



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

A.a. 2023/2024

Sessione di Laurea di Dicembre 2024

**Valutazione della resistenza aerodinamica di
un veicolo all'implementazione di diverse
configurazioni geometriche del sistema
air curtain**

Relatore:

Prof. D'Ambrosio Domenic

Candidato:

Simone Comisso

Tutor:

Ing. Gautero Matteo

Ing. Paola Nicola



**Politecnico
di Torino**



**Politecnico
di Torino**

In collaborazione con



Questa attività di Tesi è stata svolta presso gli uffici Aerothermal del Safety Center di Stellantis di Orbassano (To) sotto la supervisione dell'Ing. Gautero Matteo e dell'Ing. Paola Nicola, a cui vanno particolari ringraziamenti per la pazienza e la disponibilità messe a disposizione.



**Politecnico
di Torino**



**Politecnico
di Torino**

ABSTRACT

The development of modern CFD simulation codes has had a significant impact on reducing costs for testing and modeling. In addition, the use of software allows unlimited and relatively short time changes to any component or part of a vehicle model to meet the requirements and constraints imposed by the manufacturer and the needs of buyers.

During this thesis we will focus on the modeling and optimization of the geometry of the air curtain system on Alfa Romeo Tonale 965 using the modeling software Ansa Beta Cae and the fluid dynamics simulation code Star-CCM+.

The air curtain, commonly called "blowing", is an innovative technology used in several modern cars to ensure improved aerodynamic efficiency: this channeling system is a technology mainly adopted on sports class cars with the aim of reducing aerodynamic drag, but it is also adopted on cars sold to the public, achieving significant benefits in terms of consumption and emissions.

The objective of this activity is to find some significant parameters and configurations of such system that will allow to improve the aerodynamic efficiency compared to the model currently on the market.

After a brief introduction on the historical evolution of car aerodynamics, the physical principles and techniques used for determining the final product will be described, paying particular attention to the distinction between modern calculation codes used in CFD and wind tunnel testing.

The sensitivity phase on the air curtain system will be described next, with the definition of the parameters useful for determining a configuration that guarantees an improvement in the aerodynamic coefficient (C_x) associated with the definition of aerodynamic drag.



**Politecnico
di Torino**



**Politecnico
di Torino**

INDICE

1. Introduzione all'aerodinamica delle automobili	13
1.1 Inquadramento storico	
1.2 Componenti utilizzati per l'aerodinamica dell'automobile	
1.3 Il modello di riferimento: Alfa Romeo Tonale	
1.4 Le auto della concorrenza	
2. L'aerodinamica dell'automobile	23
2.1 Il problema aerodinamico: la stima delle forze agenti sul veicolo	
2.1.1 Il meccanismo di formazione della resistenza aerodinamica	
2.1.2 La resistenza aerodinamica delle ruote	
3. Le differenze tra calcoli CFD e test in galleria del vento	30
3.1 Codici di calcolo per la Computational Fluid Dynamics	
3.1.1 Software & Hardware	
3.1.2 Impostazione della simulazione – Modellazione su ANSA e mesh superficiale	
3.1.3 La mesh di volume	
3.1.4 La fisica del problema	
3.2 La galleria del vento e le sue caratteristiche	
3.2.1 Le gallerie automotive	
4. Il sistema air curtain	55
4.1 Il principio di funzionamento del sistema air curtain	
4.2 Ottimizzazione del sistema air curtain	
5. La fase di sensitivity del sistema air curtain	65
5.1 Caso di riferimento	
5.2 Prima fase di sensitivity	
5.3 Seconda fase di sensitivity	
5.4 Terza fase di sensitivity	
5.5 Quarta fase di sensitivity	
5.6 Quinta fase di sensitivity	
5.7 Sesta fase di sensitivity	
6. Conclusioni	90
7. Bibliografia	96



**Politecnico
di Torino**



**Politecnico
di Torino**

INDICE DELLE FIGURE

1. Introduzione all'aerodinamica delle automobili	13
1.1 La prima automobile elettrica	
1.2 Ford Modello T	
1.3 Spoiler posteriore	
1.4 Diffusori	
1.5 Side skirt	
1.6 Alfa Romeo Tonale	
1.7 Alfa Romeo Tonale (posteriore)	
1.8 Alfa Romeo 8C da competizione (posteriore)	
1.9 BMW Serie 3	
1.10 Audi A4	
1.11 Tesla Model S	
1.12 Hyundai Sonata (2021)	
2. L'aerodinamica dell'automobile	23
2.1 Vortici longitudinali ($\alpha \approx 30^\circ$)	
2.2 Andamento $C_D - \alpha$	
2.3 Visualizzazione $C_{p,tot} = 0$	
3. Le differenze tra calcoli CFD e test in galleria del vento	30
3.1 Discretizzazione tramite differenze finite	
3.2 Discretizzazione tramite volumi finiti	
3.3 Diagramma delle fasi per il campo subsonico	
3.4 Inlet subsonico	
3.5 Outlet subsonico	
3.6 Inlet supersonico	
3.7 Outlet supersonico	
3.8 Visualizzazione PiD	
3.9 PiD air curtain	
3.10 Visualizzazione mesh superficiale	
3.11 Mesh air curtain	
3.12 Mesh di volume – Dominio computazionale	
3.13 Dettaglio dominio di calcolo	
3.14 Dominio di calcolo – Visualizzazione inlet e outlet	
3.15 Vista in pianta di una galleria del vento	
3.16 Sistema di aspirazione dello strato limite distribuito	



- 3.17 Moving belt parziale
- 3.18 Moving belt
- 3.19 Braccetti per la rotazione delle ruote

4. Il sistema air curtain	55
4.1 Modello CAD Alfa Romeo Tonale	
4.2 Dettaglio inlet air curtain Tonale	
4.3 Vista frontale (sezione inlet)	
4.4 Vista laterale (esterna)	
4.5 Vista laterale (interna) + outlet	
4.6 AGS aperto	
4.7 AGS chiuso	
4.8 Ingressi del sistema air curtain (sistema AGS, "parte centrale" e fendinebbia)	
4.9 Duct roll +5°	
4.10 Passaruota (lokary) interno	
4.11 Passaruota (lokary) esterno	
4.12 Paraurti laterale (esterno)	
4.13 Allineamento inlet-outlet	
4.14 Disallineamento inlet-outlet	
4.15 0 fins	
4.16 3 fins	
4.17 5 fins	
5. La fase di sensitivity del sistema air curtain	65
5.1 Coefficiente di pressione	
5.2 Coefficiente di pressione	
5.3 Coefficiente di pressione	
5.4 X-Z Velocity plane – Top (Z = 0.249 m)	
5.5 Dettaglio Velocity plane - air curtain	
5.6 Air curtain	
5.7 X-Z Velocity plane – Top (Z = 0.249 m)	
5.8 Dettaglio Velocity plane - air curtain	
5.9 Coefficiente di pressione	
5.10 X-Z Velocity plane – Top (Z = 0.249 m)	
5.11 Dettaglio Velocity plane - air curtain	
5.12 Coefficiente di pressione	
5.13 X-Z Velocity plane – Top (Z = 0.249 m)	
5.14 Dettaglio Velocity plane - air curtain	
5.15 Coefficiente di pressione	



**Politecnico
di Torino**

- 5.16 Air curtain
- 5.17 X-Z Velocity plane – Top ($Z = 0.249$ m)
- 5.18 Dettaglio Velocity plane - air curtain
- 5.19 Coefficiente di pressione
- 5.20 Air curtain
- 5.21 Air curtain
- 5.22 X-Z Velocity plane – Top ($Z = 0.249$ m)
- 5.23 Dettaglio Velocity plane - air curtain
- 5.24 Coefficiente di pressione
- 5.25 Air curtain
- 5.26 X-Z Velocity plane – Top ($Z = 0.249$ m)
- 5.27 Dettaglio Velocity plane - air curtain
- 5.28 Coefficiente di pressione

6. Conclusioni	90
6.1 Confronto Area inlet – Portata	
6.2 Confronto $A_{in} - K$	
6.3 Confronto $K - \Delta C_x$	
6.4 Confronto $A_{out} / A_{in} - \Delta C_x$	



**Politecnico
di Torino**



**Politecnico
di Torino**

1. INTRODUZIONE ALL'AERODINAMICA DELLE AUTOMOBILI

Il primo capitolo di questo documento si pone l'obiettivo di descrivere il contesto storico in cui ha cominciato a svilupparsi, soprattutto nell'ultimo secolo, l'interesse nel comprendere l'aerodinamica delle automobili e di come si sia evoluta nel tempo, con le relative considerazioni sulla performance.

Verranno poi descritti i principali sistemi/componenti che attualmente vengono applicati sulle automobili per migliorarne l'aerodinamica esterna.

Successivamente verrà prestata attenzione al modello di veicolo utilizzato durante questa attività di tesi e si eseguirà un breve presentazione delle automobili dei competitor che adottano il dispositivo aerodinamico oggetto di questa tesi.

1.1 Inquadramento storico

La nascita dell'automobile nel diciannovesimo secolo ha drasticamente cambiato le abitudini dell'uomo e notevolmente migliorato la sua capacità di spostamento su lunghe tratte prima non fattibili data la mancanza di veicoli efficienti di questo tipo.

L'evoluzione dell'automobile è stata, quindi, uno dei principali obiettivi su cui si è concentrato lo sviluppo tecnologico del tempo.

Il primo ostacolo significativo presentatosi nella sua evoluzione è stata la scelta del tipo di motorizzazione, dal momento che erano presenti sia automobili elettriche che alimentate da un motore a combustibile.

Il dibattito fu terminato da Henry Ford quando, nel 1908, produsse in massa la Modello T, la cui tecnologia permise di ridurre il costo delle auto a benzina di circa due terzi rispetto alle auto elettriche del tempo, permettendo anche spostamenti su distanze maggiori. [10]



1.1 La prima automobile elettrica



**Politecnico
di Torino**



1.2 Ford Modello T

L'evoluzione tecnologica sulle automobili cominciò a svilupparsi in ogni ambito: inizialmente i produttori si concentravano su chi avesse l'auto più veloce, più affidabile o più sicura, tuttavia a partire dagli anni '20 del secolo scorso gli ingegneri cominciarono a interessarsi anche all'aerodinamica dell'automobile, problema critico per il miglioramento delle prestazioni e delle emissioni. Infatti, una resistenza all'avanzamento più bassa (come vedremo successivamente, proporzionale al quadrato della velocità), permetteva di raggiungere, a parità di potenza del motore, velocità più elevate oppure, dall'altro lato, le medesime velocità potevano essere raggiunte con potenze del motore più basse, abbattendo quindi i costi di produzione delle unità di potenza.

Particolare interesse nello studio della riduzione della resistenza aerodinamica si ebbe soprattutto attorno al 1950 con la nascita del motorsport, in cui si ricercava il design migliore che garantisse anche la massima performance in pista.

A partire dagli anni '60 gli sviluppi portati nell'ambito del motorsport furono anche applicati al mercato clienti dell'industria automobilistica. In questo periodo l'obiettivo principale non divenne più la ricerca della massima performance, utile principalmente nel caso delle gare automobilistiche, ma la massima efficienza. Per questo motivo, nello sviluppo dell'automobile vennero coinvolte le diverse aree che concorrevano alla realizzazione del prodotto finale.

Al giorno d'oggi le case automobilistiche si pongono come obiettivo principale la ricerca delle migliori prestazioni in ogni possibile scenario in cui la vettura si trovi ad operare, con particolare attenzione alle emissioni, divenute ormai una delle principali cause a cui viene attribuito il cambiamento climatico e oggetto di normative sempre più stringenti, che andranno necessariamente a influenzare il costo da sostenere da parte dell'acquirente.



**Politecnico
di Torino**

1.2 Componenti utilizzati per l'aerodinamica dell'automobile

In questo paragrafo vengono presentati brevemente i dispositivi utilizzati per migliorare la qualità delle forze aerodinamiche agenti sulle autovetture.

Questi componenti vengono applicati in regioni differenti dell'automobile e possono essere applicati singolarmente oppure accoppiati tra loro a seconda dell'effetto risultante che si vuole ottenere.

I componenti che generalmente vengono utilizzati in ambito aerodinamico sulle automobili sono:

- Spoiler, probabilmente i dispositivi aerodinamici più conosciuti al pubblico. La loro forma si riconduce a quella di un'ala e solitamente vengono montati sulla parte superiore-posteriore del veicolo. Il loro scopo è quello di creare un contributo deportante che contribuisca a ridurre la forza di portanza (che verrà descritta in seguito) a cui è soggetto il veicolo, aumentando l'aderenza della regione posteriore della vettura al suolo. Tramite l'utilizzo dei codici di simulazione CFD è possibile osservare che la presenza di uno spoiler riduca di circa il 30% il coefficiente di portanza di un'automobile. D'altra parte, l'introduzione di un'ulteriore superficie esterna comporta un conseguente aumento del contributo di resistenza aerodinamica pari a circa il 5%.



1.3 Spoiler posteriore



**Politecnico
di Torino**

- Diffusori, sono uno dei dispositivi più utilizzati al giorno d'oggi per l'aerodinamica, ma vengono utilizzati anche per un fattore estetico vero e proprio. Essi sono costituiti da un sistema di canalizzazioni convergenti localizzato in corrispondenza della parte inferiore dell'automobile e utilizzati per accelerare il flusso d'aria in tale regione, con il conseguente abbassamento della pressione relativa.

La creazione di un flusso a bassa pressione sulla regione inferiore dell'automobile rispetto alla zona superiore permette di aumentare l'aderenza del veicolo al terreno.

È importante osservare che alcune configurazioni particolari di diffusori siano in grado di ridurre anche la resistenza complessiva, abbattendo il livello di turbolenza che si crea a valle della vettura quando la corrente lascia la sua superficie. Questi dispositivi, insieme alle ali posteriori precedentemente descritte, vengono soprattutto utilizzati nelle auto da competizione, dove la ricerca della massima aderenza del veicolo al suolo e la massima performance la fanno da padrone. [11]



1.4 Diffusori

- Side Skirt, sono dei componenti generalmente utilizzati sulle auto sportive al fine di incrementare il cosiddetto "effetto suolo", cercando di rendere il sottoscocca il più isolato possibile dall'aria esterna proveniente lateralmente, la quale genererebbe ulteriori perdite nel flusso. Sono dei dispositivi che, come i diffusori, servono a far accelerare la corrente nella regione inferiore al veicolo al fine di abbassarne la pressione relativa rispetto alla parte superiore, generando come effetto risultante una forza deportante.



**Politecnico
di Torino**



1.5 Side Skirt

- Air curtain, i quali, a differenza degli altri componenti precedentemente descritti, non vengono utilizzati per aumentare la (de)portanza dell'automobile, ma sono dei dispositivi utili alla riduzione della resistenza di scia dell'autoveicolo. Maggiori dettagli su questo dispositivo verranno forniti di seguito nel documento, in quanto tale componente sarà oggetto di questa attività di tesi.



1.4 Il modello di riferimento: Alfa Romeo Tonale



1.6 Alfa Romeo Tonale

Il modello Alfa Romeo Tonale è stato presentato dall'omonima casa automobilistica Alfa Romeo al Salone dell'Auto di Ginevra nel 2019. Il Tonale è il secondo SUV prodotto dalla casa italiana e ne rappresenta il primo passo significativo verso l'elettrificazione dei mezzi, attraverso soluzioni ibride (MHEV, Mild-Hybrid Electric Vehicle) e plug-in (PHEV, Plug-in Hybrid Electric Vehicle), capaci di raggiungere target di potenza fino ai 280 CV.

Di seguito viene riportata la sua scheda tecnica. [8]

<i>Lunghezza</i>	4530 mm
<i>Largezza</i>	1840 mm
<i>Altezza</i>	1600 mm
<i>Passo</i>	2630 mm
<i>Numero posti</i>	5
<i>Capienza bagagliaio</i>	500 litri (450 litri sulla versione PHEV)
<i>Alimentazione motore</i>	MHEV, PHEV, diesel
<i>Classe</i>	Euro 6D
<i>Potenza motore (CV-kW)</i>	130 CV - 96 kW



**Politecnico
di Torino**

Lo stile del modello attuale (2022) risulta essere leggermente diverso rispetto al concept lanciato nel 2019: le fiancate pulite in cui spiccano i cerchi in lega a 5 fori con un diametro da 17 e 20 pollici. Il lunotto curvo posteriore rimanda all'iconica Alfa Romeo 8C da competizione, mentre nella parte anteriore spiccano i gruppi ottici che si sviluppano in tutta la larghezza e dotati di tecnologia LED.



