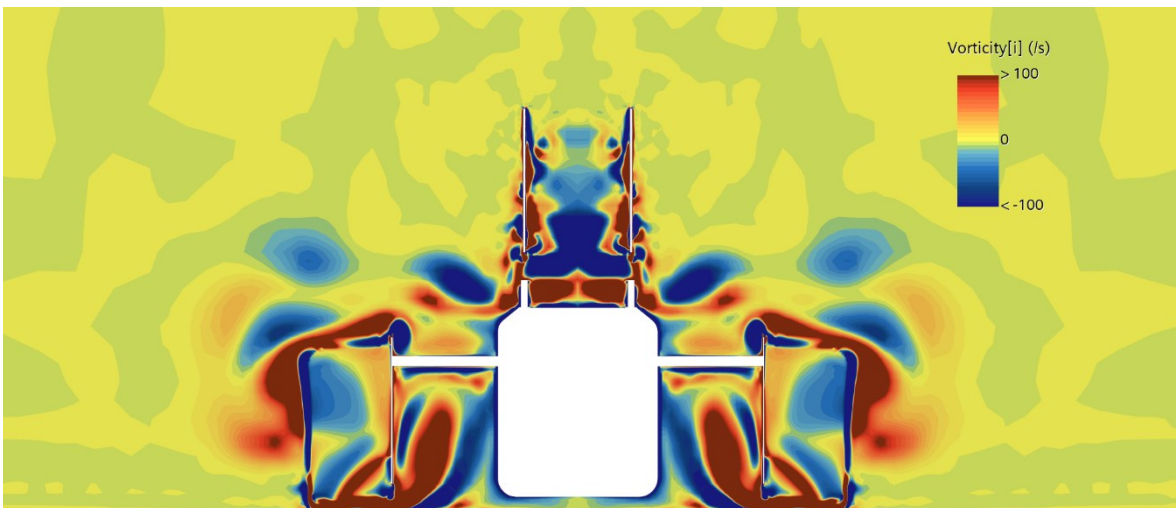


Figura 4.50 - Vorticità nella zona critica sotto il fondo nella simulazione con il footplate

## 4.2.4 Miglioramenti diffusore

Per migliorare le prestazioni aerodinamiche del diffusore, è stata effettuata una modifica alla sua sezione, permettendo l'inserimento di un flap nella parte centrale. La modifica è stata applicata solo alla sezione centrale del diffusore, fino a una distanza di 350 mm dal centro, riducendo la corda di circa 50 mm. Questa configurazione è stata denominata "versione 1".

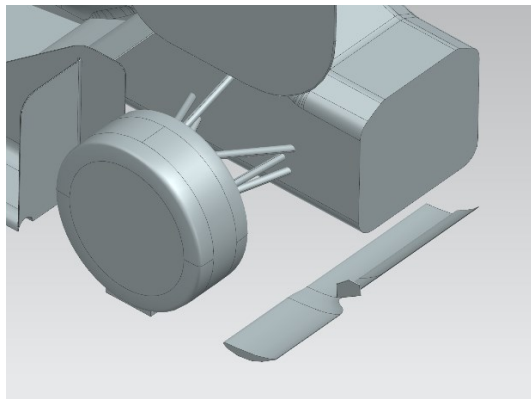


Figura 4.51 - CAD diffusore versione 1

Una volta realizzato il modello CAD della versione 1 (figura 4.51) e concluse le simulazioni CFD, sono stati analizzati i coefficienti di pressione in tre sezioni: a 0,1 m, 0,3 m e 0,72 m dal centro del diffusore (figura 4.52, 4.53, e 4.54). Inoltre, sono state studiate le pressioni sia nella parte superiore (figura 4.55) sia in quella inferiore del diffusore (Figura 4.56).

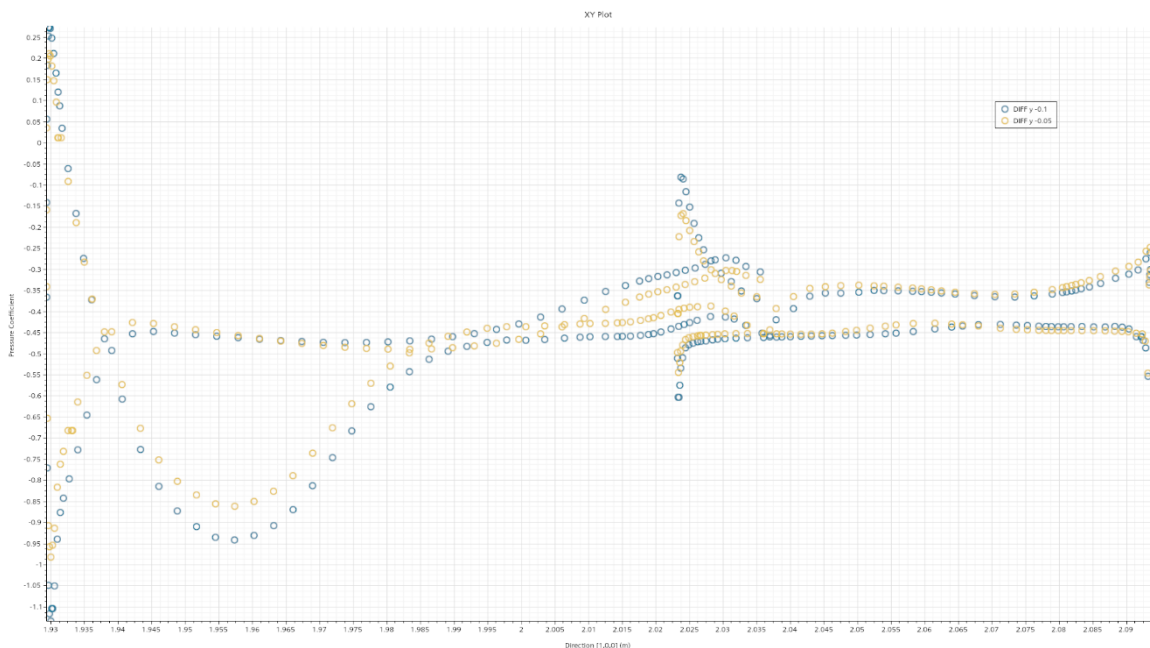


Figura 4.52 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m della simulazione con la versione uno

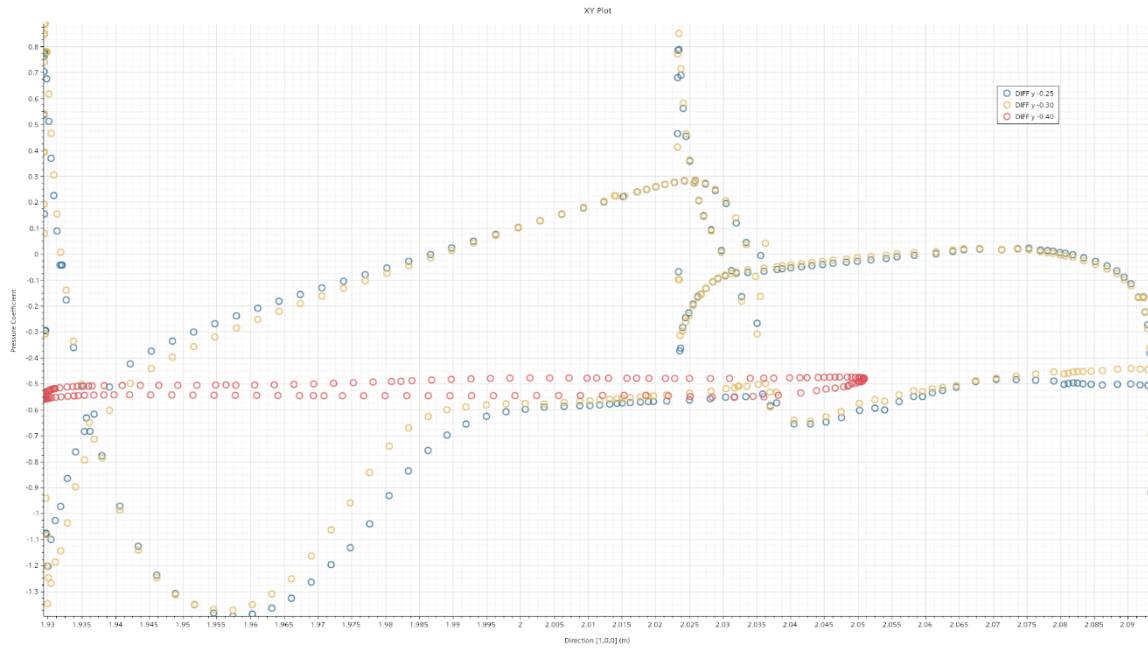


Figura 4.53 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,30 m della simulazione con il diffusore versione 1

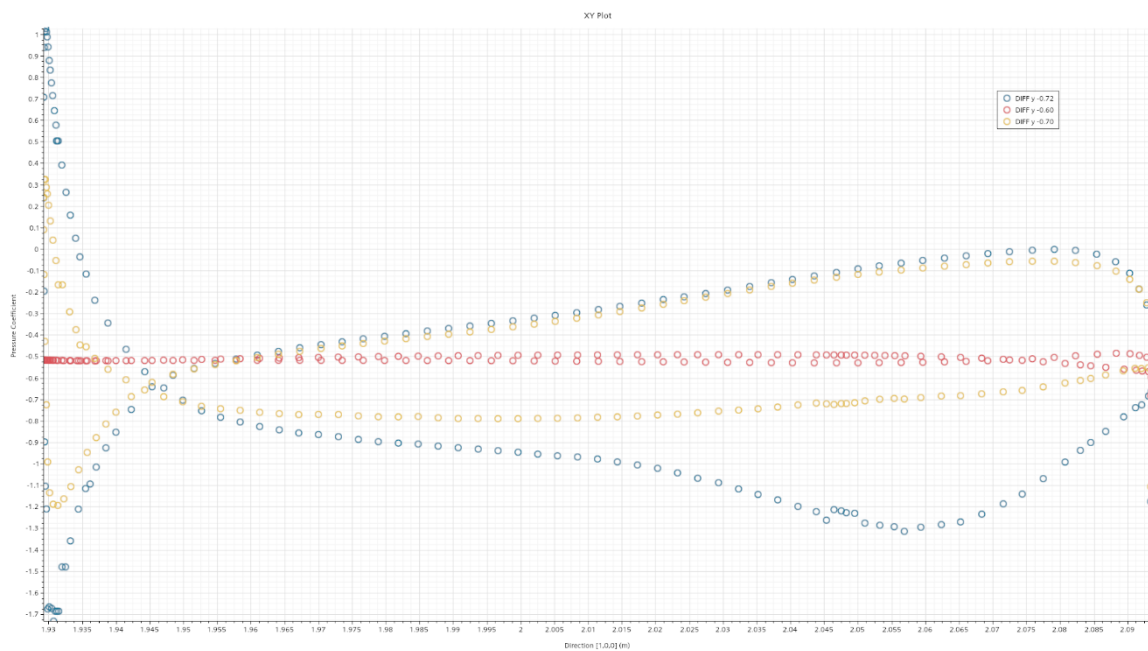


Figura 4.54 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m della simulazione con il diffusore versione 1

L'analisi dei coefficienti di pressione ha mostrato un notevole miglioramento nella zona a 0,1 m, con un leggero peggioramento a 0,72 m. La pressione nella parte superiore del diffusore ha evidenziato una zona di alta pressione estesa fino al flap, mentre nella zona di variazione di sezione (circa 0,72 m) si è riscontrato un lieve peggioramento. La parte inferiore del diffusore ha mostrato miglioramenti in tutte le aree analizzate.

Simcenter STAR-CCM+

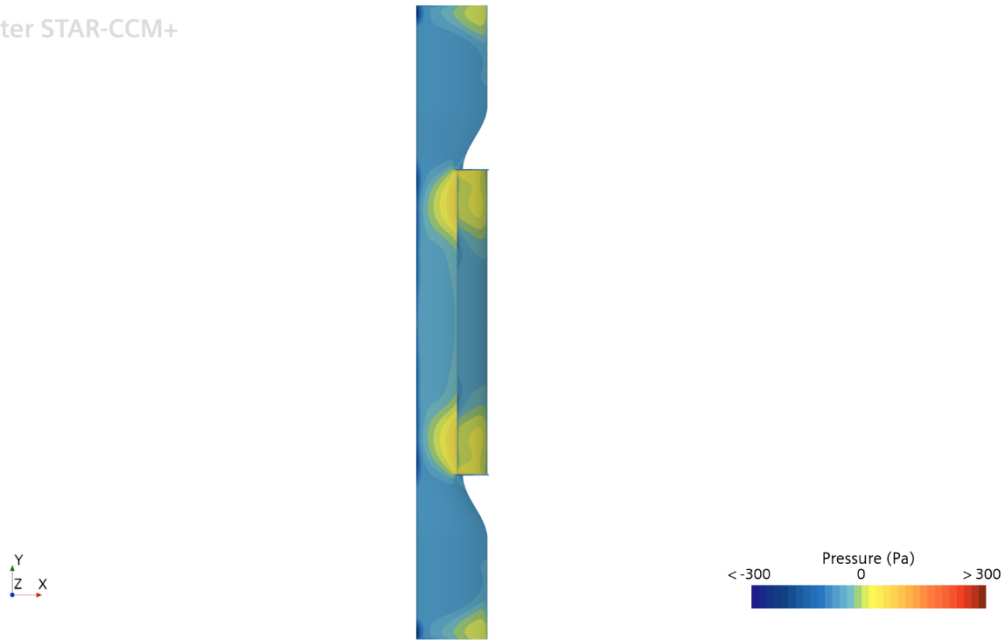


Figura 4.55 - Pressioni nella parte superiore del diffusore versione uno

Simcenter STAR-CCM+

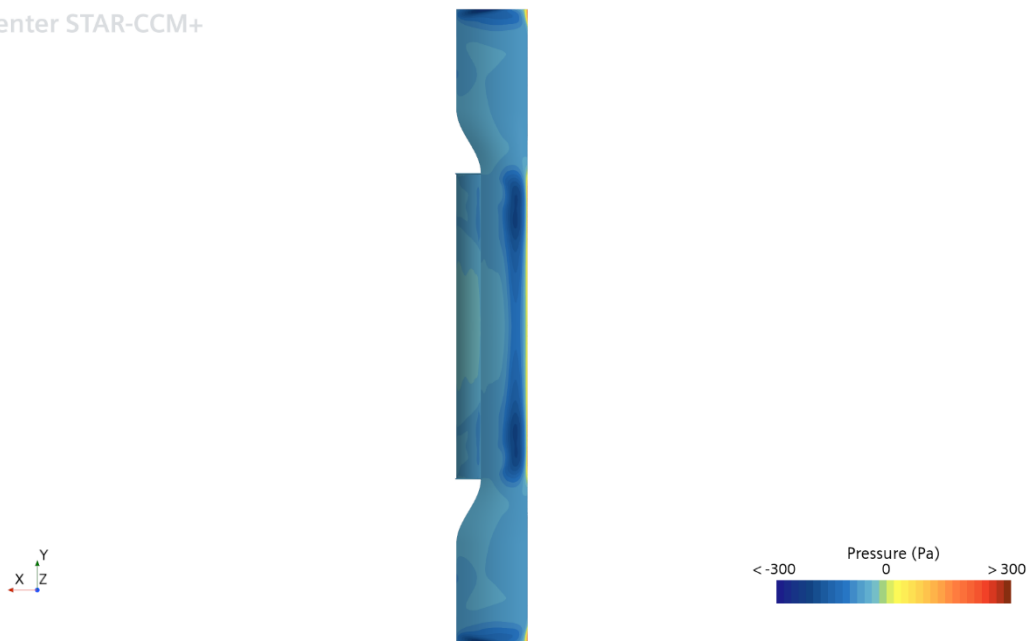


Figura 4.56 - Pressioni nella parte inferiore del diffusore versione uno

Dai reports (tabella 4.9) è emerso un miglioramento complessivo della downforce del veicolo, con un lieve peggioramento di circa 0,1 N nella downforce specifica del diffusore.

Tabella 4.9 - Reports simulazione con diffusore versione uno

VERSIONE 1	DRAG	DOWNFORCE	CENTER OF LOADS
ALA ANTERIORE	15,175 N	-107,370 N	-0,663 m
GROUND WING	25.084 N	-116,502 N	0,760 m
FONDO E DIFFUSORE	1,417 N	-45,132 N	0,866 m
ALA POSTERIORE	32,578 N	-108,550 N	1,830 m
RUOTA ANTERIORE	3,073 N	1,317 N	
RUOTA POSTERIORE	0,331 N	2,290 N	
MONOCOQUE	15.975 N	-3,249 N	1,004 m
DIFFUSORE	1,148 N	-2,893 N	2,016 m
MACCHINA	98,656 N	-373,369 N	0,728 m

Per migliorare ulteriormente, nella versione 2 è stata modificata l'estensione della corda del diffusore, aumentando la distanza da 350 mm a 430 mm. I risultati delle simulazioni hanno mostrato un leggero miglioramento solo nella zona a 0,72 m (figura 4.59), con una diminuzione della zona ad alta pressione sulla parte superiore del diffusore (figura 4.60) e una leggera diminuzione della zona di bassa pressione nella parte inferiore (figura 4.61).

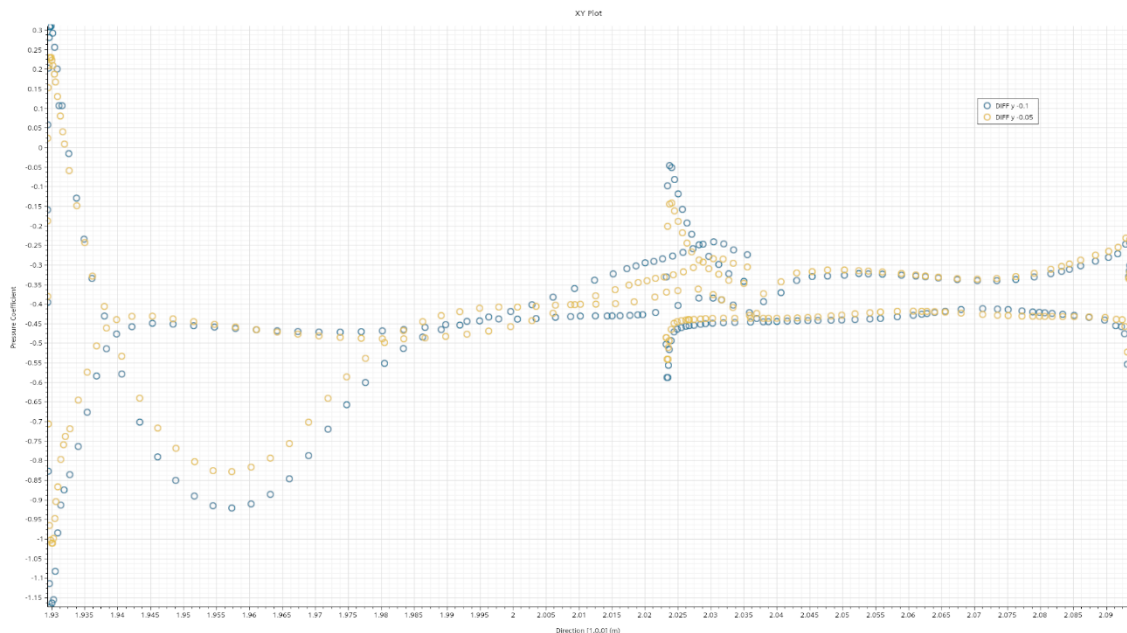


Figura 4.57 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m della simulazione con il diffusore versione due



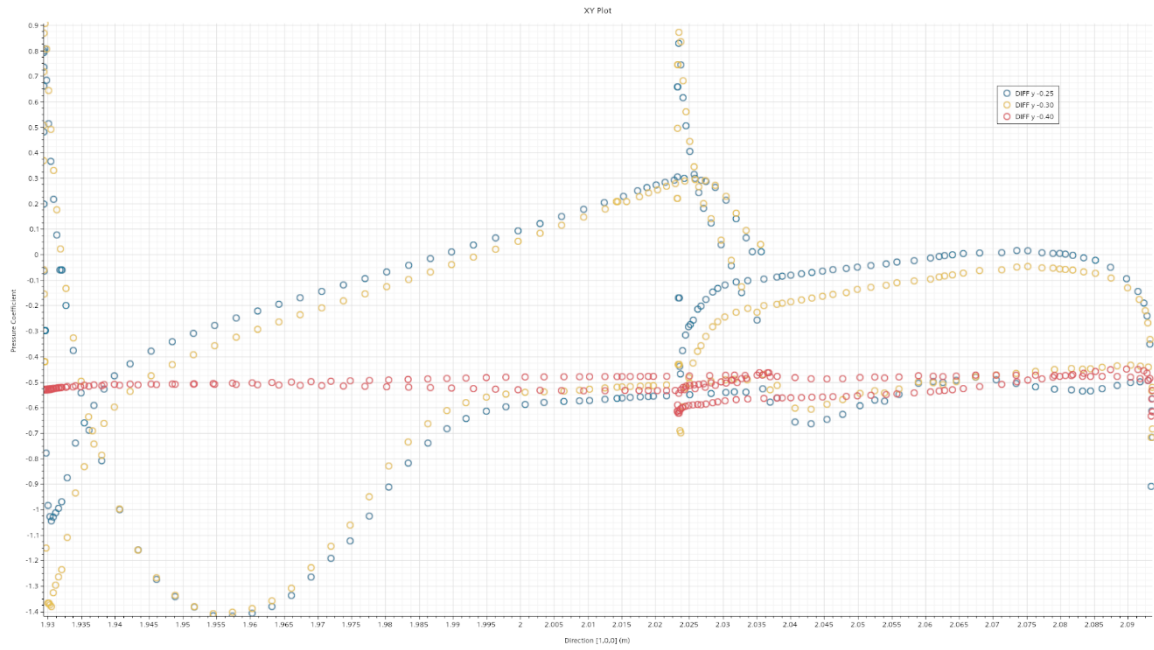


Figura 4.58 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,30 m della simulazione con il diffusore versione due