1.7 Alfa Romeo Tonale (posteriore)



1.8 Alfa Romeo 8C da competizione (posteriore)



**Politecnico
di Torino**

Per quanto riguarda la tecnologia utile alla sicurezza, il Tonale possiede un sistema di cruise control dotato anche del controllo della carreggiata, un sistema di frenata automatica in caso di emergenza, l'assistenza alla guida in colonna, oltre che il controllo della stanchezza del conducente, il controllo dell'angolo cieco e di avviso della presenza di ostacoli utilizzato in fase di retromarcia.

Per la motorizzazione, come citato nella scheda tecnica, per il Tonale l'Alfa Romeo ha puntato prevalentemente su una gamma ibrida, a cui viene affiancata anche una versione diesel. Per la versione MHEV è previsto un motore da 1500 cc con un sistema elettrico a 48 V erogante 15 kWh di potenza e 55 Nm di coppia in due possibili declinazioni in termini di potenza complessiva da 130 CV o 160 CV.

La motorizzazione che garantisce la massima potenza (280 CV) è la versione plug-in (PHEV) costituita da un motore da 1300 cc turbo-benzina montato sull'avantreno a cui si aggiunge un motore elettrico posteriore da 120 CV, alimentato da una batteria di 15.5 kWh di potenza.

Il modello con motore diesel è da 1600 cc di cilindrata con 320 Nm di coppia, con cambio automatico a 6 marce.

I consumi dipendono in maniera rilevante dal percorso, tuttavia si stima che la versione MHEV da 130-160 CV consumi 5.7-6.5 litri ogni 100 km, mentre con la versione diesel il consumo si dovrebbe abbassare leggermente a 5.3-5.9 litri ogni 100 km.

In termini di emissioni di CO₂ combinate, il modello MHEV si stima che ne produca circa tra i 120-130 g/km. [13]

La vera efficienza dovrebbe essere raggiunta con la motorizzazione plug-in che garantirebbe un consumo di 1.1-1.5 litri ogni 100 km grazie alla batteria da 15.5 kWh, la quale permetterebbe circa 69 km di autonomia in modalità esclusivamente elettrica. [8]

Per quanto riguarda i costi da sostenere da parte dell'acquirente, essi variano a seconda degli optional e del tipo di motorizzazione.



**Politecnico
di Torino**

1.5 Le auto della concorrenza

Viene fornita ora una breve carrellata di modelli appartenenti alle case automobilistiche della concorrenza, utile a far comprendere al lettore la classe di veicoli che adottano la tecnologia degli air curtain (in italiano chiamate anche "soffiature"), ovvero il sistema di canalizzazione dell'aria utilizzato per il miglioramento della resistenza aerodinamica, la cui sezione di ingresso è generalmente localizzata in corrispondenza del paraurti anteriore e outlet localizzato nel passaruota anteriore e che sarà oggetto di questa tesi.



1.9 BMW Serie 3



1.10 Audi A4



**Politecnico
di Torino**



1.11 Tesla Model S



1.12 Hyundai Sonata (2021)

Come si può osservare da questa breve presentazione, le auto su cui viene applicata questa tecnologia appartengono a una categoria sportiva, caratterizzate da una fascia di costo medio-alta.



2. L'AERODINAMICA DELL'AUTOMOBILE

2.1 Il problema aerodinamico: la stima delle forze agenti sul veicolo

Lo studio del problema aerodinamico è ormai di particolare rilevanza in diversi ambiti di applicazione. L'approccio adottato per tale problema può essere di due tipi:

- *sperimentale*, basato sull'attività di sperimentazione in galleria del vento. Questo approccio richiede la necessità di un opportuno impianto di sperimentazione e della sensoristica necessaria per l'acquisizione dei dati. Questa tecnica permette di raggiungere numeri di Reynolds molto elevati durante le simulazioni (circa 10^6).
- *numerico*, basato sulla risoluzione del problema attraverso opportuni codici di calcolo per la simulazione fluidodinamica. Questa tecnica permette di far variare con facilità i parametri dell'esperimento e di ripeterlo un numero praticamente illimitato di volte sulla base delle necessità dello sperimentatore. [1]

Nel corso del presente documento verrà presentata una breve parentesi sull'attività di sperimentazione in galleria del vento, con le relative caratteristiche e i requisiti da rispettare, tuttavia è importante sottolineare che l'attività oggetto di questa tesi prevederà esclusivamente l'utilizzo dei codici di simulazione fluidodinamica.

Generalmente l'obiettivo di un calcolo CFD è la determinazione delle forze aerodinamiche agenti sul corpo di nostro interesse quando viene lambito da una corrente fluida, tuttavia esistono delle sostanziali differenze che riguardano gli obiettivi e le velocità della corrente fluida utilizzate all'interno delle diverse simulazioni.

Se in ambito aeronautico è necessario che i corpi siano ottimizzati al fine di ottenere sufficienti quantità di portanza tali da garantire un efficace sostentamento del velivolo, nell'ambito automotive gli studi si concentrano, soprattutto negli ultimi anni, nella riduzione della resistenza aerodinamica finalizzata all'abbattimento dei consumi e delle emissioni in atmosfera di inquinanti.

Per esplicitare le differenze tra i diversi casi viene utilizzato un parametro di governo adimensionale che mette in relazione la geometria, la velocità e le proprietà della corrente fluida del campo. Tale parametro è detto numero di Reynolds ed è esprimibile come

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu}$$



dove ρ è la densità del fluido in cui avviene la sperimentazione, V la velocità del corpo e che, nel caso di attività in galleria (con modello fermo), rappresenta la velocità della corrente fluida, L è la dimensione caratteristica del corpo e μ rappresenta la viscosità dinamica del fluido. È importante osservare che esistono delle sostanziali differenze in termini di numero di Reynolds tra l'ambito aeronautico e quello automotive. Oltre alle dimensioni notevolmente maggiori di un velivolo rispetto ad un'autovettura, anche le velocità in gioco risultano essere molto diverse. Per tenere in considerazione questo aspetto è necessario definire un altro parametro adimensionale che tenga in considerazione gli effetti della compressibilità della corrente fluida. Tale parametro è il numero di Mach, esprimibile come

$$M = \frac{V}{c_s}$$

dove c_s è la velocità di propagazione del suono all'interno della corrente fluida e che nel caso dell'aria in condizioni standard è pari a 340 m/s. [1]

Modello	Re	M
Alfa Romeo Tonale	$11.9 \cdot 10^6$	0.1
Airbus A350	$14.3 \cdot 10^7$	0.9

Dal momento che i numeri di Mach in ambito automotive sono piuttosto bassi, nella determinazione dei coefficienti aerodinamici rientra solo la dipendenza dal numero di Reynolds, mentre in ambito aeronautico, poiché si opera nella maggior parte dei casi in condizioni di flusso subsonico compressibile o transonico, la determinazione dei coefficienti adimensionali avrà una stretta dipendenza anche dal numero di Mach.

Dal momento che la stima delle forze aerodinamiche dipende anche dalla geometria dei corpi, è importante evidenziare come questa influenzi il risultato finale.

L'automobile viene vista come un corpo tozzo la cui dimensione trasversale è dello stesso ordine di grandezza della lunghezza, contrariamente a quanto accade ai profili alari, considerati come corpi "sottili". Inoltre, a differenza dei profili alari, dove a seconda della geometria è possibile identificare la zona di transizione dello strato limite dal regime laminare a turbolento, sull'automobile, a causa della presenza di spigoli vivi e varie irregolarità, spesso determinate dallo stilista in fase di definizione del design esterno, l'aerodinamica risulta essere praticamente indipendente dal numero di Reynolds, in quanto sono proprio questi punti a imporre la separazione della corrente. [1]



**Politecnico
di Torino**

Per la stima dei coefficienti aerodinamici di un generico corpo è necessario conoscerne la relativa distribuzione delle azioni di pressione agenti sulla sua superficie. Questa viene data dal "teorema di Bernoulli", esprimibile come

$$p_{tot} = p + \frac{1}{2}\rho V^2$$

dove p_{tot} è la pressione totale, ovvero la pressione massima esercitata dalla corrente nel punto di arresto isoentropico. Tale contributo è costante per ogni punto del campo di moto all'esterno dello strato limite, a una sufficiente distanza dalla parete tale per cui gli effetti degli sforzi viscosi τ_w sono trascurabili (e dove il flusso è appunto isoentropico), mentre all'interno, per effetto delle dissipazioni viscosive, valutabili una volta noto il profilo di velocità dello strato limite, con la seguente relazione

$$\tau_w = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$

la pressione totale sarà necessariamente più bassa ($P_{0,SL} < P_{0,EXT}$). La pressione statica p è agente sempre perpendicolarmente in ogni punto della superficie e $(1/2)\rho V^2$ è la componente di pressione dinamica associata al moto della corrente per effetto della sua stessa velocità V .

Un coefficiente di particolare rilevanza nella determinazione delle forze agenti su un corpo è il coefficiente di pressione, espresso anche come c_p

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

dove p_∞ e $(1/2)\rho V_\infty^2$ sono rispettivamente la pressione statica e dinamica della corrente indisturbata all'infinito a monte.

Attraverso un'opportuna operazione di integrazione sulla superficie dell'autovettura delle azioni di pressione e degli sforzi viscosi agenti sul corpo di nostro interesse (dall'equazione di conservazione della quantità di moto) è possibile determinare i cosiddetti "coefficienti aerodinamici", utili alla determinazione delle forze agenti sul corpo, il cui significato verrà definito di seguito, ed esprimibili come [1]



**Politecnico
di Torino**

$$F = \int_S (-pn + \tau) dS$$

Prima di definire i vari contributi agenti sull'automobile, è utile definire una terna cartesiana coincidente con gli assi corpo dell'autoveicolo in cui verranno scomposte le diverse forze agenti e i relativi momenti. Vengono identificati i seguenti assi:

- Asse X, disposto longitudinalmente all'automobile e nella direzione di avanzamento
- Asse Z, disposto verticalmente e rivolto verso il basso, perpendicolare a X
- Asse Y, disposto verso destra a completare la terna

Nel caso delle forze agenti nel piano longitudinale, definiamo come forza di portanza L la forza verticale agente sull'automobile, definita secondo la relazione

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_z$$

dove ρ è la densità dell'aria, V è la velocità di avanzamento (espressa in m/s), S è la sezione frontale dell'autoveicolo e C_z il coefficiente di portanza (analogo al C_L nel caso aeronautico). A differenza dei velivoli, nelle automobili questo contributo deve essere tale da rendere le auto leggermente "deportanti", con lo scopo di aumentare l'aderenza tra gli pneumatici e il suolo. Sul modello da noi utilizzato, l'Alfa Romeo Tonale, tale contributo sarà tuttavia leggermente portante a causa di vincoli e normative legati alla impossibilità di estremizzare gli assetti e lo stile aerodinamico, come accade nel caso delle auto da corsa: in Formula 1 è necessario che le auto risultino fortemente deportanti al fine di garantire la percorrenza dell'intero circuito a velocità molto elevata senza perdite di aderenza.

La resistenza aerodinamica rappresenta, invece, un contributo associato alla forza che si oppone all'avanzamento dell'automobile lungo la direzione parallela al vettore velocità. Per definizione, essa è definita come

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_x$$

dove C_x il coefficiente di resistenza.

La resistenza aerodinamica è un contributo generalmente associato alle forze di pressione e di attrito agenti sulla superficie dell'autoveicolo e, anche in questo caso, la sua rilevanza è proporzionale al quadrato della velocità.



**Politecnico
di Torino**

Sui tratti urbani a basse velocità, la resistenza totale all'avanzamento è dovuta principalmente all'attrito interno tra i componenti della vettura (ad esempio perdite nella trasmissione del motore) e a quello volvente (dovuto al rotolamento delle ruote sulla strada), mentre il contributo associato alle forze di pressione è piuttosto limitato: in questo caso è possibile dire che la resistenza aerodinamica costituisce il 10% della resistenza totale all'avanzamento, mentre sui percorsi autostradali, dove le velocità sono necessariamente maggiori, questo contributo cresce fino al 60% circa.

Dal momento che la forza necessaria all'avanzamento viene fornita dal motore, un incremento di resistenza complessiva comporta una maggiore spesa in termini di potenza necessaria fornita da parte del motore, con una conseguente maggiore emissione in atmosfera di gas inquinanti, come CO_2 e NO_x .

In generale, la resistenza aerodinamica di un'automobile può essere ripartita nei seguenti contributi:

- 45% dovuto alla parte superiore
- 20% associato al sottoscocca
- 25% dovuto alle ruote
- 10% per effetto del cooling drag

Nonostante nei primi anni di sperimentazione gli studi siano stati concentrati sulla parte superiore e quella posteriore, col passare del tempo si è realizzato che il sottoscocca fosse anche esso in gran parte responsabile della generazione di un contributo di resistenza aerodinamica, pertanto, con l'obiettivo di ridurlo, si è provveduto alla sua carenatura. [1]

Esiste poi un ulteriore coefficiente aerodinamico, il C_y , che rappresenta il contributo di forza laterale a cui è soggetta l'automobile: generalmente, data la simmetria esterna dell'automobile, tale contributo è identicamente nullo. Tale coefficiente risulta essere diverso da zero quando il veicolo si trova a operare in condizioni di vento laterale: infatti è possibile affermare che tale parametro cresce al crescere dell'angolo di imbardata, cioè l'angolo formato tra il piano di mezzeria dell'auto e la direzione del vento. [5]



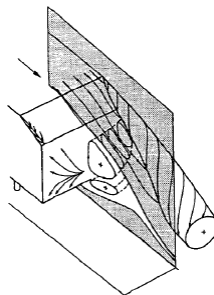
2.1.1 Il meccanismo di formazione della resistenza aerodinamica

La resistenza complessiva dell'autoveicolo viene influenzata in maniera rilevante dalla geometria della parte posteriore, la quale determina il livello di pressione agente sulla stessa generando una forza diretta nella direzione del vettore velocità.

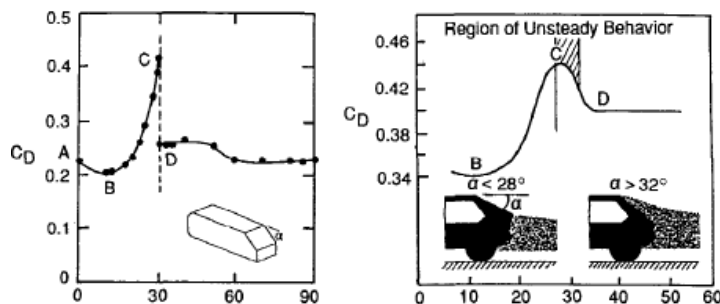
La prima geometria su cui sono stati eseguiti studi di natura aerodinamica, sia numerici che sperimentali, è il corpo di Ahmed. Esso è un parallelepipedo costituito da una parte della faccia posteriore inclinata di un certo angolo: a seconda della configurazione (definita in termini di inclinazione) si verificano due possibili configurazioni del flusso che evolve verso valle.

Per angoli pari a circa 30° , la parte posteriore della vettura si comporta come un profilo alare a elevata incidenza e con una larghezza ridotta: il flusso evolve generando due vortici controrotanti di grandi dimensioni, attaccati alla base e che evolvono verso valle. La presenza di questi determina elevati livelli di "suction" ($c_p < 0$) sulla parte posteriore che generano un'elevata resistenza.

Viceversa, nel caso di base perpendicolare, o comunque angoli prossimi a tale inclinazione, il flusso a valle dell'auto si organizza in una grossa bolla di ricircolo chiusa che determina un valore di pressione costante sulla base: questo porta a dei livelli di "suction" inferiori rispetto al caso precedente. [1]



2.1 Vortici longitudinali ($\alpha \approx 30^\circ$)



2.2 Andamento $C_D - \alpha$



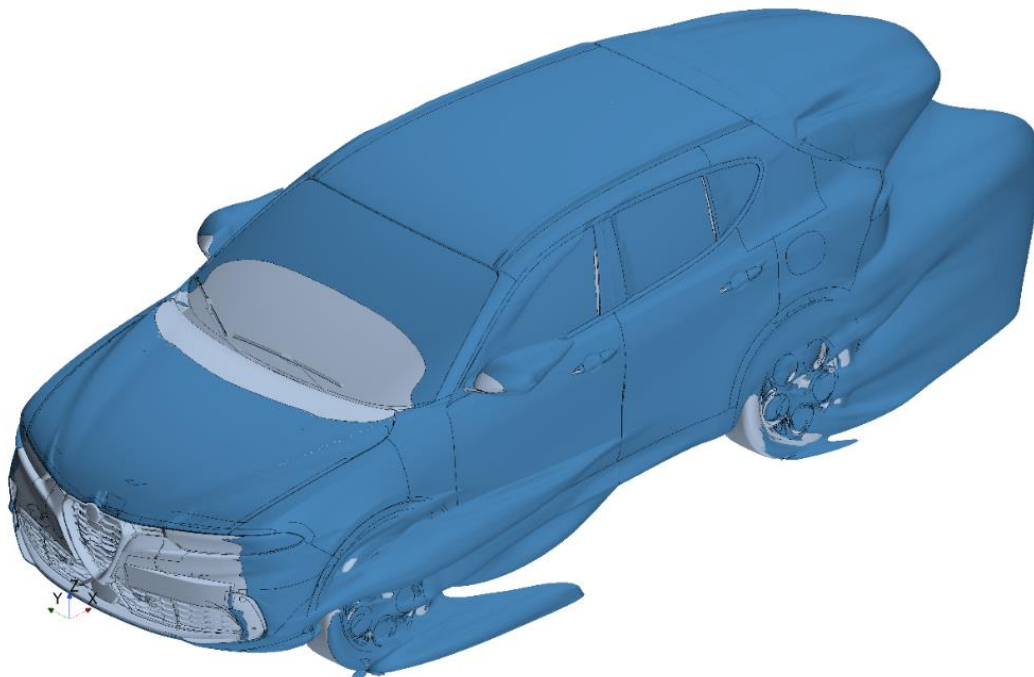
**Politecnico
di Torino**

2.2.1 La resistenza aerodinamica delle ruote

Come ben noto, le ruote delle automobili sono una delle principali cause di turbolenza e rappresentano un contributo rilevante nella determinazione della resistenza aerodinamica: esse concorrono a circa il 25% della resistenza totale all'avanzamento a cui è soggetta l'automobile.