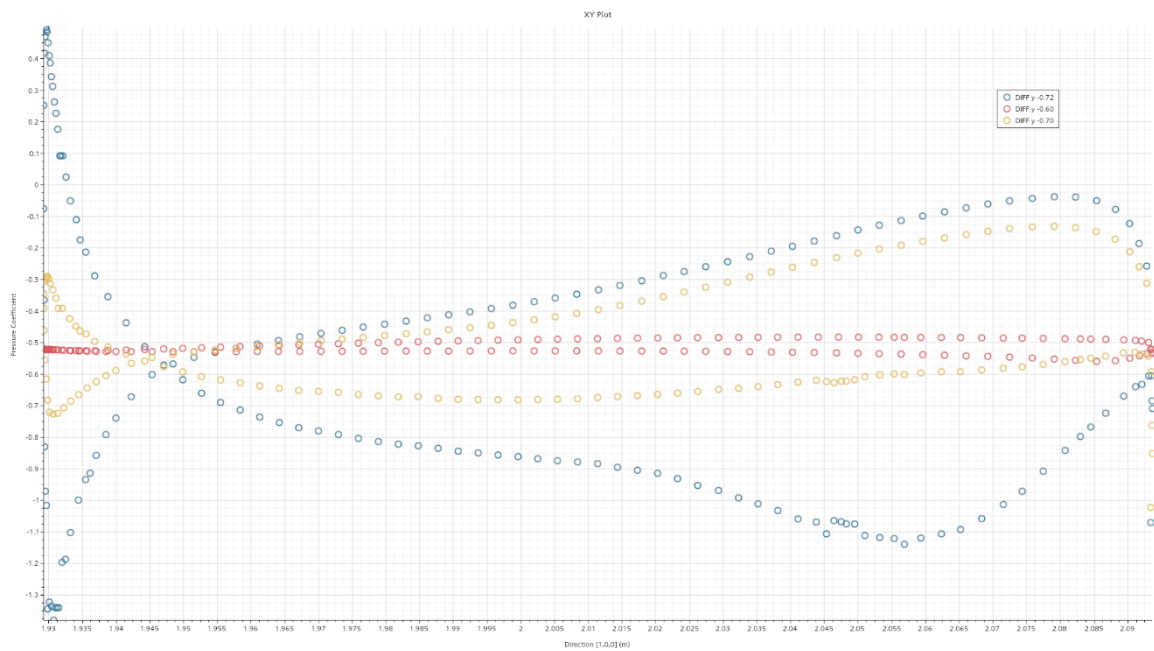


Figura 4.59 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m della simulazione con il diffusore versione due

Simcenter STAR-CCM+

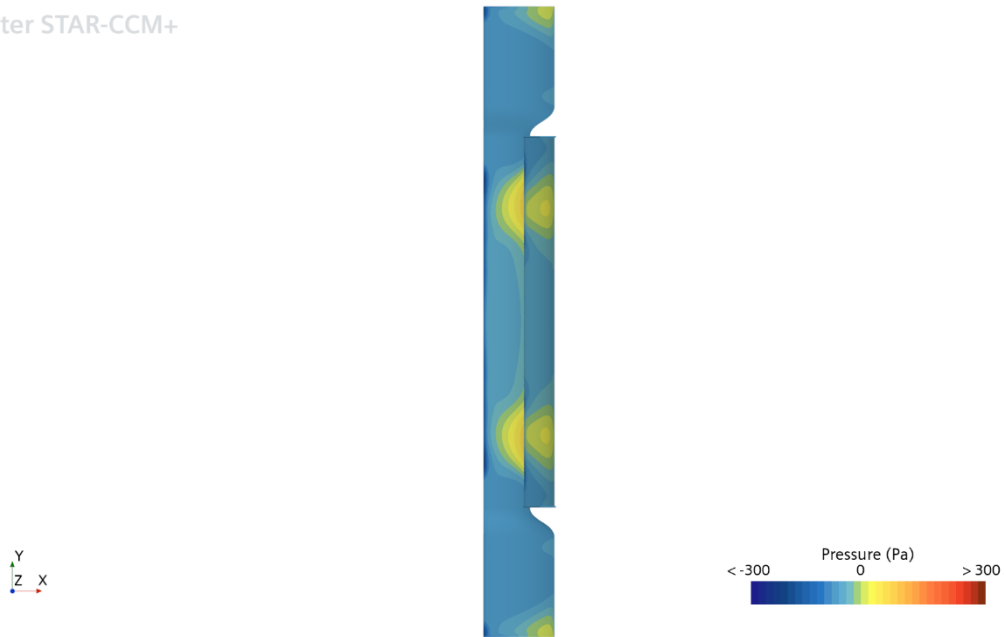


Figura 4.60 - Pressioni nella parte superiore del diffusore versione due

Simcenter STAR-CCM+

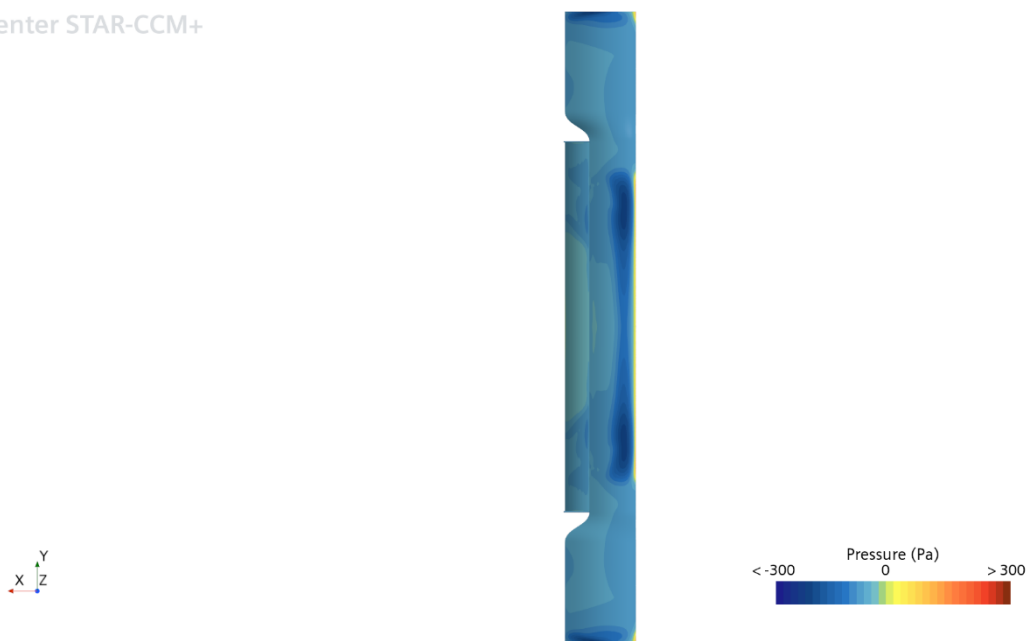


Figura 4.61 - Parte inferiore del diffusore versione due

Dai reports (tabella 4.10) è risultato che la modifica non ha prodotto i risultati desiderati, con una diminuzione sia della downforce generale del veicolo che di quella del diffusore.



Tabella 4.10 - Reports simulazione con diffusore versione due

VERSIONE DUE	DRAG	DOWNFORCE	CENTER OF LOADS
ALA ANTERIORE	15,438 N	-107,183 N	-0,662 m
GROUND WING	22,913 N	-111,920 N	0,754 m
FONDO E DIFFUSORE	1,141 N	-44,294 N	0,861 m
ALA POSTERIORE	32,344 N	-110,265 N	1,827 m
RUOTA ANTERIORE	3,012 N	1,625 N	
RUOTA POSTERIORE	0,571 N	2,300 N	
MONOCOQUE	16,121 N	-3,542 N	1,018 m
DIFFUSORE	0,871 N	-2,410 N	2,009 m
MACCHINA	96,804 N	-369,473 N	0,727 m

Ripartendo dalla versione 1, è stato aggiunto un Gurney flap al flap del diffusore. I risultati delle simulazioni hanno mostrato un miglioramento dei coefficienti di pressione nella zona a 0,3 m (figura 4.63), con un comportamento simile a quello della versione precedente nelle altre aree.

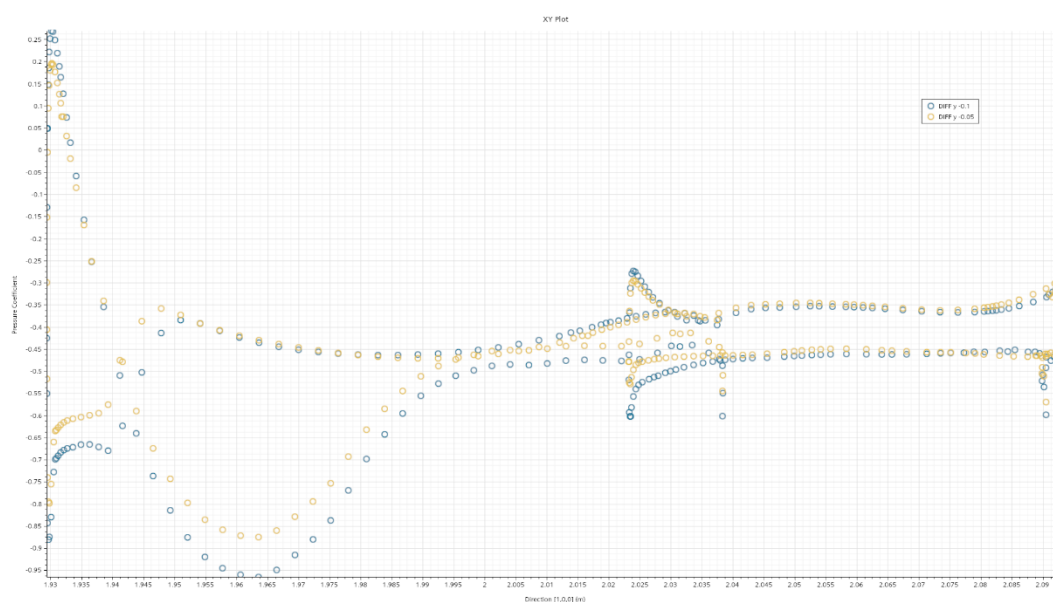


Figura 4.62 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m della simulazione con il gurney

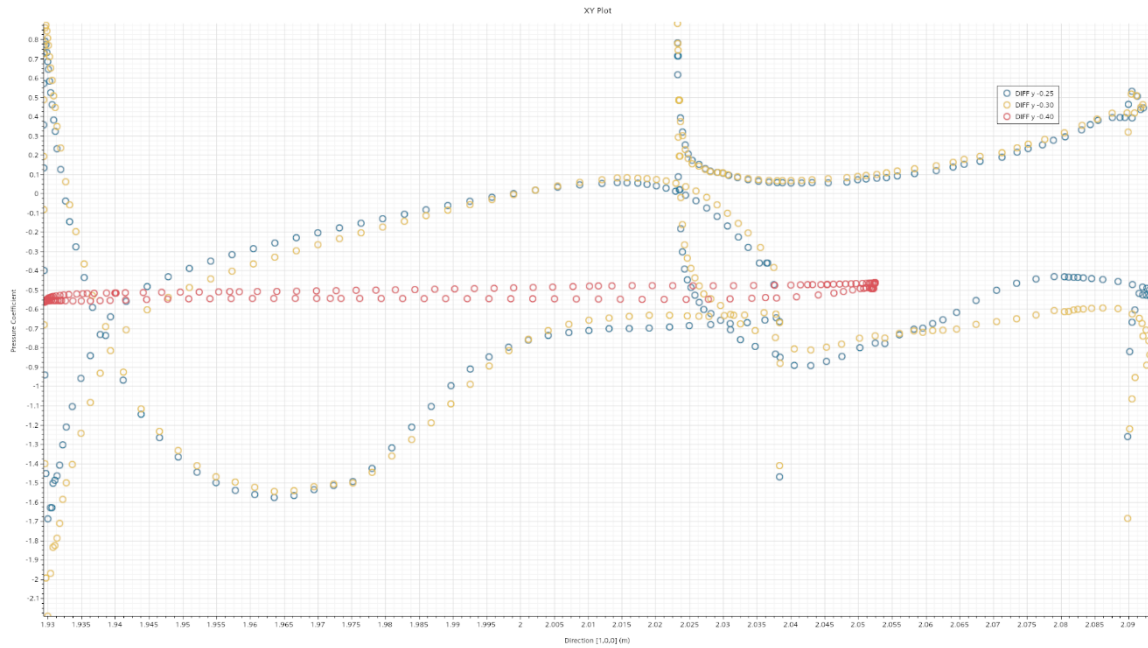


Figura 4.63 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,30 m della simulazione con il gurney