Il sistema "air curtain" oggetto di questa tesi ha come principale obiettivo la riduzione di tale contributo al fine di garantire un miglioramento dell'efficienza aerodinamica, con conseguenti riduzioni di resistenza (C_x), minori consumi di carburante e di emissioni in atmosfera.

È utile osservare che la riduzione della turbolenza generata dalla vettura garantisce prestazioni migliori in termini di accelerazione e stabilità del veicolo, migliorando la qualità di guida soprattutto a velocità elevate. [1]



2.3 Visualizzazione $C_{p_tot} = 0$



**Politecnico
di Torino**

3. LE DIFFERENZE TRA CALCOLI CFD E TEST IN GALLERIA DEL VENTO

3.1 Codici di calcolo per la Computational Fluid Dynamics

La determinazione completa del campo di moto fluidodinamico intorno al corpo di nostro interesse avviene attraverso la risoluzione numerica di un set di equazioni tramite l'utilizzo di opportuni codici numerici di calcolo.

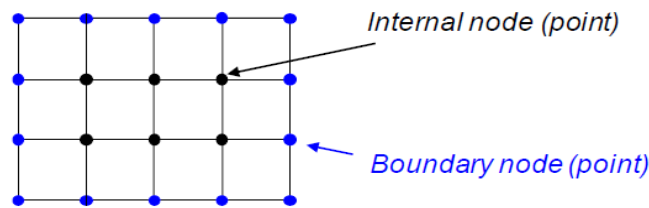
Un metodo numerico deve possedere:

- *Modello matematico*, ovvero un set di equazioni alle derivate parziali o integro-differenziali che descrivono il fenomeno fisico
- *Metodo di discretizzazione*, utile ad approssimare le equazioni per ottenere un sistema algebrico contenente le variabili del campo di moto in una determinata posizione nello spazio e nel tempo
- *Sistema di coordinate e di basi vettoriali*, utile a scrivere le equazioni rispetto a un determinato sistema di riferimento. Tale sistema può essere cartesiano, cilindrico, sferico o curvilineo a seconda dei casi. Il sistema di basi vettoriali serve a esprimere in quale sistema vengono espressi i vettori e i tensori
- *Griglia numerica*, in cui valutare le grandezze del campo di moto di interesse. Essa può essere strutturata, strutturata a blocchi, strutturata con overlapping oppure non strutturata
- *Metodo di approssimazione*, che dipende dal tipo di griglia. Generalmente dipende dal metodo di discretizzazione, a seconda che si adotti un approccio differenziale o integrale
- *Metodo di soluzione*, generalmente basato sulla risoluzione di un sistema non lineare attraverso un metodo iterativo
- *Criterio di convergenza*, ovvero il criterio che decide quando stoppare il metodo iterativo di risoluzione del sistema

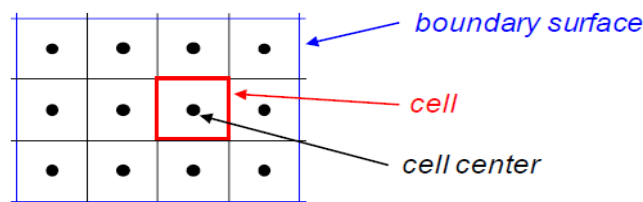
I codici numerici si basano sulla discretizzazione del dominio in un numero finito di nodi, nel caso delle differenze finite, oppure di celle, nel caso dei volumi finiti. I due approcci generalmente conducono alla stessa soluzione del campo di moto fluidodinamico in termini di pressione, densità e velocità, tuttavia la loro differenza è sostanziale: il metodo alle differenze finite si basa sulla risoluzione di un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali in cui le variabili vengono determinate nei nodi stessi in cui viene discretizzato il dominio, mentre il metodo ai volumi finiti si basa sulla formulazione integrale delle medesime equazioni, determinando le variabili del campo di moto nei cosiddetti "centri cella".



Il passaggio da una formulazione all'altra avviene attraverso l'applicazione dell'operatore di integrazione e del teorema di Gauss per i campi vettoriali. [2]



3.1 Discretizzazione tramite differenze finite



3.2 Discretizzazione tramite volumi finiti

Inoltre, è importante osservare come la forma integrale ammetta la presenza di eventuali discontinuità presenti all'interno del volume di controllo, quali le onde d'urto, che non sono ammesse dalla forma differenziale, utilizzabile esclusivamente nel caso in cui le proprietà del campo di moto siano continue e differenziabili. Per questa ragione, dunque, la formulazione integrale delle equazioni viene considerata la forma "fondamentale" rispetto a quella differenziale.

Si vuole passare ora alla scrittura delle equazioni di bilancio che vengono coinvolte nella risoluzione del campo di moto.

A seconda dell'approccio adottato sarà possibile scrivere le equazioni in diversi modi.

L'approccio "lagrangiano" consiste nel fissare il sistema di riferimento su una particella fluida (nel caso di un approccio differenziale) oppure su un volume finito (nel caso integrale) in movimento e descriverne il suo moto all'interno del campo. Le equazioni espresse nella forma lagrangiana sono nella forma "non conservativa".

L'approccio "euleriano" invece si basa sul fissare il volume di controllo in una determinata posizione dello spazio (differenziale o finita) e osservare la variazione delle grandezze che lo attraversano. La forma euleriana delle equazioni viene detta anche forma "conservativa". [2]



**Politecnico
di Torino**

Con l'approccio "lagrangiano" il fluido verrà visto come congelato all'interno della particella fluida, che quindi conterrà sempre le medesime particelle, mentre nell'approccio "euleriano" sarà il fluido ad attraversare la porzione di spazio di nostro interesse.

Una volta inquadrare le differenze concettuali tra i diversi approcci alla base delle equazioni, si procede ora alla loro stesura.

Dal momento che nelle simulazioni di nostro interesse verrà adottato un volume di controllo finito (identificabile come il volume della camera di prova della galleria del vento) e fisso nello spazio, sarà quindi il fluido ad attraversare il dominio di calcolo da noi prescelto: per questo motivo le equazioni verranno scritte quindi adottando un approccio "integrale ed euleriano".

Le equazioni di governo della fluidodinamica sono le cosiddette equazioni di Navier-Stokes, le quali si basano sui seguenti principi fisici di

- *Conservazione della massa*
- *Seconda legge di Newton ($F = m \cdot a$)*
- *Conservazione dell'energia*

Per la loro risoluzione le equazioni dovranno essere soggette a opportune condizioni al contorno. Inoltre, esse saranno valide se il fluido, in ogni punto del dominio, rispetterà l'ipotesi di continuo: il libero cammino medio della particella (la distanza media percorsa da una particella tra una collisione e la successiva con quelle adiacenti) dovrà essere molto inferiore rispetto alla dimensione caratteristica del problema in oggetto.

Verrà ora descritto il loro significato.

L'equazione di conservazione della massa, detta anche equazione di continuità, può essere espressa nella seguente forma

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_S \rho V \cdot n dS = 0$$

la quale, se espressa portando a secondo membro il primo termine, appare nella forma

$$\int_S \rho V \cdot n dS = - \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV$$



Essa dice che "il flusso netto di massa attraverso le superfici del volume di controllo è pari alla riduzione nel tempo della massa contenuta all'interno del volume di controllo stesso".

Avendo cura di prendere le normali alle facce del volume di controllo uscenti verso l'esterno, è possibile dire che un flusso di massa positivo, quindi uscente, contribuirà a ridurre la massa contenuta all'interno del volume di controllo e viceversa. [2]

L'equazione di conservazione della quantità di moto è un'equazione vettoriale, scomponibile dunque lungo le tre direzioni cartesiane, che descrive il contributo delle forze agenti sul volume di controllo di nostro interesse. L'equazione viene espressa nella forma

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho V dV + \int_S \rho V V \cdot n dS + \int_S p \cdot n dS = \int_S \tau \cdot n dS + \int_V \rho f dV$$

in cui è necessario esprimere:

- $V = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$, che descrive il vettore velocità
- $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$, che descrive le normali alle superfici del volume di controllo
- $\vec{\tau} = (\bar{\tau}_x, \bar{\tau}_y, \bar{\tau}_z)$ per il tensore degli sforzi viscosi, avendo cura di esprimere $\bar{\tau}_x = \bar{\tau}_{xx}\vec{i} + \bar{\tau}_{xy}\vec{j} + \bar{\tau}_{xz}\vec{k}$ e così via nelle altre direzioni
- $f = (f_x, f_y, f_z)$ per le forze di campo agenti all'interno del volume di controllo

Questa equazione afferma che "la forza agente sul volume di controllo, espressa come variazione nel tempo della quantità di moto, è data dalla somma dei flussi di quantità di moto agenti attraverso le superfici del volume di controllo, dalle forze di pressione e dagli sforzi, oltre che dalle forze di volume agenti sul volume stesso". [2]

L'equazione di conservazione dell'energia descrive in termini matematici il "primo principio della termodinamica" applicato al volume di controllo. Nella sua forma integrale ed euleriana, l'equazione dice che "la variazione nel tempo dell'energia totale all'interno del volume di controllo è data dalla somma del lavoro fatto nell'unità di tempo sul volume di controllo dalle forze di superficie e di volume e dal flusso netto di calore che attraversa il volume di controllo".

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \int_V E dV + \int_S (E + p) V \cdot n dS - \int_S (\tau \cdot V) \cdot n dS + \int_S \dot{q} \cdot n dS = \int_V \rho \dot{\xi} dV + \int_V \rho f \cdot V dV$$

avendo cura di esprimere $E = e + \frac{1}{2}|V|^2$, data dalla somma di un contributo di energia interna e uno di energia cinetica. [2]



Nel caso in cui le equazioni appena descritte fossero caratterizzate dall'assenza di fonti dissipative (τ) e di sorgenti termiche (\dot{q}), al loro interno sarebbero presenti 7 incognite da determinare per definire in maniera univoca la soluzione del problema, quali la densità ρ , le tre componenti di velocità (u, v, w), l'energia interna e , p e T .

Pertanto, accanto alle 5 equazioni sopra citate (una di conservazione della massa, tre di conservazione della quantità di moto e una per l'energia) risulterebbe necessario aggiungere due ulteriori equazioni utili alla chiusura del sistema, evitando la creazione di un sistema sotto-determinato, caratterizzato da un numero di incognite superiore al numero di equazioni che lo costituiscono.

Le equazioni necessarie da aggiungere sono rispettivamente l'equazione di stato dei gas perfetti e l'equazione dell'energia interna, dal momento che in applicazioni aerodinamiche il fluido da noi considerato (l'aria) si comporta come un gas perfetto, con i rispettivi calori specifici assunti come costanti (detto anche *gas caloricamente perfetto*). [2]

$$p = \rho \frac{R}{M} T$$

$$e = c_v T$$

Tuttavia, dal momento che in un fluido reale sono presenti le azioni viscosi responsabili delle dissipazioni e dei flussi termici all'interno del campo di moto, è necessario scrivere le equazioni utilizzando dei modelli che permettano di tenere in considerazione i diversi contributi responsabili della generazione di un campo di moto turbolento e dissipativo in gran parte del dominio di calcolo, soprattutto a valle del veicolo.

Come verrà descritto, la natura delle equazioni e dei termini contenuti al loro interno dipenderà in maniera rilevante dal modello che si deciderà di adottare per descrivere le proprietà del flusso di nostro interesse. Questo, inoltre, andrà anche a influire sulla chiusura del sistema di equazioni da noi utilizzato. I modelli adottati nelle simulazioni di carattere fluidodinamico sono i seguenti:

- *RANS*, ovvero *Reynolds Average Navier-Stokes equation*, in cui le grandezze istantanee del campo di moto vengono scomposte in una componente media \bar{U}_i a cui si aggiunge una componente fluttuante u'_i a valore medio nullo.

$$\begin{aligned} u_i &= \bar{U}_i + u'_i \\ p_i &= \bar{P}_i + p'_i \end{aligned}$$



**Politecnico
di Torino**

La seguente scomposizione all'interno delle equazioni porta alla nascita di un termine incognito all'interno delle equazioni, esprimibile come $-\rho \overline{u'v'}$, detto anche tensore degli sforzi turbolenti di Reynolds e descrive il flusso medio di quantità di moto dovuto alle fluttuazioni turbolente. [3]

La tecnica RANS sarà quella utilizzata per le simulazioni eseguite in questa attività di tesi.

- *LES*, acronimo di *Large Eddy Simulation*. In questo tipo di simulazioni, per numeri di Reynolds sufficientemente elevati, vengono analizzate solo le scale di dimensioni maggiori mentre si assume che le scale più piccole abbiano una forma universale. Viene quindi eseguita un'azione di "filtraggio": le scale più grandi vengono risolte numericamente dal codice mentre le scale più piccole della dimensione della griglia vengono modellizzate.

$$u_i(x, t) = \widehat{U}_i(x, t) + u'_i(x, t)$$

Vi è una sostanziale differenza con le RANS, in quanto $\widehat{U}_i(x, t)$ non è un valore medio ma è un valore randomico e $u'_i(x, t)$ non è a valore medio nullo. [3]

- *DES*, acronimo di *Detached Eddy Simulation*, è un modello di calcolo in cui il flusso turbolento in prossimità di una parete solida è caratterizzato da una scala la cui dimensione caratteristica è inferiore alla dimensione massima della griglia, mentre la dimensione caratteristica della turbolenza è di dimensioni maggiori: per questo motivo, in corrispondenza delle pareti (o nelle regioni caratterizzate da celle con una risoluzione non sufficientemente accurata) viene adottata una soluzione di tipo RANS, mentre le regioni turbolente di grandi dimensioni vengono risolte con il modello LES. Per questo motivo, il costo computazionale del modello DES risulta essere notevolmente inferiore rispetto al LES puro. [12]



- *DNS*, ovvero *Direct Numerical Simulation*, in cui le equazioni di Navier-Stokes tridimensionali sono risolte numericamente. In questo caso, tutte le scale presenti all'interno del range inerziale di un moto turbolento (che per definizione è un fenomeno multiscala) vengono risolte nella simulazione. È importante osservare che le DNS non introducono alcuna approssimazione, a meno di quelle dovute alla discretizzazione. Il requisito principale per una DNS è che la spaziatura di griglia sia sufficientemente grande per descrivere le proprietà dei moti di grande scala, in cui è contenuta la maggior parte dell'energia cinetica turbolenta, ma anche sufficientemente piccola per descrivere le scale più piccole, in cui l'energia cinetica turbolenta viene dissipata per effetto viscoso (scala di Kolmogorov).

Si osservi che la tecnica DNS è utilizzata maggiormente in ambito di ricerca più che in una fase di design vera e propria. [3]

Una volta discretizzate opportunamente le equazioni con i metodi precedentemente citati, la risoluzione delle equazioni avviene mediante l'imposizione di opportune condizioni iniziali (nel caso in cui la soluzione sia dipendente dal tempo) e al contorno sulle regioni di inlet e outlet del dominio.