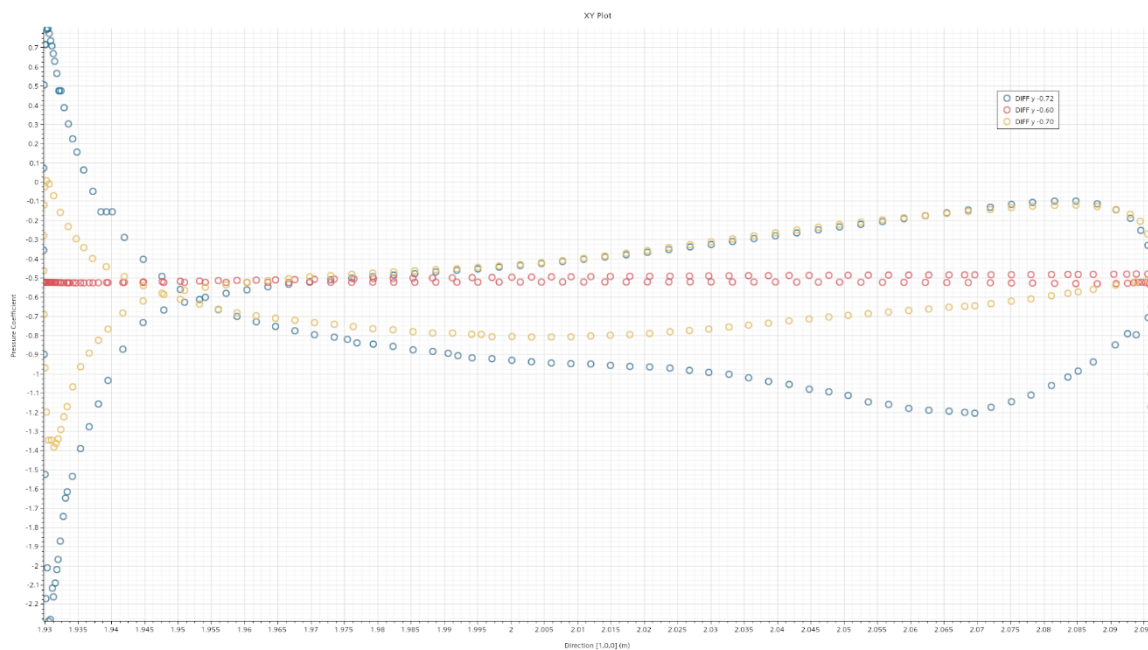


Figura 4.64 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m della simulazione con il gurney

La pressione nella parte superiore del diffusore (figura 4.65) ha evidenziato un'estensione della zona ad alta pressione, mentre la parte inferiore (figura 4.66) ha mostrato un'espansione della zona di bassa pressione centrale.

Simcenter STAR-CCM+

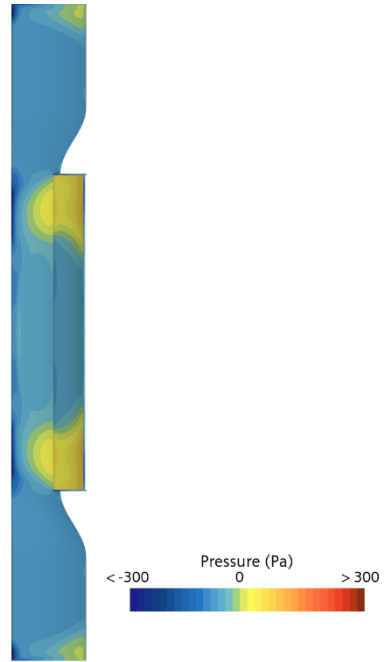


Figura 4.65 - Pressioni nella parte superiore del diffusore con gurney

Simcenter STAR-CCM+

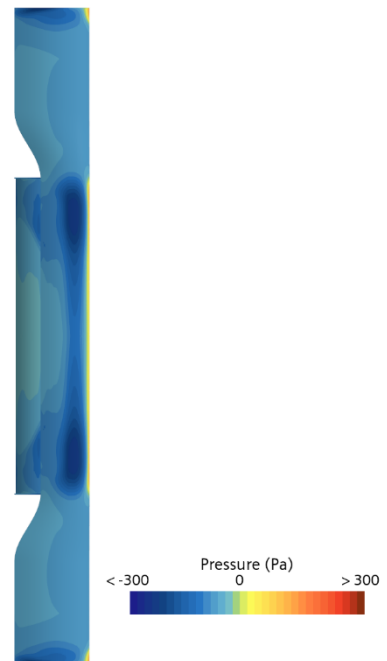


Figura 4.66 - Pressioni nella parte inferiore del diffusore con gurney

Dai reports (tabella 4.11) sono emersi miglioramenti sia per il diffusore che per il veicolo complessivo.

Tabella 4.11 - Reports simulazione con gurney

GURNEY	DRAG	DOWNFORCE	CENTER OF LOADS
ALA ANTERIORE	15,541 N	-107,976 N	-0,662 m
GROUND WING	23,330 N	-113,357 N	0,755 m
FONDO E DIFFUSORE	1,694 N	-45,428 N	0,884 m
ALA POSTERIORE	32,463 N	-110,214 N	1,828 m
RUOTA ANTERIORE	2,721 N	1,792 N	
RUOTA POSTERIORE	0,241 N	1,764 N	
MONOCOQUE	15,979 N	-3,959 N	1,016 m
DIFFUSORE	1,422 N	-3,238 N	2,027 m
MACCHINA	96,763 N	-373,746 N	0,729 m

L'ultima modifica ha riguardato l'inclinazione della parte finale della scocca di 10°, al fine di migliorare il funzionamento del diffusore e del fondo. I coefficienti di pressione (figura 4.67, 4.68 e 4.69) hanno mostrato miglioramenti significativi nelle zone a 0,1 m e 0,3 m, mentre la zona a 0,72 m è rimasta pressoché invariata.

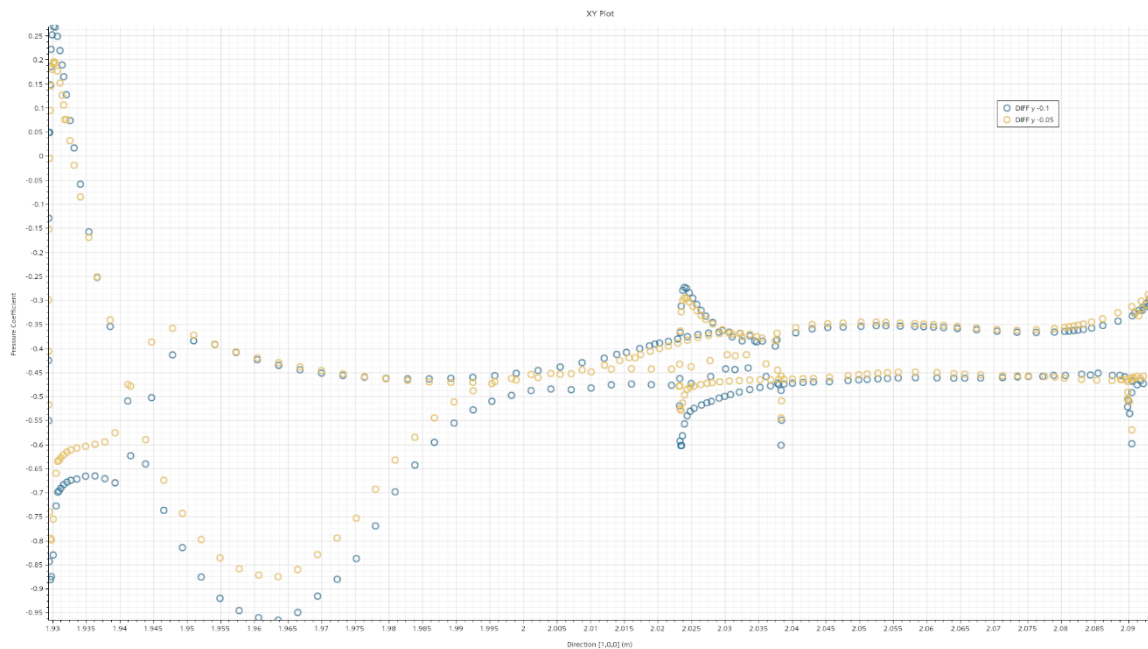


Figura 4.67 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m della simulazione con la scocca

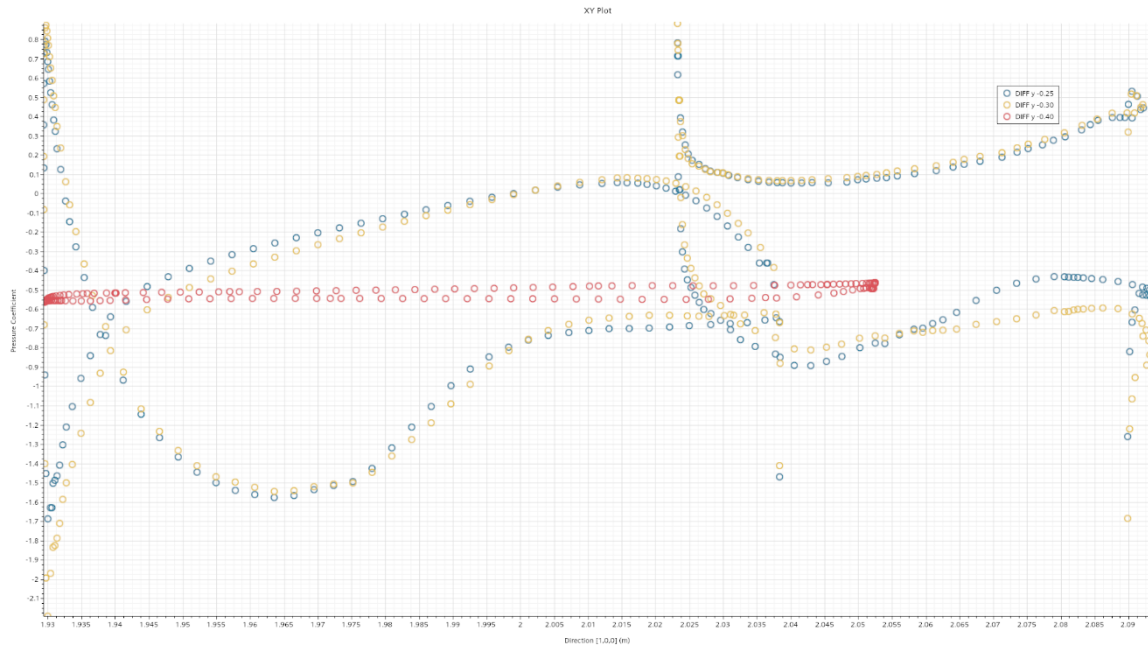


Figura 4.68 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,30 m della simulazione con la scocca

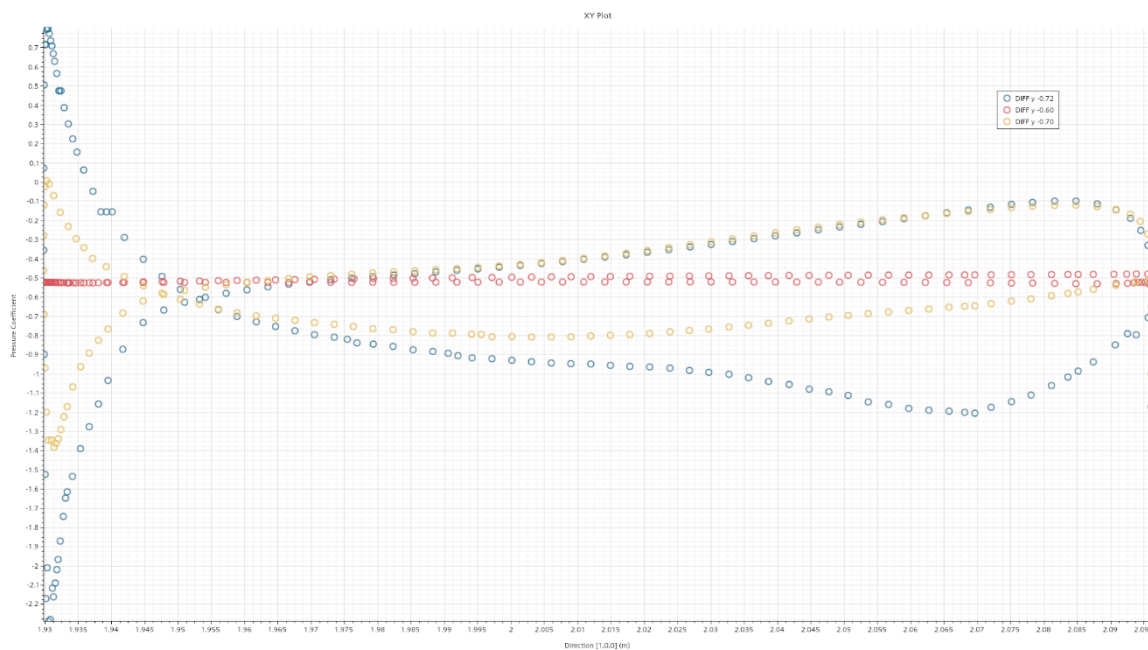


Figura 4.69 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,72 m della simulazione con la scocca

Le pressioni nella parte superiore del diffusore (figura 4.70) hanno evidenziato un'estensione delle zone ad alta pressione, migliorando il funzionamento dell'intero flap. La parte inferiore del diffusore (figura 4.71) ha mostrato un'espansione della zona di bassa pressione.