La determinazione del numero di condizioni al contorno da imporre sulla sezione di ingresso e uscita del dominio avviene attraverso l'utilizzo della cosiddetta *teoria delle linee caratteristiche*: essa descrive come, in ogni punto del dominio, la presenza di un disturbo generi tre onde acustiche che propagano con velocità diverse, rispettivamente propaganti con velocità u , $u - a$ e $u + a$, dove a indica la velocità di propagazione del suono all'interno della corrente fluida, ottenuta con la seguente relazione

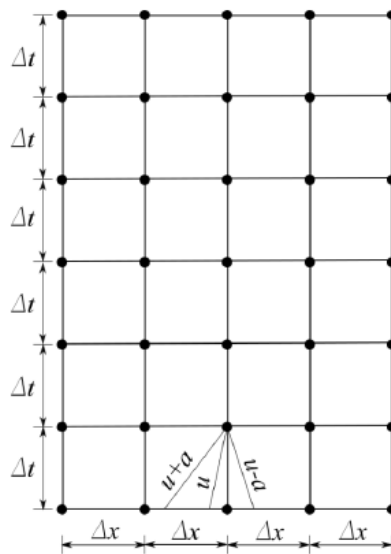
$$a = \sqrt{\gamma RT}$$

Questa relazione descrive la dipendenza della velocità di propagazione del suono esclusivamente dallo stato termodinamico del fluido: essendo a una grandezza funzione della temperatura, è possibile dire che è una *funzione di stato*, come definito nella termodinamica classica. [2]

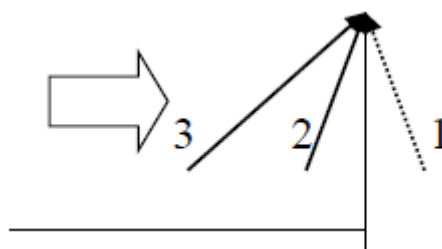
Dal momento che in campo subsonico le onde acustiche propagano con una velocità u inferiore rispetto a quella del suono a , le tre onde avranno diverse direzioni di propagazione sul diagramma delle fasi t-x (con x sulle ascisse):



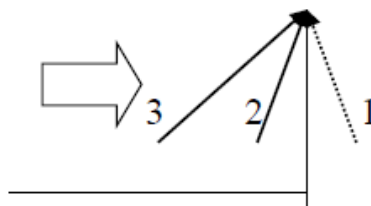
- L'onda con velocità di propagazione $u - a$ propagherà con una velocità "negativa", quindi all'indietro
- Le onde con velocità u e $u + a$ propagheranno in avanti con velocità positiva



3.3 Diagramma delle fasi per il campo subsonico



3.4 Inlet subsonico



3.5 Outlet subsonico [2]



**Politecnico
di Torino**

Questo ragionamento è applicabile in ogni punto del campo di moto e per ogni istante: le grandezze del campo di moto in ogni cella (o nodo) del dominio saranno quindi determinate dalla combinazione di due onde propaganti in avanti provenienti dalle celle a monte e da un'onda propagante all'indietro e che "risale" la corrente a monte.

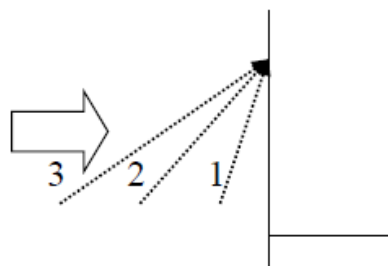
È utile osservare che le celle di bordo in corrispondenza dell'inlet non possono acquisire il "segnale" da altre presenti a monte, data la dimensione finita del dominio di calcolo: sulla superficie di inlet sarà pertanto necessario imporre due condizioni al contorno che determinino in maniera univoca il campo di moto che si vuole analizzare.

In maniera analoga, le grandezze all'interno delle celle localizzate sul bordo di outlet verranno determinate da due onde provenienti dall'interno del dominio e propaganti in avanti, mentre l'onda proveniente dall'esterno (che risale la corrente) verrà caratterizzata necessariamente dall'imposizione di una condizione al contorno.

In questo modo il campo di moto viene definito in maniera univoca in ogni punto del dominio.

In campo supersonico, dal momento che le onde acustiche propagano con una velocità u maggiore della velocità di propagazione del suono a , non saranno presenti onde propaganti con velocità "negativa": il campo di moto supersonico è caratterizzato infatti da un segnale che propaga esclusivamente in avanti e non risale in alcun modo la corrente a monte.

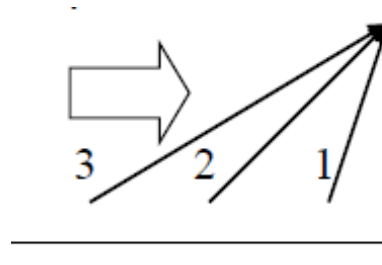
Per questo motivo, sulla sezione di inlet sarà necessario imporre tre condizioni al contorno, mentre sulla sezione di outlet non verrà applicata alcuna condizione, in quanto il campo verrà definito in maniera univoca dai segnali provenienti dalla corrente a monte. [2]



3.6 Inlet supersonico



**Politecnico
di Torino**



3.7 Outlet supersonico

Come verrà citato successivamente, nelle simulazioni oggetto dell'attività di tesi, la velocità della corrente fluida applicata sulla sezione di ingresso sarà pari a 140 km/h, pertanto ci troveremo in una condizione di campo subsonico (coerente col settore automotive).

La soluzione ottenuta ci permetterà di definire in maniera completa le proprietà del fluido in ogni cella (o nodo) in cui è stato discretizzato il dominio di calcolo.

In genere la soluzione numerica ottenuta dalla risoluzione del sistema deve possedere le seguenti caratteristiche:

- *Consistenza*, ovvero l'errore di troncamento (la differenza tra la soluzione esatta e la soluzione numerica) deve tendere a zero quando la spaziatura della griglia tende a zero
- *Stabilità*: un metodo numerico non deve amplificare gli errori presenti nel processo di risoluzione del problema
- *Convergenza*, che descrive come la soluzione numerica debba tendere alla soluzione esatta quando la spaziatura della griglia tende a zero
- *Conservazione*, dal momento che le equazioni che vengono discretizzate sono delle leggi di conservazione, anche lo schema numerico deve garantire il rispetto di tali condizioni, sia localmente che globalmente
- *Limitatezza*, dal momento che la soluzione numerica deve essere contenuta entro certi limiti definiti dalle variabili e dalle equazioni
- *Realizzabilità*, in quanto i modelli di fenomeni troppo complessi da trattare direttamente devono garantire soluzioni che abbiano un significato fisico
- *Accuratezza*, in quanto le soluzioni numeriche sono soluzioni approssimate contenenti errori sistematici di modellizzazione, di discretizzazione e di iterazione. [2]



**Politecnico
di Torino**

3.3.1 Software & Hardware

Viene ora fornita una breve descrizione dei software e degli hardware messi a disposizione e utilizzati durante questa attività di tesi.

Oltre all'utilizzo del pacchetto Office di Microsoft per la stesura del documento in oggetto, le fasi di sensitivity e le successive analisi di calcolo sono state effettuate utilizzando i seguenti software di calcolo:

- *ANSA (versione 22.1.3) - Multidisciplinary CAE pre-processing*

ANSA è un software sviluppato e commercializzato dalla BETA CAE Systems (ora Cadence), utile per effettuare tutte le operazioni preliminari di "pre-processing" sul modello di interesse, quali l'importazione, la modifica e la creazione di nuove geometrie, sia in termini CAD che FEM, ottenendo alla fine una mesh perfettamente esportabile per tutti i programmi utilizzati in ambito CFD.

- *STAR-CCM+ (versione 17.06) - Multidisciplinary CFD platform for simulations*

STAR è un codice di calcolo utilizzato per le simulazioni CFD commercializzato dalla Siemens, che permette di simulare l'evoluzione dei flussi (interni ed esterni) sui corpi nelle loro reali condizioni di impiego. I campi di applicazione di questo software sono numerosi: come avvenuto in questa attività, STAR-CCM+ viene utilizzato in ambito fluidodinamico, passando per simulazioni aeroacustiche fino ad arrivare ai fluidi bifasici.

STAR-CCM+ è dunque una piattaforma multidisciplinare che permette di soddisfare in maniera del tutto completa e autonoma qualsiasi caso di simulazione a cui è soggetto, attraverso l'utilizzo, da parte dell'utente, di un preciso numero di parametri di controllo del modello, sia in termini di schematizzazione spaziale che temporale (nei casi non stazionari), sia in termini di modello risolutivo adottato, scegliendo la fisica del problema e le relative condizioni al contorno.

In termini di hardware, durante l'attività di tesi è stato fornito un PC personale (e le relative utenze) dotato di tutte le licenze necessarie dei software sopra citati. Inoltre, per l'utilizzo, l'accesso e il caricamento dei file sul server centrale di calcolo AWS (Amazon Web Services), operante con sistema operativo in linguaggio Linux, è stato utilizzato il software open-source Moba XTerm.



**Politecnico
di Torino**

3.3.2 Impostazione della simulazione – Modellazione su ANSA e mesh superficiale

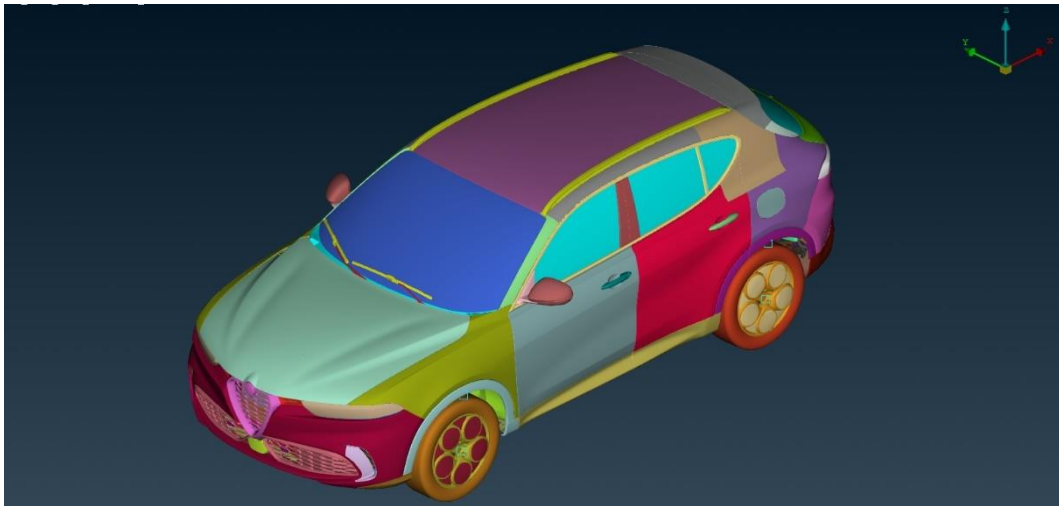
Come menzionato all'inizio del capitolo, l'intera fase di preparazione del modello Alfa Romeo Tonale è stata effettuata utilizzando il software ANSA, importando le geometrie complete del veicolo (escluso l'abitacolo) tramite un modello CAD.

Il software consente di suddividere ogni componente del veicolo tramite l'assegnazione di un nome differente (PiD) oppure di raggruppare più componenti con la stessa funzione sotto la medesima PiD: ad esempio, il sistema air curtain è stato suddiviso in 4 PiD, rispettivamente denominate come inlet, outlet, main interno (lato vano motore) e main esterno (lato paraurti). Dopo aver suddiviso in maniera coerente l'intero modello, assegnando un'etichetta ad ogni PiD per consentire il raggruppamento dei vari sottoinsiemi (per esempio le parti del sottosistema elettrico con il prefisso ELE - <nome componente>), e averlo semplificato da parti eccessivamente complicate dal punto di vista geometrico, per evitare problemi di intersezione tra celle, problematiche numeriche in fase di mesh o altre poco rilevanti per la simulazione, si è proceduto come segue:

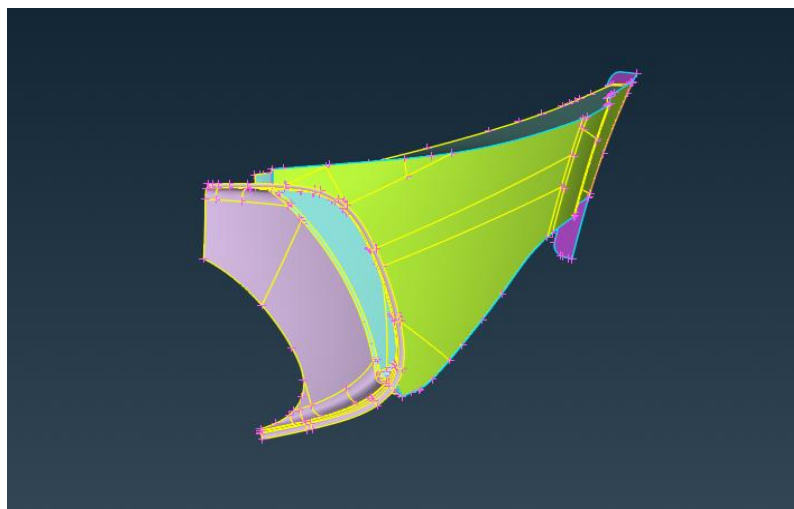
- *Approccio CAD* attraverso un modello per tutte le superfici esterne, al fine di garantire una rappresentazione accurata del modello reale, soprattutto riguardo la precisione dei bordi delle superfici e le rispettive curvature.
- *Approccio FEM*, adottato per tutti i componenti interni del vano motore, sfruttando la funzione di wrapping. Questo processo consente al software di identificare la superficie esterna dei componenti da "wrappare", rendendola continua superficialmente. Le geometrie mantengono una forma simile a quella originaria, ma vengono semplificate eliminando eventuali concavità e/o convessità che porterebbero alla generazione di errori nella mesh, con risultati non convergenti.



**Politecnico
di Torino**



3.8 Visualizzazione PiD



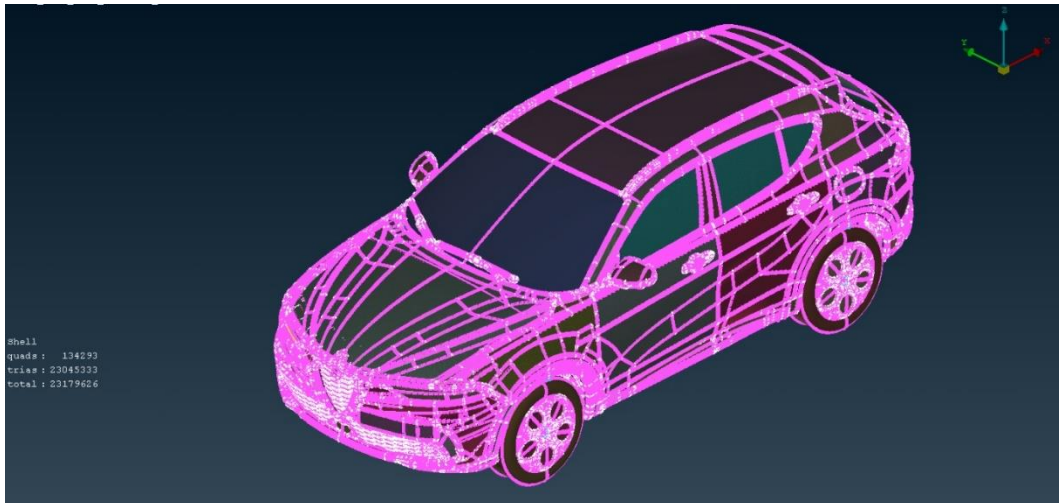
3.9 PiD air curtain

Dopo aver eseguito le opportune modifiche sul modello di riferimento, si ottiene un veicolo caratterizzato dalla combinazione di elementi CAD e FEM che però non può essere esportato, in quanto non è detto che tutte le sue parti siano completamente "meshate".

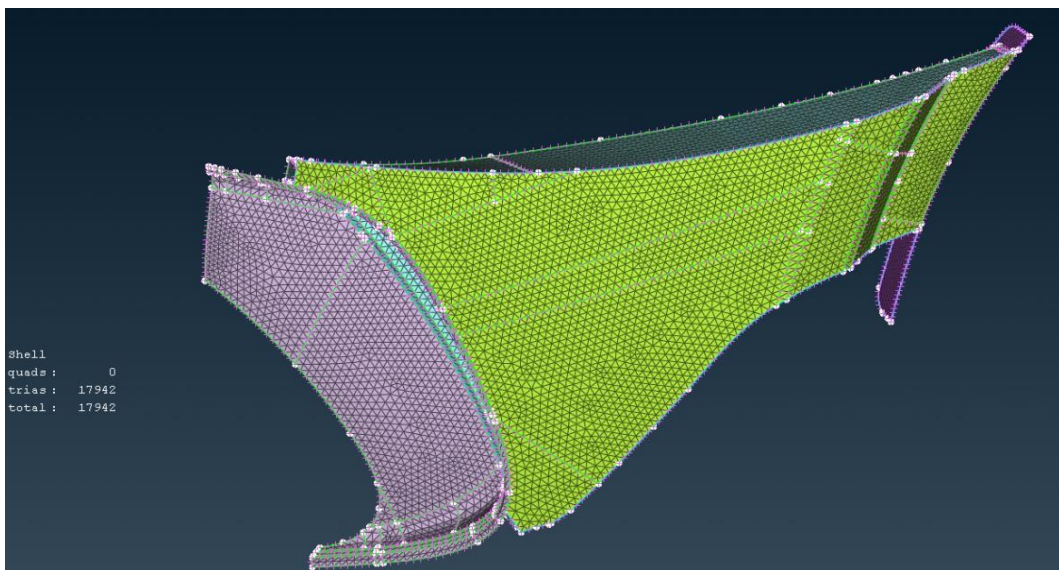
Per questo motivo si passa dalla sezione "topologica" (dove si possono fare modifiche sostanziali sulla geometria del modello) a quella dedicata alla "mesh", impostandone le caratteristiche in termini di distanza tra i vari nodi e di perimetro della singola superficie: tale suddivisione sarà più o meno densa a seconda delle caratteristiche dell'area di interesse. In questo modo si ottiene una prima "mesh" del modello.



Politecnico
di Torino



3.10 Visualizzazione mesh superficiale



3.11 Mesh air curtain

Per le analisi aerodinamiche di nostro interesse è stata utilizzata una mesh superficiale a triangoli (Trias) e quadrati (Quads).

A questo punto, il software consente di verificare numerosi parametri in termini di qualità del modello e della mesh ottenuta, prestando particolare attenzione su:



- *Geometria*: è necessario che non siano presenti superfici aperte (o singole, indicate con un bordo rosso) o triplicemente connesse (o semplicemente triple, indicate con un bordo azzurro). Quest'ultimo tipo di superfici sono accettabili solamente nel caso in cui si abbiano dei componenti tipo *baffle* (indicati sul menù delle PiD con la sigla BFL), utilizzati ad esempio per superfici fittizie su cui si vuole calcolare un parametro specifico, come la portata in un condotto: nel caso del sistema air curtain, le superfici di confine delle PiD ad essi associate sono azzurre, come mostrato nella figura precedente (vedi PiD air curtain).
- *Sharp edges*: indicano la presenza di punti fortemente concavi (cuspidi) o convessi creati da due o più celle della mesh. Una volta terminata la modellazione sul CAD, nell'esecuzione dei check sulla geometria, per evitare l'insorgenza di errori è necessario rimuovere, tramite un opportuno pannello, gli sharp edges visibili sul modello. Infatti, in alcune aree del veicolo, può capitare che la mesh si appoggi su una geometria (CAD o FEM) che termina con un bordo sottile: il software calcola l'angolo tra le normali delle coppie di celle e individua le zone critiche in base a un angolo di soglia impostato dall'utente (pari a 160°).
- *Intersections*: verifica che non esistano compenetrazioni di due o più celle a causa delle dimensioni della mesh. Questo può verificarsi durante la creazione della mesh anche nel caso in cui la geometria del modello CAD sia priva di tali problematiche, risolvibili in maniera automatica dal software tramite un opportuno comando di "fix", oppure manualmente dall'operatore.

Una volta completata la correzione dei possibili errori sopra citati, avendo cura di verificare che non siano presenti eventuali "faces" o elementi duplicati, si procede con un ulteriore controllo di qualità sulle singole celle della mesh.

Nel caso aerodinamico da noi considerato è sufficiente verificare il parametro di skewness (o asimmetria): esso indica di quanto una cella viene distorta rispetto alla sua forma standard. Idealmente si vorrebbe ottenere un valore pari a 0, mentre il peggior valore ottenibile è 1: sul modello in oggetto viene scelto un valore soglia pari a 0,80.

Un altro particolare da tenere in considerazione nella generazione della mesh sono le ruote.

La soluzione dipende in maniera rilevante dalla rotazione o meno dello pneumatico.

Per ovviare a questo problema e avere delle soluzioni il più possibile affidabili e simili alla soluzione al vero, è necessario utilizzare la tecnica del *Moving Reference Frame* (MRF): il cerchione, nella sua rotazione (che dipende dalla velocità di test), trascina con sé una porzione d'aria tra le razze. Assegnando una PiD a tale zona, tale regione verrà messa in rotazione sul software di calcolo Star CCM+ attraverso l'attivazione della funzione di sistema rotante.

A questo punto, una volta completati tutti i controlli necessari, la vettura risulta completamente "meshata" e priva di errori.



**Politecnico
di Torino**

L'intero modello del veicolo è caratterizzato da un totale di circa 23 milioni di celle che portano il file a raggiungere una dimensione di quasi 1.2 GB: questo file rappresenta la cosiddetta mesh superficiale che verrà poi utilizzata dal software di calcolo per le opportune analisi.

3.3.3 La mesh di volume

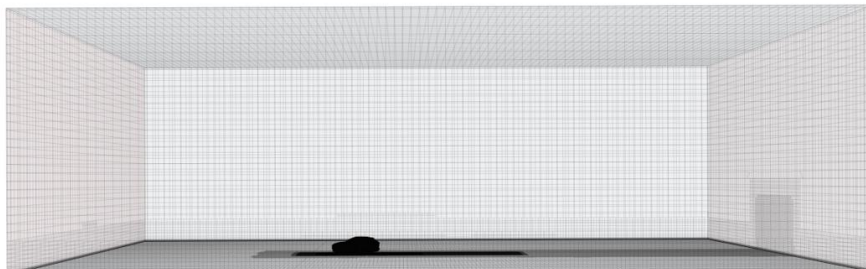
Una volta avviata la simulazione, il software di simulazione Star-CCM+ crea in maniera automatica il volume di calcolo all'interno del quale vengono eseguite le analisi di carattere fluidodinamico.

Affinché le simulazioni forniscano dei risultati convergenti e con un significato fisico è necessario che il dominio di calcolo sia di dimensioni molto maggiori rispetto alla dimensione caratteristica del corpo di nostro interesse.

Dal momento che in subsonico un segnale all'interno della corrente fluida, associato alla presenza di un disturbo (nel nostro caso l'automobile), propaga sia in avanti che all'indietro (dalla *teoria delle linee caratteristiche*) è necessario che il dominio si estenda per una dimensione sufficiente sia a monte che a valle del corpo.

In particolare, la lunghezza del dominio da noi utilizzato si estende per circa 5 volte la dimensione caratteristica (la lunghezza) del veicolo a monte e 10 volte a valle: l'estensione notevolmente maggiore a valle viene giustificata per calcolare in un numero di celle sufficientemente elevato il campo di moto utile ad una determinazione accurata dell'entità della resistenza aerodinamica a cui è soggetta l'automobile.

In maniera analoga avviene anche in ambito aerospaziale subsonico, tuttavia la dimensione dei domini di calcolo è di dimensioni considerevolmente maggiori date le elevate dimensioni dei velivoli rispetto a quelle in ambito automotive.



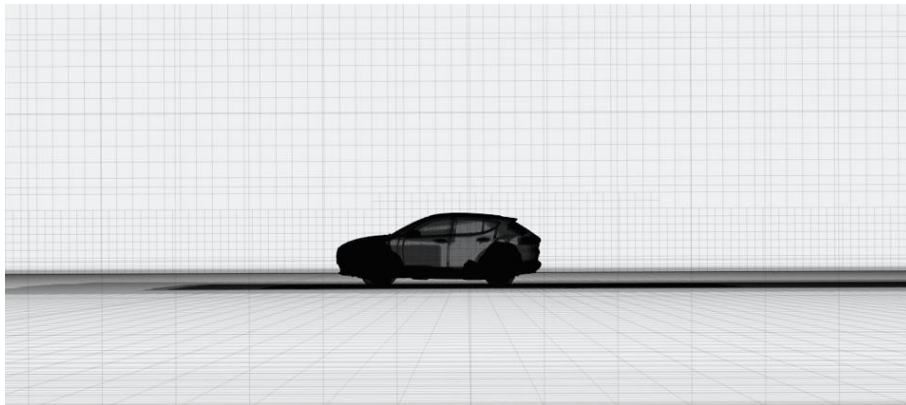
3.12 Mesh di volume – Dominio computazionale



**Politecnico
di Torino**

Come si può osservare dall'immagine, il dominio di calcolo è costituito da celle cubiche la cui dimensione tende a ridursi avvicinandosi al veicolo e nella regione della scia a valle, dove viene eseguito un infittimento della mesh: in particolare, nelle zone in prossimità dell'automobile sono stati inseriti dei *prism layer*, ovvero dei veri e propri strati di celle la cui dimensione risulta essere piuttosto ridotta, in quanto sono generalmente utilizzati per descrivere in maniera accurata i flussi di strato limite o monitorare le zone di particolare interesse aerodinamico, come i punti di separazione, la regione del sottoscocca o in prossimità delle ruote, come visto in precedenza.

È utile osservare che, dal momento che le simulazioni CFD andranno poi correlate con i risultati ottenuti dai test in galleria, la parete inferiore del dominio di calcolo dovrà simulare il moto del "moving belt", ovvero il tappeto della galleria utilizzato per simulare il moto relativo tra vettura e suolo, come verrà descritto successivamente nel paragrafo 3.2.1.



3.13 Dettaglio dominio di calcolo

Date le importanti dimensioni del dominio di calcolo sopra descritto il numero di celle della mesh di volume si aggira intorno ai 100 milioni di celle.

Per questo motivo tutte le operazioni di post-processing verranno successivamente eseguite tramite l'utilizzo di opportune macchine virtuali (VDI) operanti direttamente sul server AWS, dal momento che la sola dimensione del file con estensione .sim in output da Star-CCM+ è pari a circa 29 GB di memoria.



**Politecnico
di Torino**

3.3.4 La fisica del problema

Una volta creato il dominio di calcolo è necessario definire il modello fisico che descrive al meglio il problema di nostro interesse.

I principali parametri che vengono da noi scelti sono:

- *Tridimensionale*, data l'estensione spaziale del dominio.
- *Stazionario*, dal momento che il campo di moto non è dipendente dal tempo.
- *Gas*, che definisce il tipo di fluido utilizzato nell'analisi. Nelle simulazioni di nostro interesse si utilizzerà l'aria in condizioni standard, definendo densità e viscosità.
- *Constant density*, ovvero un modello che adotta una densità costante, poiché il campo di moto coinvolge un regime di basso subsonico. Inoltre, questa scelta viene giustificata dal fatto che i problemi di aerodinamica esterna in ambito automotive non vengono influenzati dalla temperatura del gas (come avviene, ad esempio, nelle simulazioni di "termica"), pertanto la densità del fluido diventa un parametro indipendente dall'equazione di stato dei gas perfetti: in questo caso non risulterà necessaria la risoluzione dell'equazione dell'energia data l'indipendenza della densità ρ dalla temperatura T .

Viceversa, la scelta di un modello di *gas ideale* implicherebbe la dipendenza tra densità e temperatura. La scelta di un determinato modello si rifletterà sulle condizioni al contorno da imporre ai bordi del dominio per la risoluzione del problema in maniera univoca.

- *Turbolento*, dato l'elevato numero di Reynolds del problema. Si adotta un modello RANS.
- *Coupled flow*, che permette di risolvere in maniera accoppiata l'equazione della continuità e quelle della quantità di moto per determinare in maniera simultanea in ogni cella i valori di pressione e velocità, a differenza di un modello *segregated flow*, il quale porterebbe alla determinazione del campo di pressione e successivamente, tramite opportune interpolazioni, del campo di velocità.

La scelta precedente di un modello *constant density* implica che l'equazione dell'energia non sia necessaria per la risoluzione del sistema, tuttavia, qualora si scegliesse precedentemente di utilizzare un modello di *gas ideale*, l'eventuale risoluzione dell'equazione dell'energia dipenderebbe dal modello *coupled* o *segregated*.

Il modello *coupled flow - gas ideale* permetterebbe di risolvere in maniera simultanea l'equazione dell'energia alle equazioni di continuità e quantità di moto, mentre nel caso in cui si scegliesse un modello *segregated flow - gas ideale*, alla risoluzione dell'equazione dell'energia richiederebbe l'imposizione della temperatura, dal momento che pressione e temperatura sarebbero legate dall'equazione di stato dei gas perfetti.



La scelta di un modello *coupled* rispetto a un modello *segregated* dipende dalla potenza di calcolo a disposizione. Nonostante il modello *coupled* sia consigliato per la risoluzione di un campo di moto compressibile, esso viene adottato anche in modelli incompressibili in quanto permette di garantire la convergenza dei risultati in un numero di iterazioni minore. Questo modello permette, inoltre, all'operatore di modificare il metodo di discretizzazione e di integrazione, che in questo caso vengono lasciati con i loro metodi di default (discretizzazione al secondo ordine e metodo di integrazione implicito).

- *K-ε Turbulence* e *Standard K-ε Two-Layer*, i quali descrivono il modello di turbolenza a due equazioni risolte per l'energia cinetica turbolenta K e la dissipazione ε . Con tale approccio il calcolo viene diviso in due parti: nello strato vicino a parete la viscosità e la dissipazione turbolenta sono viste come funzioni della distanza dalla parete, mentre lontano dalla parete i valori ottenuti nel sottostrato viscoso vengono calcolati senza problemi dalla risoluzione dell'equazione di trasporto. In genere è opportuno osservare che le formulazioni a due strati funzionano in maniera corretta se il valore di y^+ è intorno a 1 o superiore a 3. [6]

Una volta definito il modello fisico, è necessario definire dei valori di riferimento come, ad esempio, la pressione minima e massima assolute presenti nel campo, la pressione di riferimento presente nel campo, ovvero la pressione ambiente, e la distanza minima da parete permessa (Minimum Allowable Wall Distance) a cui viene valutato il campo (10^{-6} m).

Vengono poi definite delle condizioni iniziali, utili a determinare le proprietà della corrente utilizzata nella simulazione.

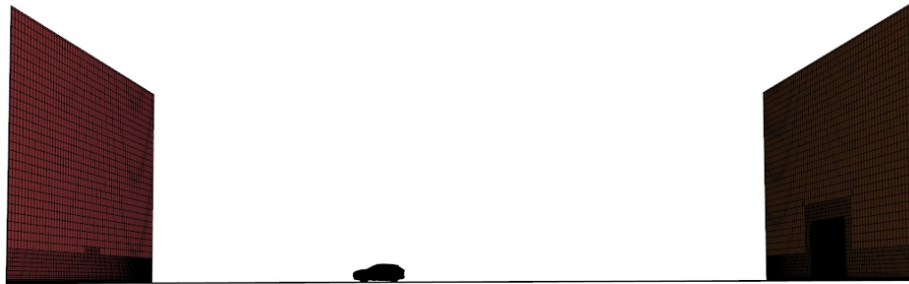
In particolare, si sceglie un livello di pressione costante, caratterizzato da un livello di turbolenza costante e con un valore adimensionale molto piccolo (0.01), di cui poi vengono definite la scala delle velocità (1 m/s) e il rateo di viscosità, dato dal rapporto tra la viscosità turbolenta e quella dinamica e definito da un valore pari a 10.

Una volta definiti tali parametri, è necessario andare ad applicare le condizioni al contorno sulle sezioni di inlet e outlet.

Sulla prima sarebbe necessario applicare due condizioni al contorno, come abbiamo visto in precedenza, tuttavia viene applicata esclusivamente la condizione di *velocity inlet* data la scelta di un modello a densità costante: il valore della velocità viene imposto pari a quella a cui verrà eseguita la simulazione e con direzione normale alla sezione di inlet, mentre sulla superficie del dominio a valle del corpo viene applicata la condizione di *pressure outlet*, tipicamente pari alla pressione ambiente data la distanza relativa molto grande tra il corpo e il bordo del dominio.



**Politecnico
di Torino**



3.14 Dominio di calcolo – Visualizzazione inlet e outlet



**Politecnico
di Torino**

3.4 La galleria del vento e le sue caratteristiche

Si vuole fornire per completezza un inquadramento generale sulle gallerie del vento.

L'attività in galleria del vento viene spesso utilizzata per la verifica e la validazione dei risultati ottenuti dalle simulazioni fluidodinamiche eseguite tramite opportuni software oppure per evidenziare aspetti e fenomeni non visualizzabili attraverso i codici numerici di calcolo.

Come ci si può aspettare, la maggior parte delle case automobilistiche sono dotate di gallerie per la sperimentazione in scala 1:1 date le dimensioni ridotte dei veicoli a quattro ruote rispetto a quelle utilizzate in ambito aeronautico, dove le sperimentazioni vengono eseguite su parti del velivolo oppure su modelli in scala, date le elevate dimensioni dei veicoli reali.

Le gallerie del vento per l'automotive hanno un'architettura simile a quelle utilizzate in ambito aeronautico, la cui struttura si può riassumere in due possibili configurazioni che dipendono dalla camera di prova e dal circuito di ritorno. Tali caratteristiche influenzano in maniera significativa il costo della galleria stessa, oltre a determinare anche la quantità di energia che è necessario spendere per farle funzionare nelle condizioni opportune.