Simcenter STAR-CCM+

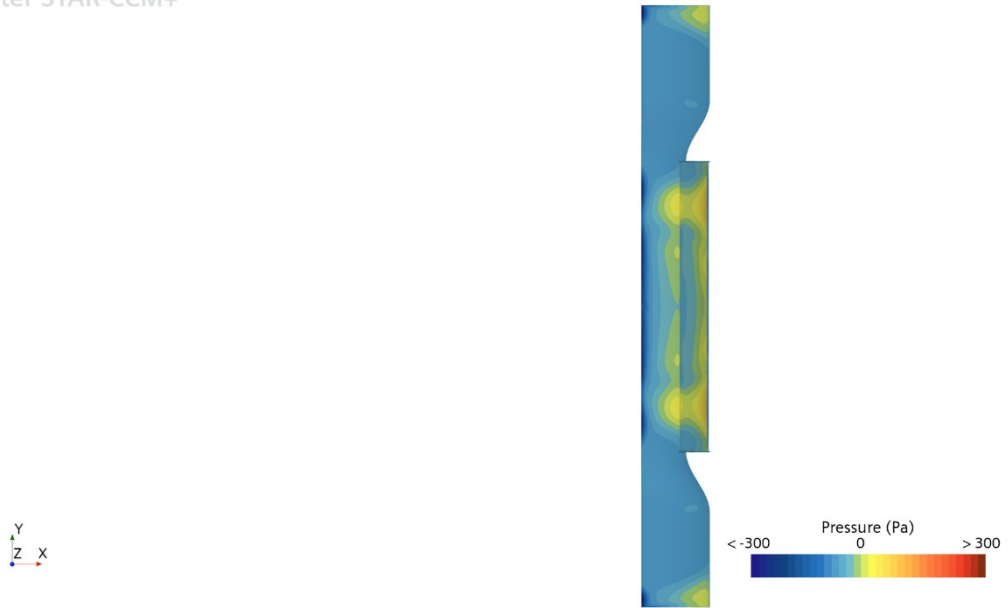


Figura 4.70 - Pressioni superiori diffusore della simulazione con la scocca

Simcenter STAR-CCM+

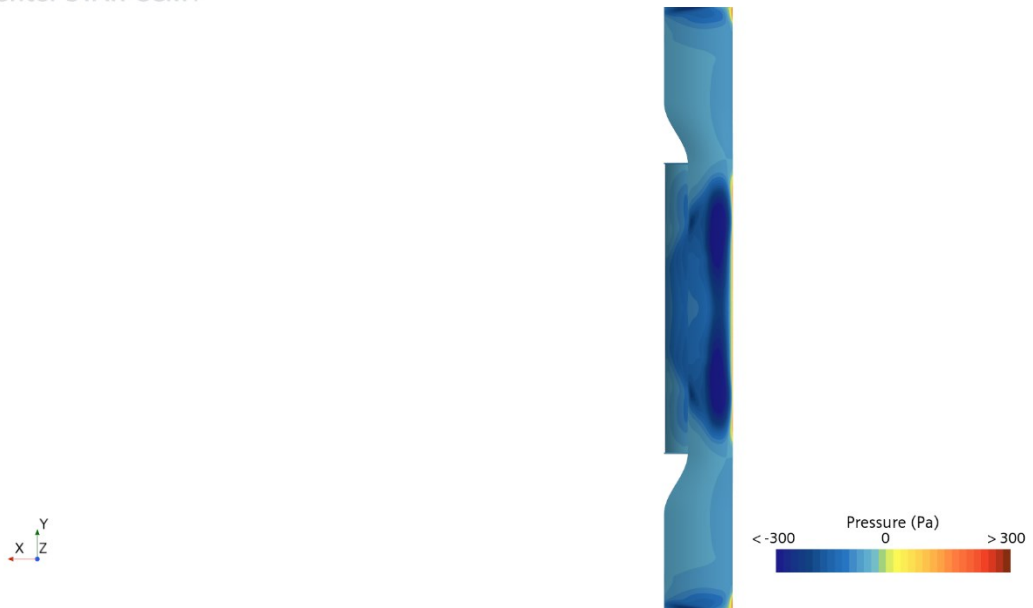


Figura 4.71 - Pressioni inferiori diffusore della simulazione con la scocca

Dai reports (tabella 4.12) è emerso un notevole miglioramento della downforce sia del fondo che del diffusore.

Tabella 4.12 - Reports simulazione scocca

<b>SCOCCA</b>	<b>DRAG</b>	<b>DOWNFORCE</b>	<b>CENTER OF LOADS</b>
<b>ALA ANTERIORE</b>	15,005 N	-104,942 N	-0,703 m
<b>GROUND WING</b>	23,302 N	-111,751 N	0,750 m
<b>FONDO E DIFFUSORE</b>	3,280 N	-51,168 N	1,001 m
<b>ALA POSTERIORE</b>	32,422 N	-108,494 N	1,829 m
<b>RUOTA ANTERIORE</b>	3,333 N	1,199 N	
<b>RUOTA POSTERIORE</b>	0,927 N	2,316 N	
<b>MONOCOQUE</b>	16,835 N	-4,499 N	1,013 m
<b>DIFFUSORE</b>	2,431 N	-5,848 N	2,023 m
<b>MACCHINA</b>	100,066 N	-373,506 N	0,750 m

Le modifiche apportate al diffusore hanno portato a un miglioramento complessivo delle prestazioni aerodinamiche del veicolo. In particolare, l'aggiunta del Gurney flap e l'inclinazione della scocca hanno contribuito a incrementare la downforce, migliorando significativamente l'efficienza del diffusore. Questi risultati confermano l'efficacia delle modifiche e forniscono una base solida per future ottimizzazioni aerodinamiche.

## 4.3 Seconda configurazione di diffusore

La seconda configurazione del diffusore si ispira al doppio diffusore della Brawn GP, che permetteva di sfruttare in modo ottimale il flusso d'aria sotto la vettura. Il diffusore della Brawn GP era caratterizzato da una struttura a doppio livello. Il primo livello operava come un diffusore tradizionale, accelerando il flusso d'aria sotto la vettura e creando una zona di bassa pressione. Il secondo livello, situato sopra il primo, generava un ulteriore canale per l'aria, migliorando l'efficienza aerodinamica. I canali di ventilazione del doppio diffusore consentivano all'aria di fluire non solo lungo il fondo della vettura, ma anche attraverso il diffusore stesso. Questo riduceva la resistenza aerodinamica e aumentava la deportanza senza penalizzare la velocità di punta.

### 4.3.1 Scelta dell'inclinazione

Per scegliere l'inclinazione ottimale del diffusore sono state eseguite due prove comparative: una con un angolo di inclinazione di  $10^\circ$  e l'altra con un angolo di  $12^\circ$ . Inoltre, il piano del diffusore è stato esteso per sfruttare al massimo l'area consentita dal regolamento, e vi è stato aggiunto un endplate per migliorare ulteriormente le prestazioni aerodinamiche.

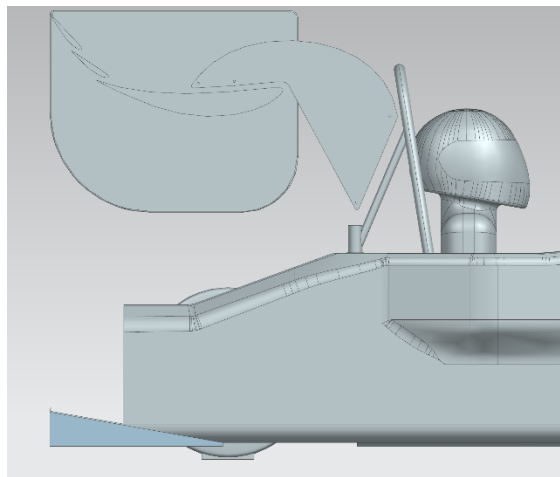


Figura 4.72 - CAD diffusore versione due con inclinazione a  $10^\circ$

Dopo aver modellato i pezzi tramite CAD (figura 4.72), si è proceduto con l'analisi delle simulazioni. I coefficienti di pressione sono stati esaminati in diverse zone (0,05 m, 0,1 m e 0,30 m). Questi risultati hanno mostrato un comportamento differente rispetto ai grafici precedenti poiché, oltre a considerare il diffusore, è stato analizzato anche il fondo del



veicolo per verificare eventuali miglioramenti aerodinamici. Dall'analisi preliminare (figura 4.73), è emerso che la configurazione con l'angolo di  $10^\circ$  presenta un andamento migliore.