Le gallerie del vento possono essere a circuito chiuso o aperto.

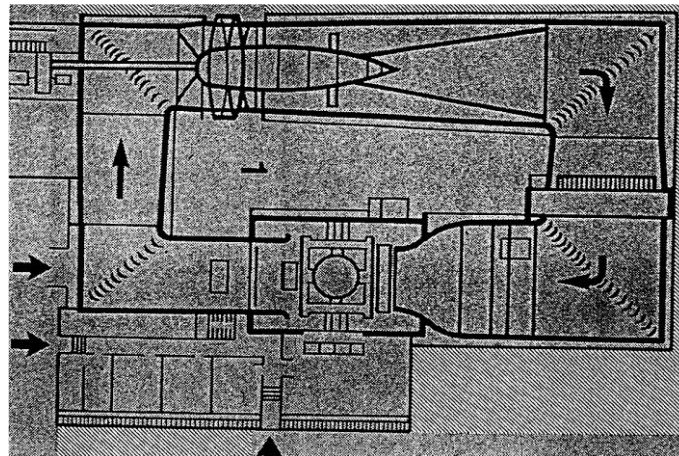
Nelle gallerie a circuito chiuso l'aria circolante è sempre la stessa, a meno dei ricambi necessari: l'energia che è necessario spendere per far funzionare l'intero circuito è minore a parità di dimensioni della camera di prova rispetto alla duale configurazione a circuito aperto. Inoltre, l'inquinamento acustico risulta essere di gran lunga inferiore.

Il circuito chiuso garantisce una migliore qualità del flusso in camera di prova in quanto non viene influenzato dall'ambiente esterno, contrariamente a quanto accade nel circuito aperto, in cui sono necessarie opportune reti all'ingresso se la galleria è circondata da ostacoli che potrebbero influire sul flusso stesso.

Il lato negativo delle gallerie a circuito chiuso è l'impossibilità di realizzare visualizzazioni con fumi. Esse necessitano anche di un impianto di controllo della temperatura e di raffreddamento, dal momento che le dissipazioni presenti nell'intero circuito, dovute ad attriti e separazioni che subisce la corrente, potrebbero causare notevoli incrementi di temperatura. La scelta di una precisa configurazione viene determinata in maniera rilevante dalla frequenza di utilizzo e, soprattutto, dall'investimento monetario che si è disposti a fare. [1]



Politecnico
di Torino



3.15 Vista in pianta di una galleria del vento

La camera di prova può assumere diverse configurazioni che caratterizzano la tipologia del flusso che si sviluppa in essa. Esse possono essere chiuse oppure open jet.

Le camere di prova chiuse sono caratterizzate da una buona qualità della vena fluida, tuttavia la presenza delle pareti può portare ai cosiddetti fenomeni di bloccaggio e interferenza tra queste e il modello, se le dimensioni di quest'ultimo sono troppo elevate: per le simulazioni, è necessario quindi utilizzare dei modelli che abbiano delle dimensioni opportune, caratterizzati da una dimensione trasversale massima pari a circa l'80% della larghezza della camera e da una sezione trasversale la cui estensione viene definita dal rapporto di bloccaggio, determinato rapportando la sezione del modello con quello della camera di prova

$$S_{model} / S_{test_section}$$

Tale rapporto deve essere pari a circa il 10-15%. In questo modo verrebbe garantita una buona similitudine geometrica delle linee di corrente tra modello in galleria e al vero.

Un altro parametro che può influenzare la qualità del flusso è la forma della sezione trasversale della camera. Una forma quadrata o rettangolare può portare alla nascita di flussi secondari in corrispondenza degli spigoli, dettaglio che invece viene significativamente ridotto o del tutto annullato nel caso di camere di prova a sezione ottagonale o circolare, che garantiscono la migliore qualità del flusso.

Viceversa, nel caso delle camere di prova open jet non è possibile che si verifichino i fenomeni sopra citati. Inoltre, queste ultime sono maggiormente utilizzate in ambito automotive grazie alla loro facile accessibilità (in genere si parla di camere $\frac{3}{4}$ open jet). [1]



**Politecnico
di Torino**

3.4.1 Le gallerie automotive

Durante la fase di sperimentazione, affinché si abbia una corretta correlazione tra modello e vero, è opportuno tenere in considerazione delle effettive condizioni aerodinamiche a cui è soggetta l'automobile durante la fase di marcia su strada.

Tipicamente, una volta che il veicolo viene inserito all'interno della camera di prova, il pavimento di quest'ultima simula il fondo stradale.

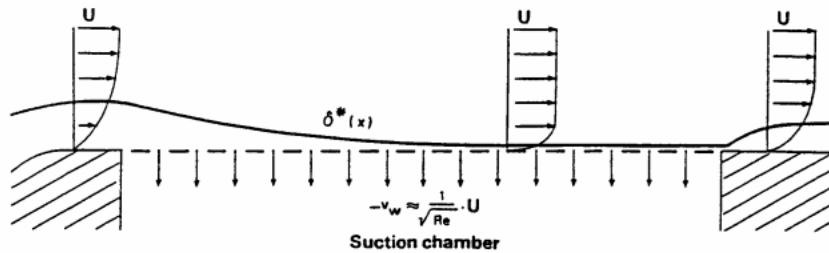
Nella condizione al vero, infatti, non è presente alcun moto relativo tra la corrente e il terreno, in quanto sono entrambi in quiete, mentre in galleria, dal momento che il veicolo è fermo e la corrente fluida in movimento, si ha la nascita di uno strato limite tra quest'ultima e il suolo, causando una riduzione della sezione presente tra il terreno e il sottoscocca dell'automobile e modificando in maniera significativa il flusso in tale regione, con la creazione di una differente distribuzione di pressione locale.

Questo problema diventa di particolare rilevanza quando la loro distanza relativa è confrontabile con la dimensione dello strato limite δ : questo è il caso delle vetture da competizione. Viceversa, nel caso in cui lo spessore dello strato limite sia inferiore al 10% della distanza relativa tra fondo stradale e sottoscocca, come accade nella maggior parte delle vetture stradali, questo fenomeno può essere trascurato senza alcun meccanismo di controllo dello strato limite.

Un altro fattore da tenere in considerazione durante la fase di test in galleria è la rotazione delle ruote, la quale modifica localmente il campo di moto attorno al veicolo e generando un contributo rilevante in termini di resistenza aerodinamica, come affermato nel paragrafo 2.1.2.

Una sperimentazione rigorosa in galleria deve quindi tenere in conto sia della rotazione delle ruote sia del moto relativo tra automobile e fondo stradale, cercando di annullare gli effetti del moto relativo tra corrente fluida e suolo.

Una tecnica che permette di mitigare l'effetto del moto relativo tra corrente e fondo stradale è il sistema di aspirazione dello strato limite, che consiste nel disporre una griglia trasversalmente al pavimento della camera di prova e che copre tutta la larghezza del veicolo. Essa, aspirando lo strato limite, permette di ridurre in maniera significativa la sua estensione verticale rispetto al suolo e al sottoscocca. Il sistema di aspirazione può consistere in un'unica presa disposta anteriormente al veicolo, oppure un sistema di aspirazione distribuito localizzato completamente sotto il veicolo. Tuttavia, è una tecnica che viene poco utilizzata, soprattutto in presenza di bilance disposte sotto il veicolo. [1]



3.16 Sistema di aspirazione dello strato limite distribuito

Per ovviare al problema della nascita dello strato limite tra corrente fluida e fondo stradale della galleria si provvede all'utilizzo di un "moving belt", ovvero un tappeto che, opportunamente messo in movimento, permette di simulare in maniera abbastanza accurata la condizione al vero tra automobile e terreno.

Quest'ultimo viene montato nel pianetto sottostante alla vettura e messo in movimento nella stessa direzione e alla stessa velocità della corrente che investe il corpo.

Il tappeto può coprire solo la parte centrale dell'auto, con le ruote ancorate su opportuni blocchi connessi alla bilancia aerodinamica montata al di sotto, oppure coprire interamente la parte inferiore dell'auto, con l'automobile connessa alla bilancia tramite un opportuno supporto superiore. [1]



3.17 Moving belt parziale



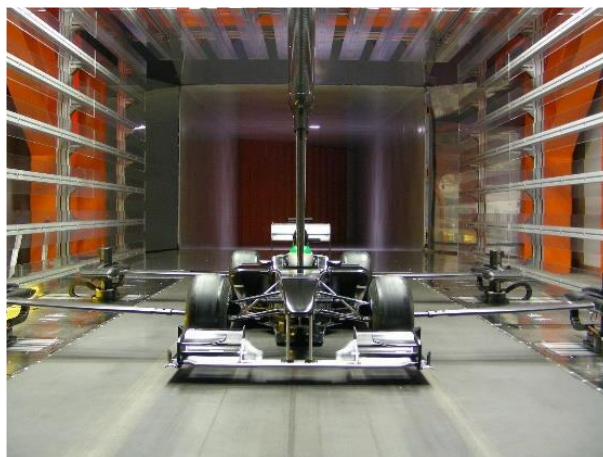
**Politecnico
di Torino**



3.18 Moving belt

Una tecnica molto efficace per una simulazione più accurata consiste nell'accoppiare il moving belt al sistema di aspirazione dello strato limite, montato a monte del tappeto oppure disposto sotto il veicolo.

La rotazione delle ruote viene simulata attraverso l'utilizzo di opportuni braccetti laterali oppure direttamente dal moto del tappeto sottostante, nel caso in cui copra interamente tutta la parte inferiore del veicolo. [1]



3.19 Braccetti per la rotazione delle ruote

Un'importante osservazione a riguardo delle gallerie automotive consiste nella velocità della corrente che investe il corpo di interesse che, come detto in precedenza, sarà necessariamente più bassa rispetto a quelle utilizzate in ambito aeronautico: nel corso di questa attività di tesi le simulazioni verranno eseguite alla velocità di 140 km/h.



**Politecnico
di Torino**

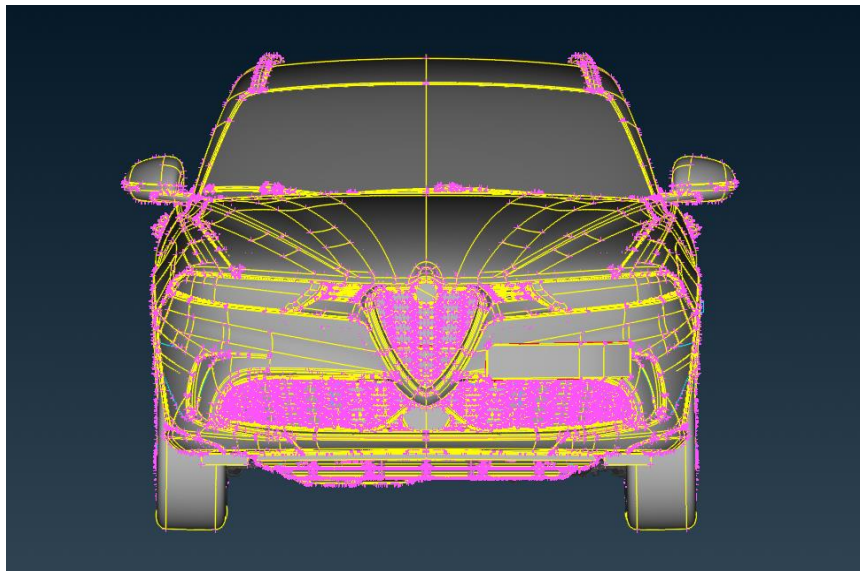
4. IL SISTEMA AIR CURTAIN

4.1 Il principio di funzionamento del sistema air curtain

Il sistema "air curtain" è costituito da una coppia di condotti che hanno lo scopo principale di canalizzare l'aria che investe il veicolo (la corrente indisturbata) e dirigerla lateralmente, al fine di ridurre vorticità generata dalla rotazione delle ruote. Essi sono localizzati generalmente in corrispondenza della parte inferiore del paraurti anteriore dell'automobile, con le rispettive sezioni di ingresso poste nei pressi dei fendinebbia (se l'automobile ne dispone), oppure in corrispondenza delle fiancate.

Nella progettazione degli "air curtain", oltre al fattore aerodinamico vero e proprio, viene tenuto in considerazione anche il fattore estetico, descritto in termini di stile.

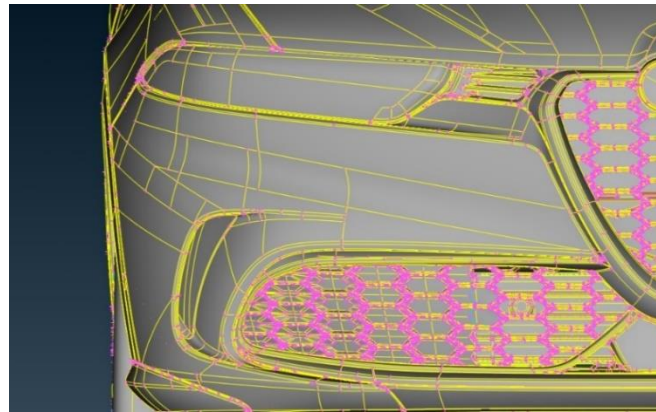
L'implementazione della soluzione con "air curtain" è stata adottata da molte case automobilistiche, soprattutto su vetture appartenenti ad una classe sportiva e in una fascia di costo medio-alta, tuttavia recentemente anche i produttori di auto appartenenti a una classe "aperta al pubblico" adottano questa tecnologia mirata al miglioramento dell'efficienza aerodinamica e dei consumi.



4.1 Modello CAD Alfa Romeo Tonale



**Politecnico
di Torino**



4.2 Dettaglio inlet air curtain Tonale

Il principio di funzionamento degli air curtain può essere riassunto nei seguenti punti salienti:

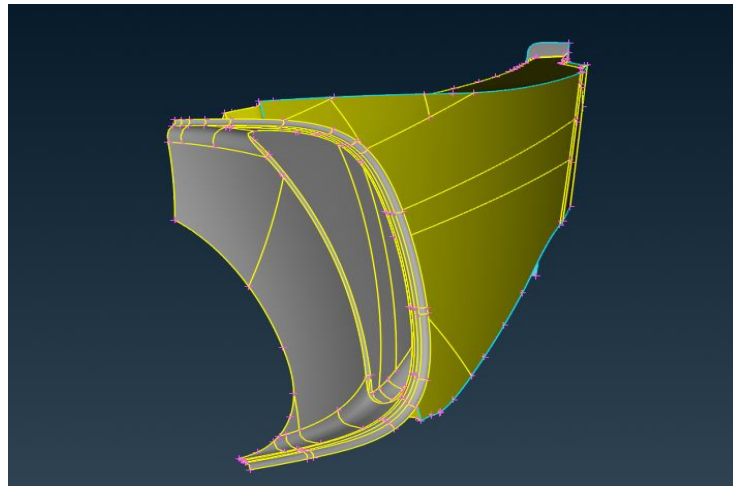
- *Direzionamento del flusso d'aria*: la corrente in ingresso in questi condotti viene incanalata lungo le parti laterali dell'auto, in particolare attorno alle ruote anteriori e sulle fiancate. Può essere utile posizionare la sezione di ingresso di tali condotti in un punto in cui la corrente abbia la pressione maggiore, quindi con la massima capacità di accelerazione (tipicamente in corrispondenza del punto di arresto).
- *Riduzione della turbolenza*: il flusso d'aria in uscita dagli air curtain permette di "chiudere" la regione turbolenta attorno alle ruote, migliorando la qualità del flusso e abbassandone il relativo livello di vorticità.
- *Effetto Venturi*: dal momento che risulta essere valida la conservazione della portata all'interno del condotto, la velocità della corrente sulla sezione di uscita sarà notevolmente maggiore rispetto a quella di ingresso, con i relativi livelli di pressione necessariamente più bassi (dal teorema di Bernoulli). Il flusso d'aria accelerato porta alla creazione di una regione a bassa pressione attorno alle ruote, con una conseguente riduzione dell'ampiezza della scia da esse generata: una riduzione del C_x permette un miglioramento in termini di resistenza aerodinamica e conseguenti riduzioni dei consumi di carburante e emissioni.
- *Design del veicolo*: la geometria degli air curtain deve essere integrata anche dal punto di vista estetico con le altre parti della carrozzeria del veicolo.
- *Considerazioni termiche*: l'aria incanalata negli air curtain può anche essere utilizzata per il raffreddamento di altri componenti meccaniche dell'automobile, come ad esempio i freni. Questa configurazione può essere particolarmente utile nelle auto sportive o da competizione.



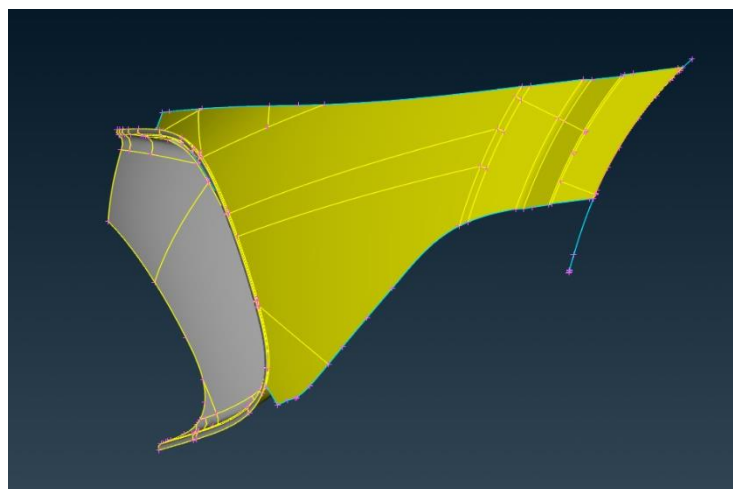
4.2 Ottimizzazione del sistema air curtain

Il processo di ottimizzazione della geometria degli air curtain è un percorso che richiede la combinazione di considerazioni di design, analisi fluidodinamiche e, eventualmente, test aerodinamici in galleria.

Di seguito viene riportata la configurazione geometrica iniziale degli air curtain sul modello di riferimento per questa tesi, l'Alfa Romeo Tonale.



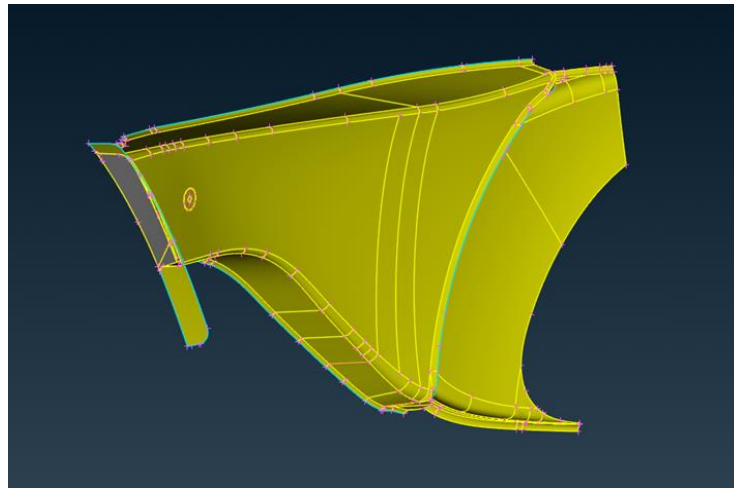
4.3 Vista frontale (sezione inlet)



4.4 Vista laterale (esterna)



**Politecnico
di Torino**



4.5 Vista laterale (interna) + outlet

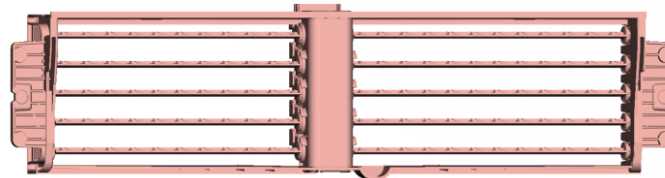
Dalle immagini si può osservare che la geometria degli air curtain sia caratterizzata da una sezione di ingresso di dimensioni notevolmente maggiori rispetto alla sezione di uscita, che permette al flusso d'aria al suo interno di espandersi, abbassando la propria pressione relativa rispetto alla sezione di ingresso.

L'attività di sensitivity eseguita durante questo periodo di tesi è stata preceduta da una fase svolta dal produttore in cui è stata fatta variare la configurazione di progetto di tale sistema modificando alcuni parametri ad esso associati, distinti nei seguenti punti: [4]

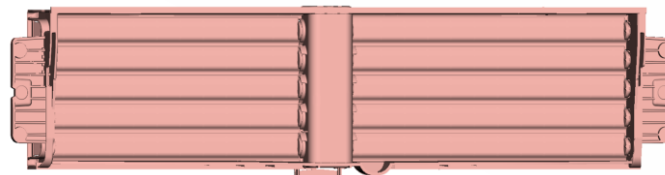
- Posizione inlet, localizzato in corrispondenza del fendinebbia, oppure centralmente, in una posizione intermedia del paraurti inferiore compresa tra l'ingresso in corrispondenza del fendinebbia e quello del sistema AGS (Active Grille Shutter), o l'ingresso dell'AGS stesso. Quest'ultimo è un sistema che permette l'apertura e la chiusura automatica di un pannello applicato posteriormente alla griglia del radiatore del motore, utile a migliorare l'efficienza del veicolo e a mantenere la temperatura del vano motore intorno al suo valore ideale.



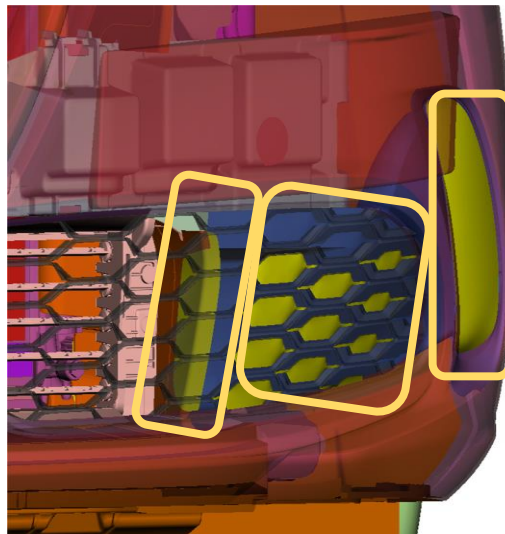
Politecnico
di Torino



4.6 AGS aperto



4.7 AGS chiuso



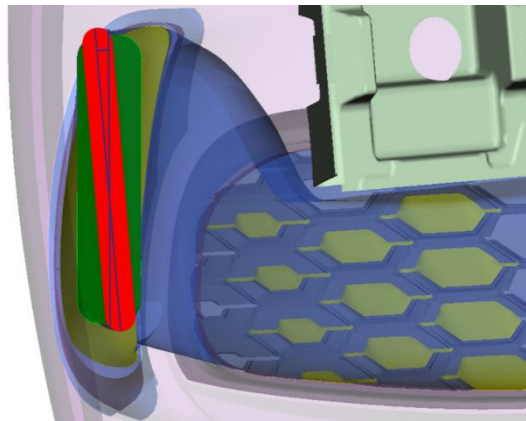
4.8 Ingressi del sistema air curtain (sistema AGS, "parte centrale" e fendinebbia)

- Rapporto aree outlet-inlet, generalmente valutato utilizzando due sezioni in determinate posizioni all'interno del condotto. Tale parametro è stato considerato, nelle varie casistiche, pari a 0.25, 0.50 o 0.75.
- Aspect ratio della sezione di outlet, valutato come il rapporto tra l'altezza e la larghezza della sezione di uscita del condotto. Rapporti maggiori descrivono una sezione più stretta e allungata.



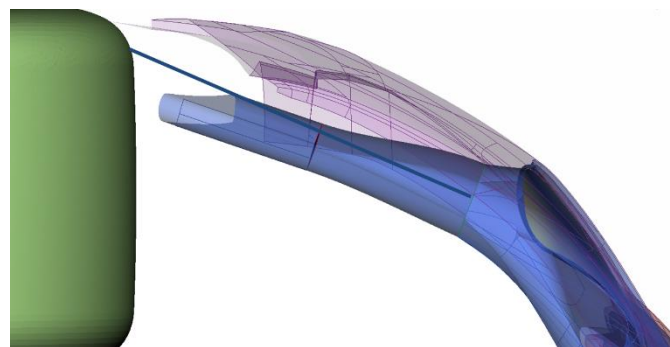
**Politecnico
di Torino**

- Duct roll angle, che descrive la rotazione della sezione di outlet del condotto rispetto alla sezione di inlet attorno all'asse longitudinale del condotto. Guardando frontalmente la vettura, sono state eseguite delle rotazioni in senso orario e antiorario di 5° rispetto alla configurazione di riferimento.



4.9 Duct roll +5°

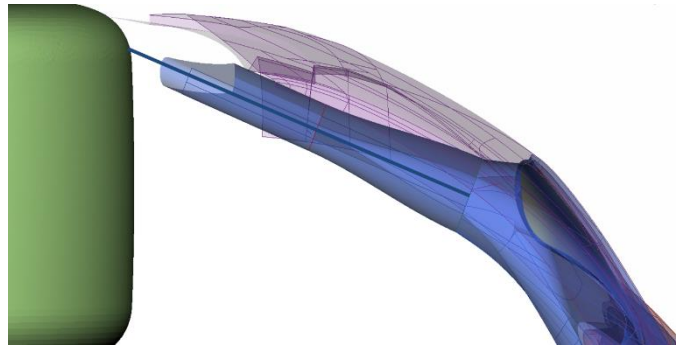
- Posizione outlet, localizzabile nel passaruota interno, in quello esterno oppure in corrispondenza del paraurti laterale esterno



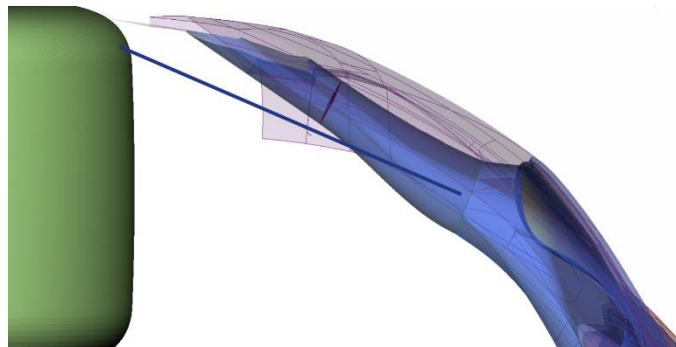
4.10 Passaruota (lokary) interno



**Politecnico
di Torino**



4.11 Passaruota (lokary) esterno

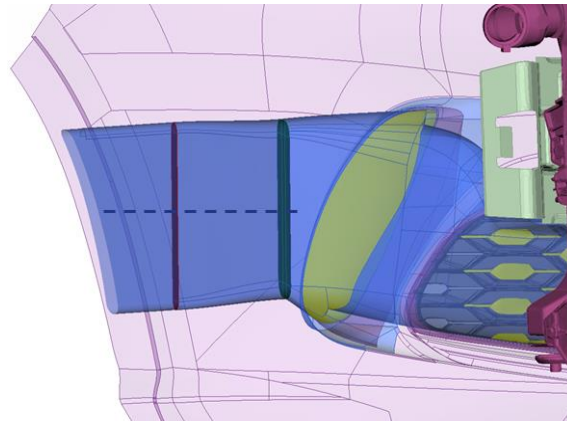


4.12 Paraurti laterale esterno

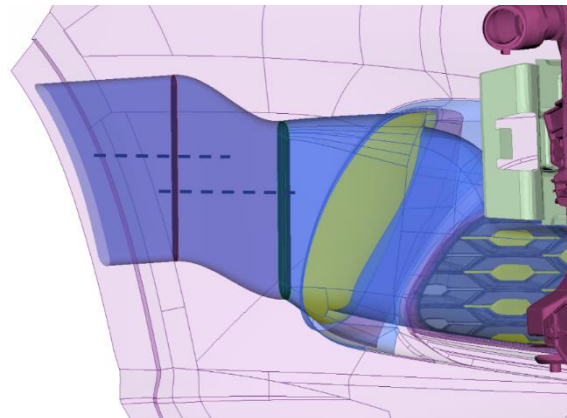
- Delta Z inlet-outlet, che descrive la posizione verticale (lungo l'asse Z) dell'asse longitudinale della sezione di outlet rispetto alla posizione di quella di inlet. Vengono assunti disallineamenti positivi e negativi pari a 50 mm rispetto alla condizione di perfetto allineamento tra le due sezioni.



**Politecnico
di Torino**



4.13 Allineamento inlet-outlet

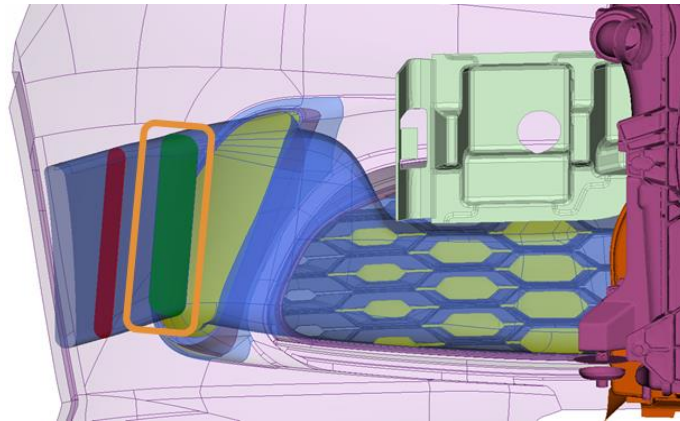


4.14 Disallineamento inlet-outlet

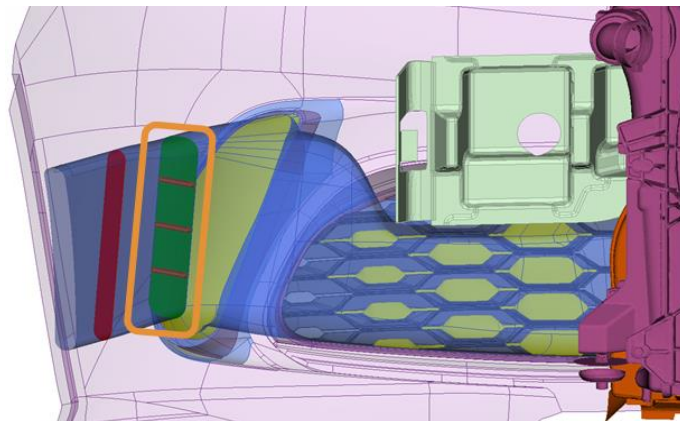
- Inlet grille shape, attraverso l'introduzione di piccole "fins", letteralmente "derive", utili a canalizzare l'aria in maniera più accurata in corrispondenza della sezione di ingresso. Rispetto al caso di progetto, caratterizzato dall'assenza di derive, possono esserne introdotte rispettivamente 3 o 5 fins, come osservabile nell'immagine seguente.



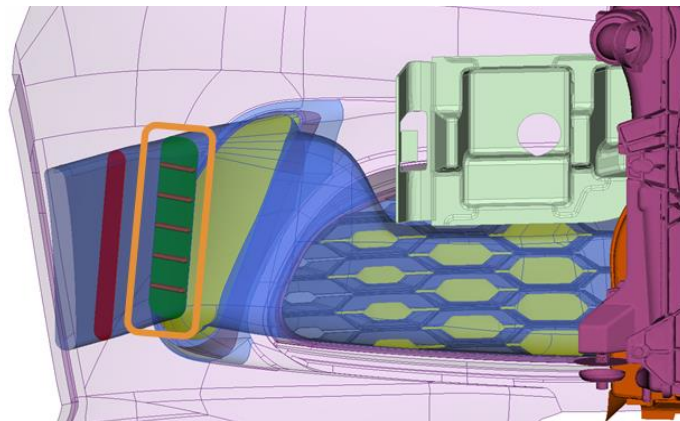
**Politecnico
di Torino**



4.15 0 fins



4.16 3 fins



4.17 5 fins



**Politecnico
di Torino**

La fase pregressa a questa attività di tesi ha visto l'assegnazione dei parametri sopra descritti in "livelli", o configurazioni, e combinati in maniera diversa fissandone uno (ad esempio la regione di ingresso) e modificando gli altri assegnabili. Il produttore ha così ottenuto diverse configurazioni del sistema air curtain su cui sono state eseguite le analisi volte a trovare dei benefici a livello di resistenza aerodinamica.

I parametri associati alla configurazione di progetto del sistema air curtain possono essere riassunti nella seguente tabella:

Inlet position	fendi
Area outlet / Area inlet	0.5
Area outlet aspect ratio	6.7
Duct roll angle	0°
Outlet position	external lokary
Delta Z inlet-outlet	0mm
Inlet grille shape	0 fins

Le analisi svolte dal produttore non hanno portato a un miglioramento significativo in termini di C_x rispetto alla configurazione attualmente presente sul modello Alfa Romeo Tonale.

È importante osservare che le riduzioni del C_x considerate significative coinvolgono almeno la terza cifra decimale di tale coefficiente: per motivi di privacy aziendale non è possibile esplicitare il valore del coefficiente associato al modello da noi considerato, tuttavia è lecito assumere che una vettura stradale abbia un valore di C_x approssimativamente pari a 0.3, pertanto gli abbattimenti di tale parametro utili al miglioramento della resistenza aerodinamica debbano essere pari o superiori al millesimo, mentre variazioni inferiori e coinvolgenti la quarta cifra decimale saranno considerate trascurabili o associate a errori numerici in fase di sperimentazione.