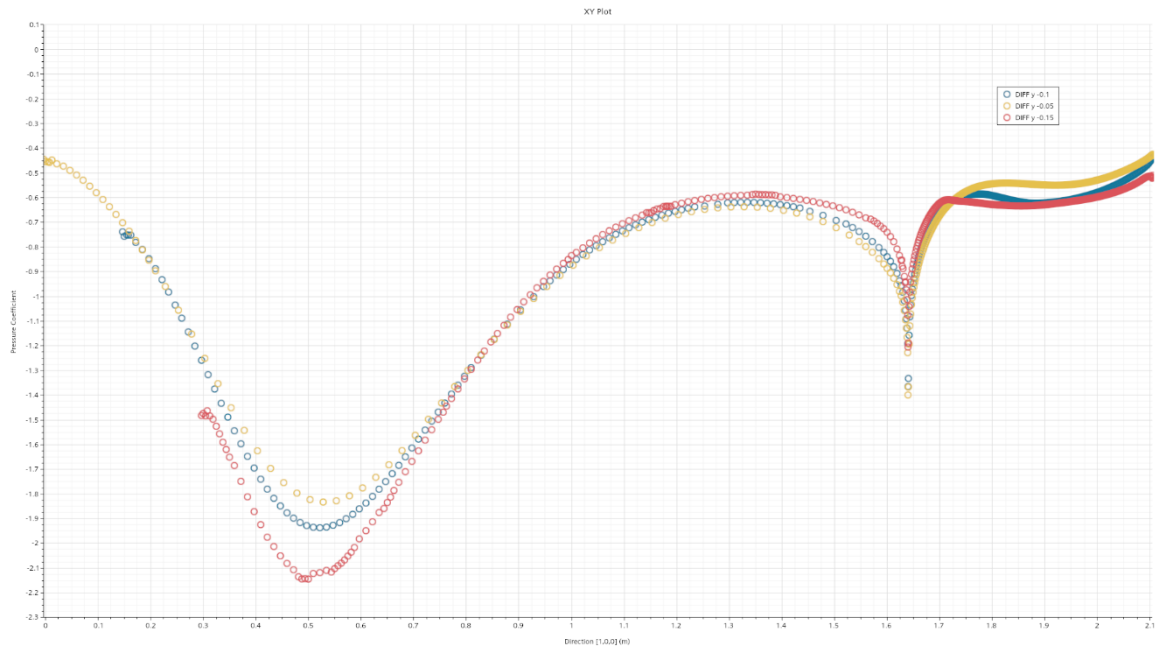


Figura 4.73 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m della simulazione con l'inclinazione a  $10^\circ$

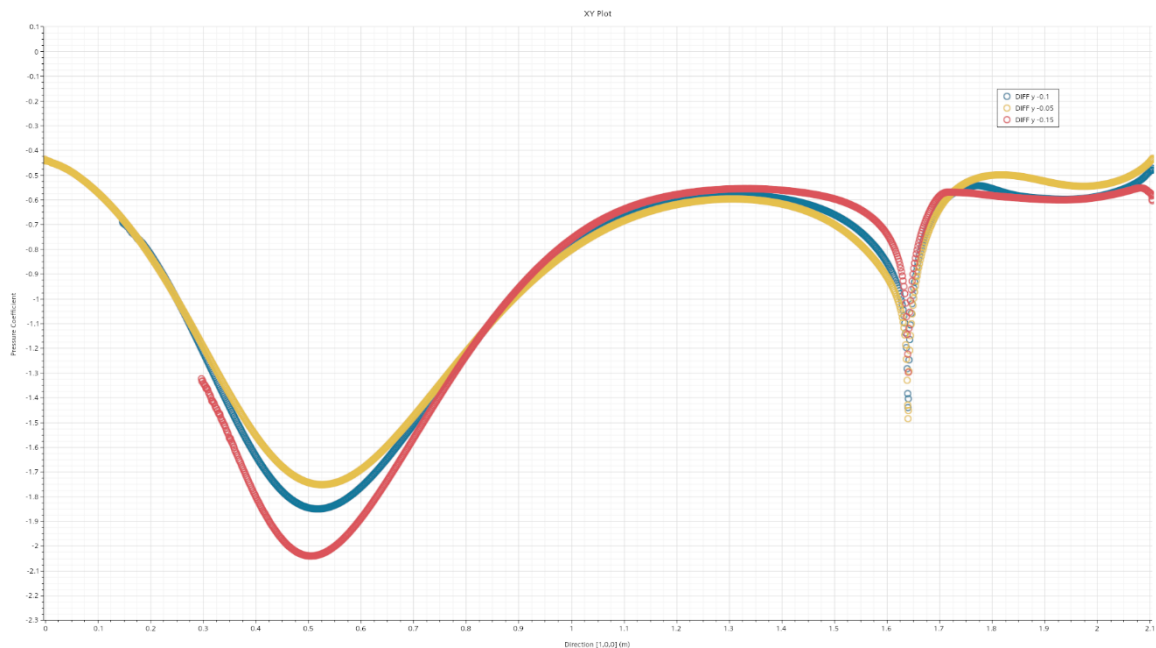


Figura 4.74 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m della simulazione con l'inclinazione a  $12^\circ$

Studiando le pressioni nella parte inferiore del veicolo (figura 4.75 e 4.76), si è osservata un'area di bassa pressione più estesa e un miglior funzionamento del fondo del veicolo.

Simcenter STAR-CCM+

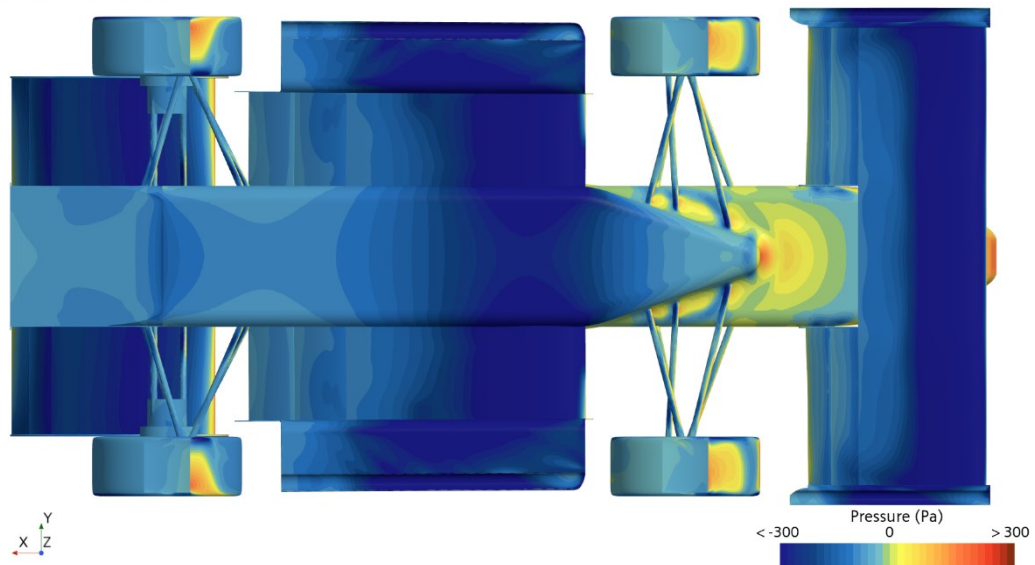


Figura 4.75 - Pressioni nella parte inferiore della macchina della simulazione con inclinazione a 10°

Simcenter STAR-CCM+

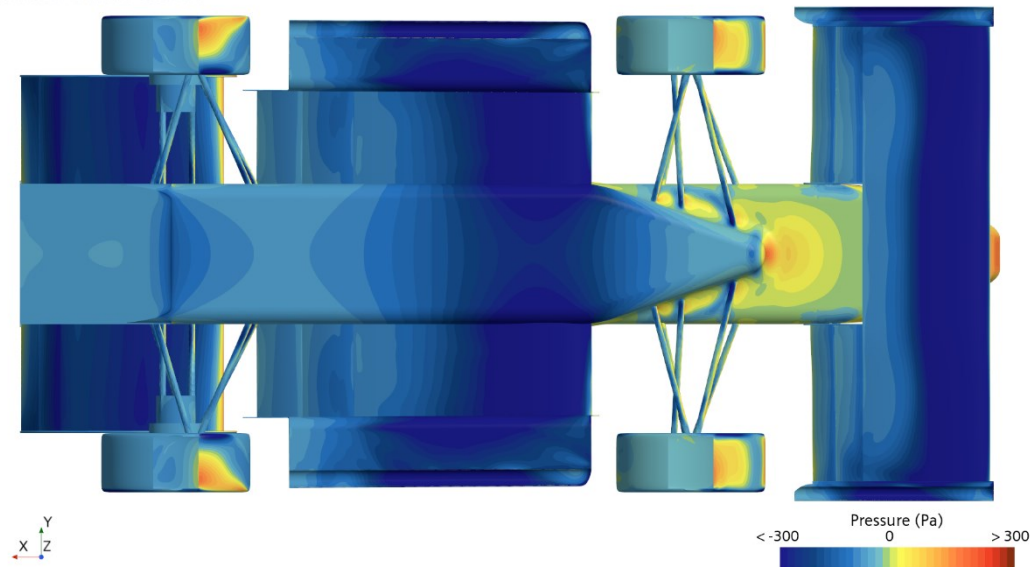


Figura 4.76 - Pressioni nella parte inferiore della macchina della simulazione con inclinazione a 12°

Infine, dai reports delle simulazioni (Tabella 4.13) si evidenzia non solo una down force e una drag complessiva migliore del veicolo, ma anche una down force superiore generata specificamente dal fondo e dal diffusore con inclinazione a 10°. Tale configurazione permette di generare un'elevata down force grazie a un miglioramento del funzionamento delle ground wing.

Tabella 4.13 - Reports simulazione con diffusore inclinato a 10°

<b>INCLINAZIONE 10°</b>	<b>DRAG</b>	<b>DOWNFORCE</b>	<b>CENTER OF LOADS</b>
<b>ALA ANTERIORE</b>	15,492 N	-110,624 N	-0,664 m
<b>GROUND WING</b>	24,080 N	-115,486 N	0,753 m
<b>FONDO E DIFFUSORE</b>	1,847 N	-48,566 N	0,958 m
<b>ALA POSTERIORE</b>	32,592 N	-110,158 N	1,828 m
<b>RUOTA ANTERIORE</b>	2,671 N	1,913 N	
<b>RUOTA POSTERIORE</b>	0,818 N	2,648 N	
<b>MONOCOQUE</b>	14,576 N	-11,862 N	1,067 m
<b>DIFFUSORE</b>	1,574 N	-7,795 N	1,861 m
<b>MACCHINA</b>	97,812 N	-376,206 N	0,720 m

Tabella 4.14 - Reports simulazione con diffusore inclinato a 12°

<b>INCLINAZIONE 12°</b>	<b>DRAG</b>	<b>DOWNFORCE</b>	<b>CENTER OF LOADS</b>
<b>ALA ANTERIORE</b>	14,934 N	-106,508 N	-0,664 m
<b>GROUND WING</b>	23,182 N	-104,708 N	0,751 m
<b>FONDO E DIFFUSORE</b>	1,683 N	-45,517 N	0,904 m
<b>ALA POSTERIORE</b>	32,502 N	-108,954 N	1,829 m
<b>RUOTA ANTERIORE</b>	2,884 N	1,323 N	
<b>RUOTA POSTERIORE</b>	2,084 N	2,517 N	
<b>MONOCOQUE</b>	15,499 N	-1,271 N	1,011 m
<b>DIFFUSORE</b>	1,845 N	-8,583 N	1.863 m
<b>MACCHINA</b>	98,139 N	-359,404 N	0,730 m

Pertanto, si può concludere che, poiché la configurazione con angolo di inclinazione a 10° ha dimostrato prestazioni superiori in tutti gli studi condotti, questa configurazione sarà utilizzata come base di partenza per le prossime simulazioni.

### 4.3.2 Inserimento del secondo diffusore

Dopo aver selezionato l'inclinazione ottimale del secondo livello del diffusore, è stata realizzata al CAD (figura 4.77) la modellazione del primo livello. Questo è stato creato come una lamina spessa 3 mm, posizionata a una distanza di 10 mm dal secondo livello. La lamina è stata posta in modo tale da risultare parallela al secondo livello e collegata a una seconda lamina, anch'essa spessa 3 mm, parallela al fondo del veicolo e dotata di un foro centrale per permettere il passaggio dell'aria.

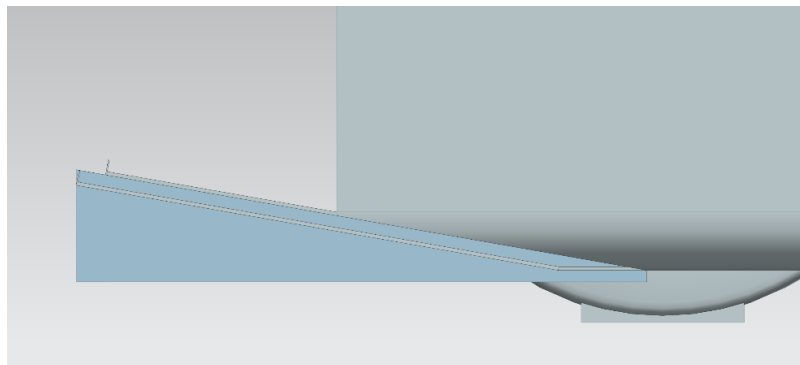


Figura 4.77 - CAD doppio diffusore

Conclusa la modellazione CAD, si è proceduto con l'analisi delle simulazioni per valutare le prestazioni aerodinamiche del sistema. L'analisi dei coefficienti di pressione (figura 4.78) ha evidenziato che la configurazione con il piano inclinato a  $10^\circ$  risulta migliore di  $-0,1$  in quasi tutte le zone analizzate.

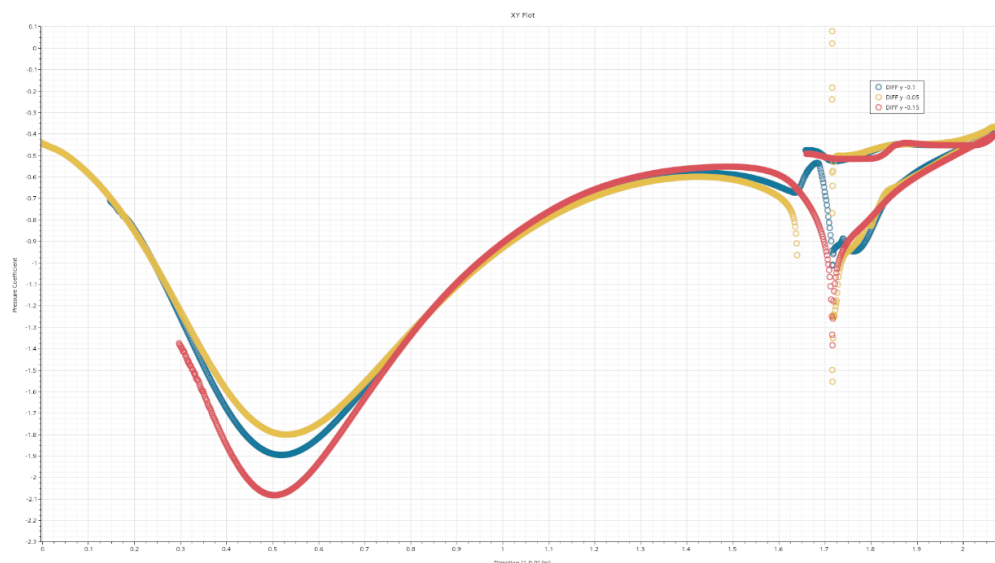


Figura 4.78 - Grafico del coefficiente di pressione a 0,1 m della simulazione con doppio diffusore

Per quanto riguarda le pressioni (figura 4.79 e 4.80), si sono osservati due comportamenti distinti nei due livelli del diffusore. Il primo livello ha mostrato un'ampia zona di bassa pressione, indicando un funzionamento efficiente. Il secondo livello, pur lavorando anch'esso, ha mostrato un'efficienza inferiore rispetto al primo livello.

Simcenter STAR-CCM+

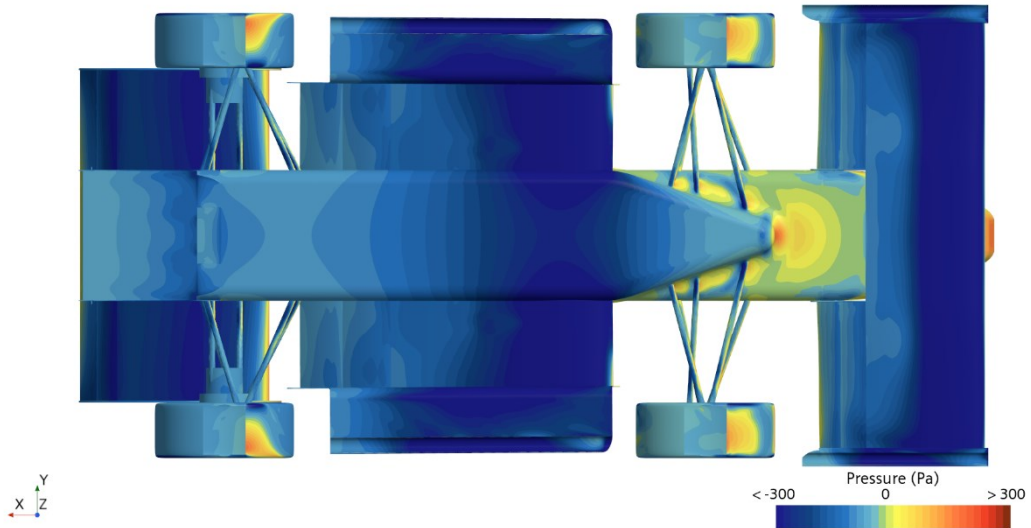


Figura 4.79 - Pressioni parte inferiore del primo livello di diffusore

Simcenter STAR-CCM+

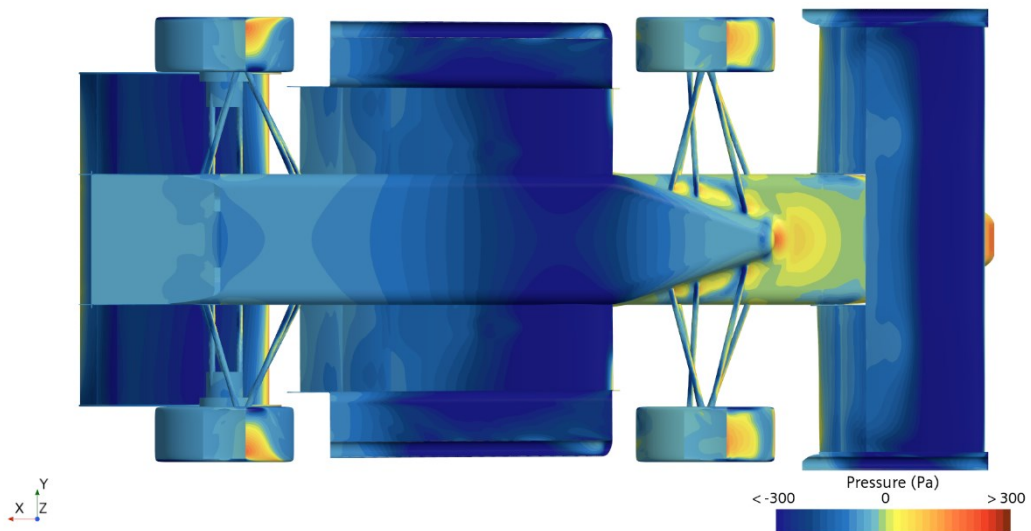


Figura 4.80 - Pressioni parte inferiore del secondo livello di diffusore

Analizzando la velocità del flusso lungo un piano posto sull'asse x (figura 4.81 e 4.82), è emerso che il flusso d'aria tra i due diffusori è particolarmente energizzato, mentre il flusso generato al secondo livello stalla immediatamente.

Simcenter STAR-CCM+

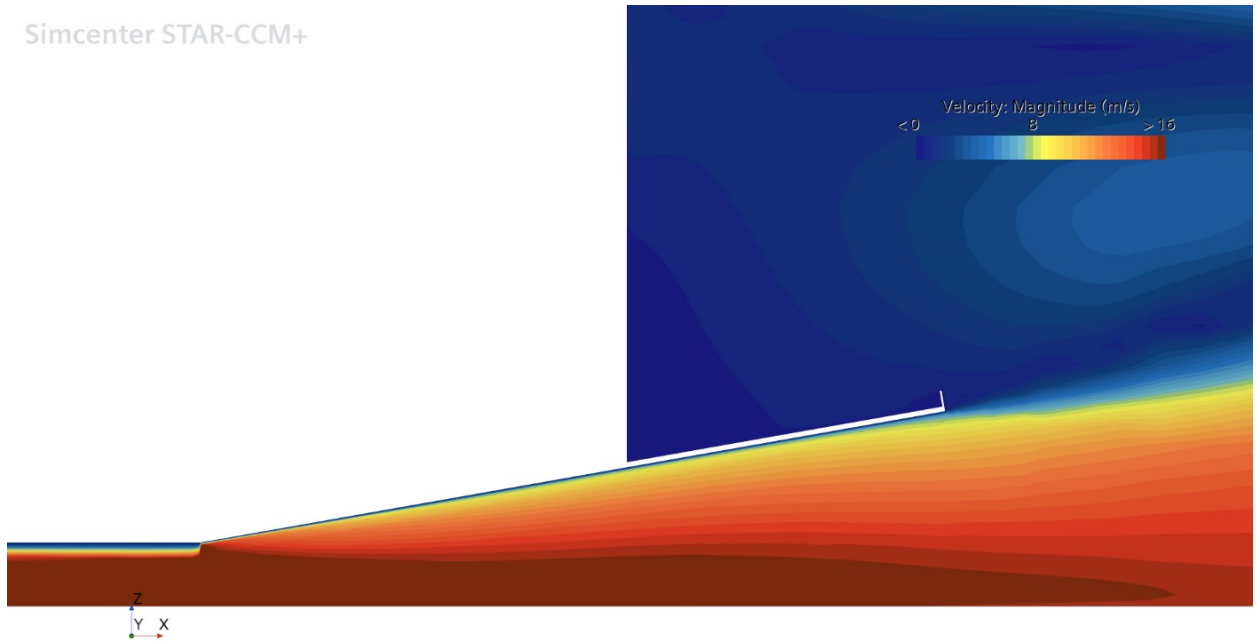


Figura 4.81 - Piano lungo la direzione x con la velocità nella simulazione con inclinazione a 10°

Simcenter STAR-CCM+

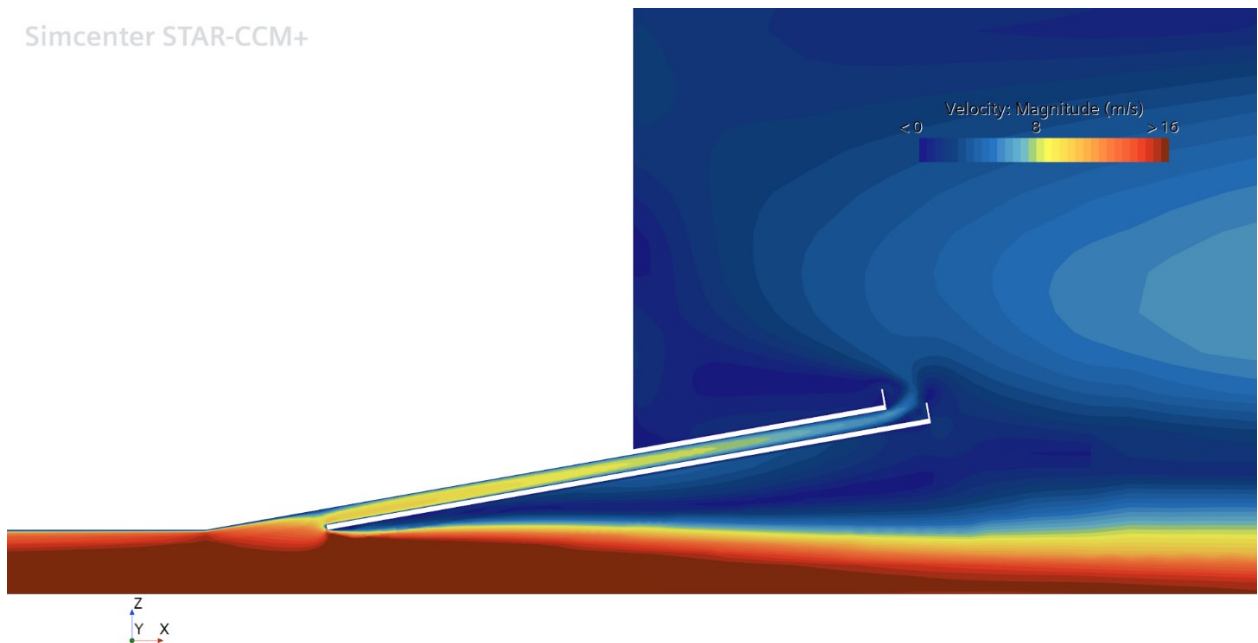


Figura 4.82 - Piano lungo la direzione x con la velocità nella simulazione con doppio diffusore

I reports delle simulazioni (tabella 4.15) hanno indicato un miglioramento complessivo della downforce del veicolo e del diffusore rispetto alla configurazione precedente.

In conclusione, la modifica apportata ha dimostrato di migliorare le prestazioni aerodinamiche, ma ulteriori prove e ottimizzazioni sono necessarie per perfezionare il design del diffusore.

Tabella 4.15 - Reports simulazione doppio diffusore

<b>DOPPIO DIFFUSORE</b>	<b>DRAG</b>	<b>DOWNFORCE</b>	<b>CENTER OF LOADS</b>
<b>ALA ANTERIORE</b>	15,609 N	-111,780 N	-0.664 m
<b>GROUND WING</b>	25,379 N	-113,660 N	0.765 m
<b>FONDO E DIFFUSORE</b>	1,597 N	-48,171 N	0,913 m
<b>ALA POSTERIORE</b>	32,788 N	-109,508 N	1,830 m
<b>RUOTA ANTERIORE</b>	2,619 N	1,730 N	
<b>RUOTA POSTERIORE</b>	0,457 N	2,659 N	
<b>MONOCOQUE</b>	15,195 N	-2,742 N	1,034 m
<b>DIFFUSORE</b>	1,253 N	-6,976 N	1,787 m
<b>MACCHINA</b>	98,379 N	-377,914 N	0,720 m

## Conclusioni e sviluppi futuri

Sulla base degli studi e delle analisi condotte, possiamo affermare che l'obiettivo della tesi è stato raggiunto con successo per entrambe le configurazioni esaminate. Tuttavia, la configurazione che si è dimostrata la più efficace è la seconda, caratterizzata dalla presenza del doppio diffusore.

Questa configurazione non solo ha prodotto una maggiore deportanza complessiva del veicolo, ma ha anche migliorato il funzionamento del fondo e delle ground wing, consentendo loro di operare in modo più efficiente. L'analisi dei coefficienti di pressione ha evidenziato un miglioramento diffuso in tutte le zone analizzate, con un flusso d'aria più energizzato tra i due livelli del diffusore. Tuttavia, è importante sottolineare che questa soluzione è ancora in una fase "embrionale" e richiede ulteriori sviluppi per essere ottimizzata completamente.

Per perfezionare la configurazione ottimale del diffusore, sono suggeriti i seguenti sviluppi futuri:

- **Riduzione dell'Area tra i Due Livelli del Diffusore:** Una delle prime modifiche da considerare è la riduzione dell'area tra il primo e il secondo livello del diffusore. Questa modifica dovrebbe aumentare la velocità del flusso d'aria tra i due livelli, migliorando ulteriormente le prestazioni aerodinamiche. La diminuzione dell'area può essere ottenuta riducendo la distanza verticale tra i due piani o restringendo la sezione trasversale del flusso.
- **Modifica della Distanza tra i Due Livelli:** Un'altra area di indagine riguarda la modifica della distanza tra il primo e il secondo livello del diffusore. Variando questa distanza, sarà possibile identificare la configurazione ottimale che massimizza la deportanza e minimizza la resistenza aerodinamica. Sarà importante condurre una serie di simulazioni per determinare il gap ideale.
- **Aggiunta di Strake:** L'aggiunta di strake può contribuire a migliorare il controllo del flusso d'aria e a ridurre i vortici indesiderati. Questi elementi aerodinamici possono aiutare a mantenere un flusso più stabile e diretto, incrementando le prestazioni complessive del diffusore.
- **Implementazione di Micro-Aerodinamica:** L'introduzione di dispositivi di micro-aerodinamica, come vortex generator e altri dispositivi simili, può aiutare a migliorare ulteriormente il flusso d'aria intorno al diffusore e al veicolo nel suo



complesso. Questi dispositivi possono essere particolarmente efficaci nel ritardare la separazione del flusso e nel migliorare la stabilità del veicolo.

In questa tesi, il lavoro si è concentrato esclusivamente sulla modellazione CAD e sull'analisi CFD, senza considerare aspetti come i materiali da utilizzare, le prove strutturali e i fissaggi. Tuttavia, tali considerazioni saranno essenziali se si desidera laminare e costruire un modello fisico della vettura futura. Sarà fondamentale valutare i materiali appropriati per garantire leggerezza e resistenza, oltre a progettare soluzioni di fissaggio che assicurino stabilità e facilità di manutenzione.

Ulteriori sviluppi dovrebbero includere anche test in galleria del vento e prove su pista per validare i risultati ottenuti dalle simulazioni CFD. Questi test sperimentali permetteranno di raccogliere dati reali e di verificare le prestazioni aerodinamiche in condizioni operative reali. Inoltre, sarà importante esplorare l'integrazione del diffusore con altri componenti aerodinamici del veicolo, come l'ala posteriore e il fondo piatto, per ottimizzare l'intero pacchetto aerodinamico.

In conclusione, mentre i risultati ottenuti finora sono promettenti, ulteriori ricerche e sviluppi sono necessari per ottimizzare completamente il design del diffusore e per procedere verso la realizzazione fisica del modello. Questi sforzi contribuiranno a migliorare significativamente le prestazioni della vettura di Formula SAE, avvicinandosi sempre di più agli obiettivi di eccellenza ingegneristica e competitività.

## Bibliografia

- External Aerodynamics with STAR-CCM+; Best Practice Guidelines, 2018, Siemens.
- Formula Student Rules, Version 1.0, 2024.
- Come ho progettato il mio sogno, Adrian Newey, CDMEDIZIONI.
- "Fundamentals of Aerodynamics" di John D. Anderson: un riferimento completo sulle basi dell'aerodinamica, incluse le teorie di Prandtl e Kutta-Joukowski.
- "Fluid Mechanics" di Frank M. White: copre i concetti fondamentali di fluidodinamica, inclusa la formazione di vortici.
- Petricca M.: Miglioramento delle prestazioni dell'ala anteriore di una vettura di formula Sae, 2023, tesi di laurea triennale, Università Politecnica delle Marche.
- Cicchini A.: L'aerodinamica di una vettura formula SAE a trazione elettrica, 2021, tesi di laurea triennale, Università Politecnica delle Marche.
- Trisciani A.: Studio sulla funzione aerodinamica delle sospensioni di una vettura di Formula Sae, 2020, tesi di laurea triennale, Università Politecnica delle Marche.
- Crivellini A., slide lezione 9 corso di Fluidodinamica, Equazioni di Navier-Stokes in forma adimensionale e forze di resistenza e portanza.
- Crivellini A., slide lezione 10 corso di Fluidodinamica, Vorticità, viscosità ed approssimazione delle equazioni di Navier-Stokes.

## Sitografia

- Airfoil Tools: NACA CH10 digit airfoil generation.
- Motorsport.com: articoli sul diffusore della Brawn GP.

## Software utilizzati

- Siemens STAR CCM+ 2021.1.1: simulazioni CFD.
- NX Siemens: modellazione CAD.

# Ringraziamenti

Dopo questi anni ricchi di sfide e traguardi, eccomi arrivato alla conclusione di questo percorso di laurea. In particolare, desidero esprimere la mia gratitudine verso alcune persone la cui presenza è stata fondamentale per alleviare i momenti più difficili. Senza il loro sostegno e incoraggiamento, non sarei riuscito a superare le prove più dure.

Vorrei iniziare questi ringraziamenti esprimendo la mia gratitudine al Professor Andrea Crivellini, relatore di questa tesi, per avermi concesso l'opportunità di lavorare su questo progetto, e per la sua costante disponibilità.

Ringrazio i miei genitori, Nicola e Maria Cristina, nonché “sponsor” e primi sostenitori in questi anni e in quelli prima, i quali, oltre a non avermi fatto mancare mai nulla, dandomi ogni tanto anche più del dovuto (continue così), mi hanno sostenuto anche nei momenti più “bui”.

Ringrazio mia sorella Renata per il sostegno, le risate e le chiacchierate in cui mi lamentavo costantemente, nelle quali lei risolveva tutto con una parola: “studia”.

Ringrazio mia nonna Renata e mio nonno Iginò per il sostegno morale ed economico, per le preghiere che hanno fatto per ogni mio esame e soprattutto per il cibo fornito. Anche se nonno non c'è più spero di averlo fatto sorridere come quella volta con la coppa della vittoria di Magliano.

Ringrazio zia Gabriella e zio Alessandro per essermi stati vicini nei momenti più duri, per le videochiamate portafortuna preesame e soprattutto per le mangiate ai ristoranti gentilmente offerte.

Ringrazio la mia ragazza Sofia, la quale è stata essenziale in questi anni, per essermi stata sempre vicino anche nei momenti in cui ero particolarmente nervoso e ringrazio anche la sua famiglia per gli innumerevoli passaggi in macchina per tornare giù e per il cibo fornito (brownie e cornetti alla nutella).

Ringrazio i miei “vecchi” coinquilini e compagni di avventura Francesco Zuccarino, caduto di battaglia con cui condivido innumerevoli ricordi, Marcello Passarella, il quale oltre a essere stato autore di ottimi “show” è stato un “professore” sempre disponibile per chiarimenti, infine per ultimo, ma non per importanza il dottor Marco Traini, il quale mi ha salvato da una reazione allergica, ma io ho contraccambiato salvandolo da un pollo.

Ringrazio Teodor Parlikov (noto come Il Bulgaro) compagno di corso, di palestra e di risate, con il quale ho potuto studiare e affrontare gli esami fino all'ultimo, ma soprattutto per

avermi deliziato con la sua cucina. Insieme a lui ringrazio Gabriele e Giulia con cui ho condiviso svariati momenti di quest'ultima tappa del mio percorso.

Ringrazio gli amici di Lanciano compagni di avventura fin dall'inizio.

Un ringraziamento particolare va a Nicola Miccoli, per i messaggi di incoraggiamento e senza il quale non avrei potuto scrivere la tesi, Aldo Marfisi e Luca Di Lallo (noto come Di Sballo) per i discorsi filosofici fatti su discord.

È doveroso un ringraziamento ad Alessio Trisciani, capo reparto di aereodinamica della squadra, il quale tra una risata e l'altra (e un ritardo e un altro) mi ha insegnato a utilizzare il software per i CAD della squadra e quello per il CFD. Insieme ad Alessio devo ringraziare Elisa Rinaldi per avermi dato una mano con le prime simulazioni (risultate tutte sbagliate) e Mattia Pettrica ex membro del Polimarche, il quale mi ha fornito dei consigli importanti per questa tesi. Infine, vorrei ringraziare il Polimarche racing Team, per avermi dato la possibilità di fare questo tirocinio e per avermi ospitato in questi tre mesi come se fossi uno di loro.

Infine, vorrei anche ringraziare degli amici di vecchia data con cui ho potuto affrontare delle avventure inimmaginabili senza i quali probabilmente non avrei mai scritto questa tesi. Il primo è l'Ingegnere Emanuele Fanci (noto come Ingegnere Karterissimo) con il quale nei tempi "d'oro" ho potuto condividere la passione per un tubo d'acciaio con quattro ruote e un motore, ovvero per un go-kart e insieme a lui devo ringraziare Riccardo e Tommaso Spoltore i quali insieme a mio padre hanno alimentato questa passione.