L'obiettivo diventa quindi trovare delle configurazioni opportune di tale sistema che permettano di ottenere una resistenza aerodinamica inferiore rispetto a quella attualmente presente sul modello di riferimento da noi considerato.



**Politecnico
di Torino**

5. LA FASE DI SENSITIVITY DEL SISTEMA AIR CURTAIN

L'obiettivo di questo paragrafo è la descrizione del processo di ottimizzazione del sistema air curtain volto a migliorare la resistenza aerodinamica complessiva del veicolo.

È importante sottolineare nuovamente che la ricerca di una configurazione migliore di tale sistema rispetto a quella attualmente presente sul modello Alfa Romeo Tonale non condurrà a miglioramenti macroscopici in termini di C_x e di tutte le considerazioni che da esso derivano (scia, resistenza...), ma ci si aspetta di ottenere riduzioni di tale coefficiente dell'ordine della terza cifra decimale, le quali indicheranno riduzioni complessive di al più mezzo punto percentuale.

Una volta osservata la configurazione attuale di tale sistema, la prima considerazione valida per l'ottimizzazione potrebbe essere la modifica della geometria dei condotti stessi, ad esempio rimuovendo eventuali superfici di discontinuità presenti all'interno della canalizzazione per minimizzare le possibilità di ricircolo della corrente ed eventuali rifiuti di portata, al fine di rendere il flusso in uscita soggetto a minori perdite, oppure agire sull'orientamento del flusso in uscita che sfocia nel passaruota anteriore.

Un'altra considerazione plausibile potrebbe consistere nel far accelerare ulteriormente il flusso all'interno dei condotti rispetto alla sua configurazione di progetto, creando una corrente a pressione più bassa in grado di avvolgere la ruota in rotazione.

Per ovviare a queste considerazioni, durante l'attività si è scelto di mantenere fissi alcuni parametri appartenenti alla configurazione di riferimento (la *posizione* di *inlet* e *outlet*, l'angolo di *duct roll*, il ΔZ *inlet/outlet* e l'assenza di *fins* sulla sezione di inlet, che rappresenta la migliore soluzione adottata dal produttore) e di far variare i parametri rimanenti, come il *rapporto tra le sezioni* di ingresso e uscita dei condotti e l'*aspect ratio* della sezione di outlet, oltre che agire sulla *geometria* dei condotti.

Queste modifiche sono state analizzate in diverse simulazioni che verranno di seguito descritte.



**Politecnico
di Torino**

5.1 Caso di riferimento

Prima di procedere con le modifiche ai condotti di nostro interesse, è importante eseguire la prima simulazione sul modello attualmente sul mercato e che definirà il metro di paragone di tutta la fase di sensitivity.

Come affermato in precedenza, la simulazione viene eseguita alla velocità di 140 km/h, utilizzando un modello di aria in condizioni standard.

Il modello di calcolo adottato per la simulazione (e per le successive) è il modello RANS di tipo stazionario, la cui modellazione del campo di moto viene descritta nel paragrafo 3.1.

La valutazione delle forze agenti sul corpo viene preceduta da una fase iniziale in cui il codice della simulazione valuta la sezione frontale S della vettura, utilizzata successivamente per la determinazione dei coefficienti aerodinamici associati a resistenza (C_x) e portanza/deportanza (C_z), ricavati rendendo adimensionale la distribuzione integrale delle forze agenti sul corpo quando viene lambito dalla corrente fluida.

Nella determinazione di quest'ultima è possibile lavorare in termini adimensionali utilizzando il coefficiente di pressione (c_p) definito in precedenza.

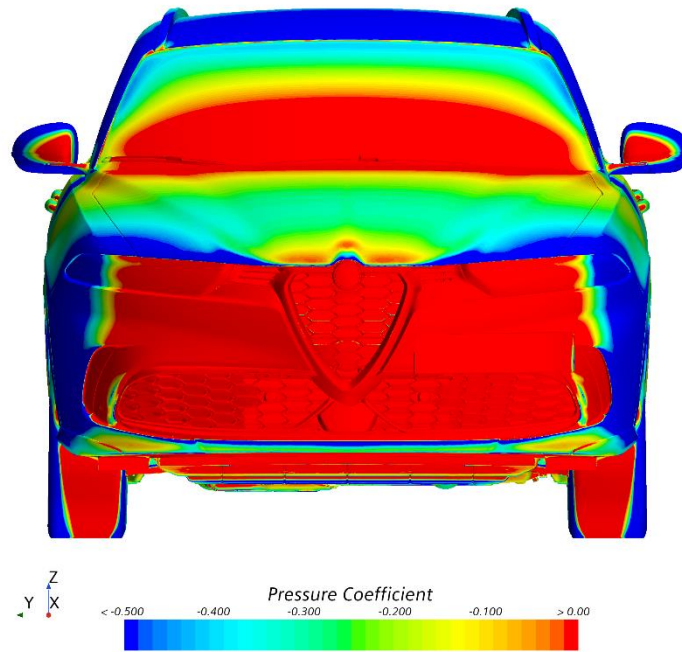
Da come ci si può aspettare, la corrente subirà bruschi rallentamenti in corrispondenza della regione frontale della vettura, dove si trova il punto di arresto della corrente.

In particolare, da come si osserva nelle immagini sottostanti, il paraurti, il parabrezza e la parte frontale delle ruote saranno soggetti al massimo rallentamento e quindi alla pressione massima esercitata dalla corrente sul corpo stesso, che porterà al c_p massimo (positivo).

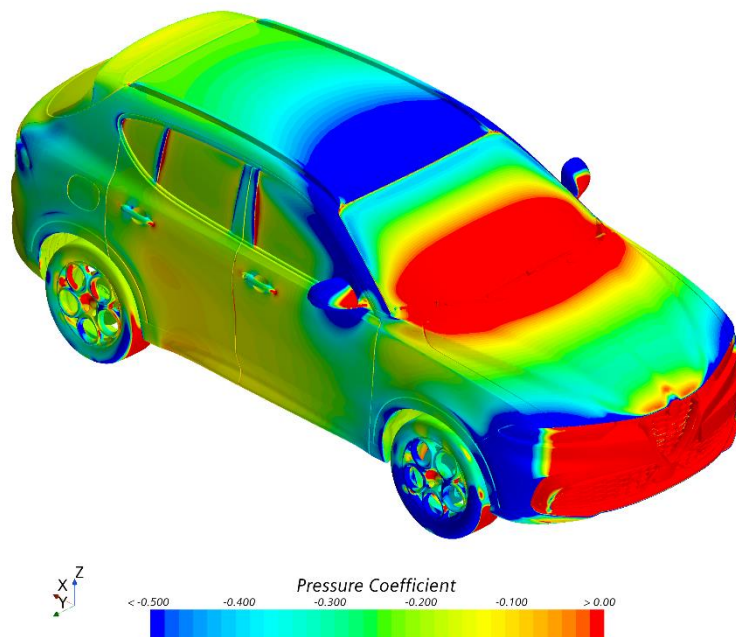
La regione in sovrappressione (rossa) sulla parte frontale dell'autovettura genera una risultante di forza nella stessa direzione in cui viene valutata la resistenza aerodinamica: si può dedurre che la condizione ideale sarebbe il caso in cui la sezione frontale dell'automobile venisse ridotta per ridurre tale contributo resistente all'avanzamento.



**Politecnico
di Torino**



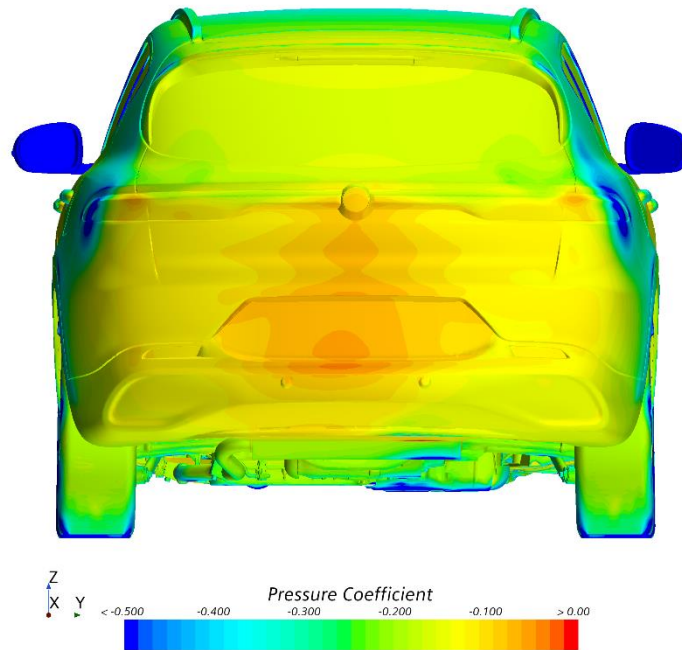
5.1 Coefficiente di pressione



5.2 Coefficiente di pressione



**Politecnico
di Torino**



5.3 Coefficiente di pressione

Allontanandosi da tali regioni, la corrente accelera e si genera un forte gradiente di pressione avverso che porta la corrente a separare.

Dalle analisi di post processing delle immagini si possono identificare diverse regioni di separazione della corrente, caratterizzate da livelli di pressione piuttosto bassi (regioni blu) e collocate in corrispondenza del confine superiore del parabrezza e le regioni laterali del paraurti frontale e posteriore.

Si noti, inoltre, che gli specchietti, essendo delle superfici piuttosto piccole ma responsabili della creazione di una discontinuità nella geometria della sezione frontale, siano soggetti a forti gradienti di pressione: essi rappresentano dei punti di separazione della corrente che vengono "imposti" dal produttore in fase di progettazione.

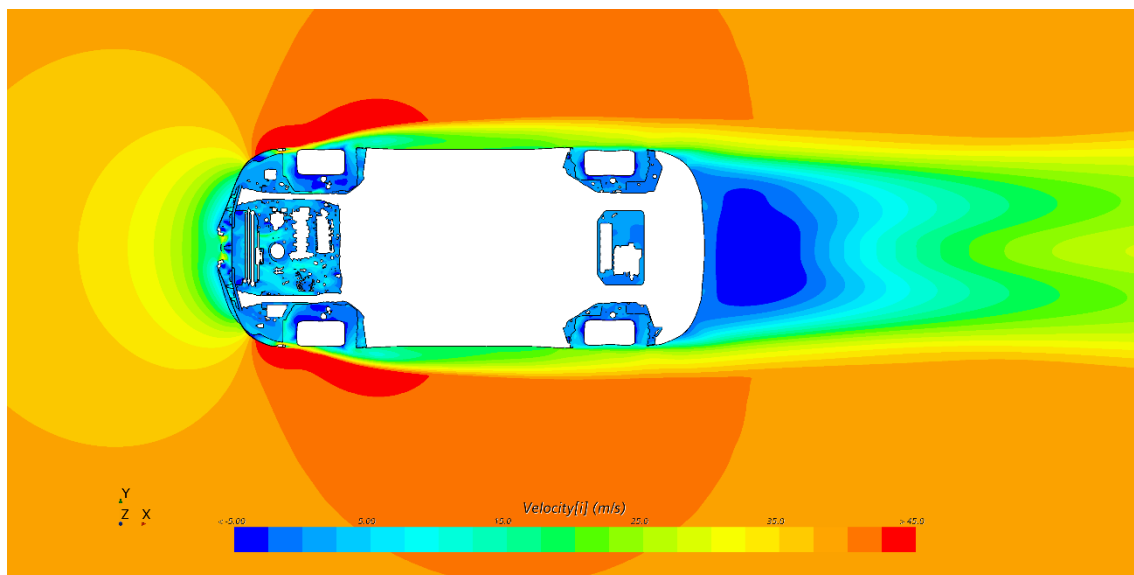


**Politecnico
di Torino**

Dalla vista frontale è possibile osservare come la sezione di ingresso del sistema air curtain sia comunque caratterizzata da una corrente che la investe che si trova in condizioni di pressione massima, la quale garantirà, come già affermato, il maggiore potenziale di accelerazione del flusso all'interno di tali condotti.

Dalla vista posteriore, invece, si nota come la regione centrale dell'automobile sia soggetta ad un flusso che recupera pressione a causa del ricircolo della corrente: tale contributo non è tuttavia in grado di fornire un contributo positivo all'avanzamento dell'automobile, che si avrebbe nel caso in cui sulla parte posteriore si avesse c_p positivo, ma che comunque risulta essere "meno negativo" rispetto alle zone in blu in cui avviene la separazione e caratterizzati da livelli di pressione piuttosto bassi.

Tramite l'introduzione di un opportuno piano orizzontale, passante per gli assi X-Z e localizzato all'altezza delle ruote e del sistema air curtain ($z = 0.249$ m), è possibile osservarne l'influenza sulla scia dell'automobile, responsabile di una porzione rilevante del contributo associato alla resistenza complessiva dell'automobile.

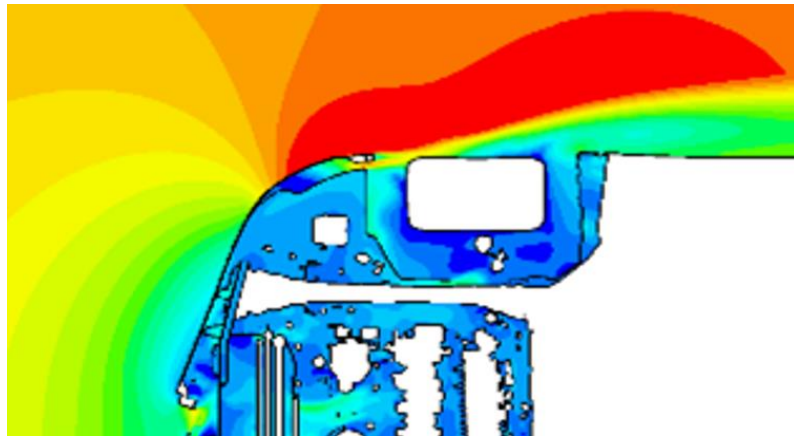


5.4 X-Z Velocity plane – Top ($Z = 0.249$ m)

Da questa immagine si può osservare come il flusso che scorre all'interno delle canalizzazioni sia in grado di accelerare (passando da un colore blu ad uno rosso) principalmente in corrispondenza della sezione di uscita grazie alla convergenza della canalizzazione, creando una corrente a bassa pressione che investe la ruota anteriore, riducendo complessivamente il livello di turbolenza in tale regione e la relativa ampiezza della scia.



**Politecnico
di Torino**



5.5 Dettaglio Velocity plane - air curtain

Dall'immagine si può notare la corrente accelerare procedendo verso le fiancate, raccordandosi con la corrente a bassa pressione in uscita dall'air curtain: l'interazione tra questi due flussi e la superficie della ruota conduce alla separazione del flusso (in giallo): la regione a valle di tale punto (in verde-azzurro) è caratterizzata da livelli di velocità notevolmente inferiori e da un livello di pressione che complessivamente non varia macroscopicamente lungo tutta la fiancata, in quanto rappresenta una regione in cui la corrente è separata, fino a quando tende ad "attaccarsi" nuovamente nella regione in corrispondenza delle ruote posteriori, dove qui avviene un'ulteriore separazione e la formazione di una bolla di ricircolo (in blu), caratterizzata per l'appunto da una velocità "negativa", ovvero in direzione opposta all'asse X di riferimento.

Ciò avviene in maniera analoga per la regione attorno alla ruota: questo descrive la presenza di una corrente caratterizzata da una componente vorticoso ($\omega = \nabla \times V$), dovuta alla rotazione delle ruote e responsabili di un contributo significativo di resistenza aerodinamica, come descritto nel paragrafo 2.2.2.

Un parametro utile alla valutazione della qualità delle modifiche successivamente eseguite sul sistema air curtain è la portata in massa (kg/s) dell'aria che attraversa le canalizzazioni, valutabile secondo la relazione

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot u$$

In particolare verrà definito un parametro arbitrario K (espresso in $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$), espresso come

$$K = \dot{m} / A_{inlet}$$



**Politecnico
di Torino**

il quale ci permetterà di descrivere sotto quali condizioni si troverà a operare il condotto, avendo cura di limitare la condizione di "rifiuto di portata" e comprendere se questa possa influenzare in maniera significativa il C_x complessivo della vettura.

Tale parametro, in questo caso, verrà considerato pari a K_{ref} e utilizzato per confrontare le portate valutate nei casi successivamente descritti.

In maniera analoga verrà fatto utilizzando C_{x-ref} per valutare i coefficienti aerodinamici ottenuti come output dalle simulazioni, valutando il ΔC_x rispetto al caso appena analizzato.

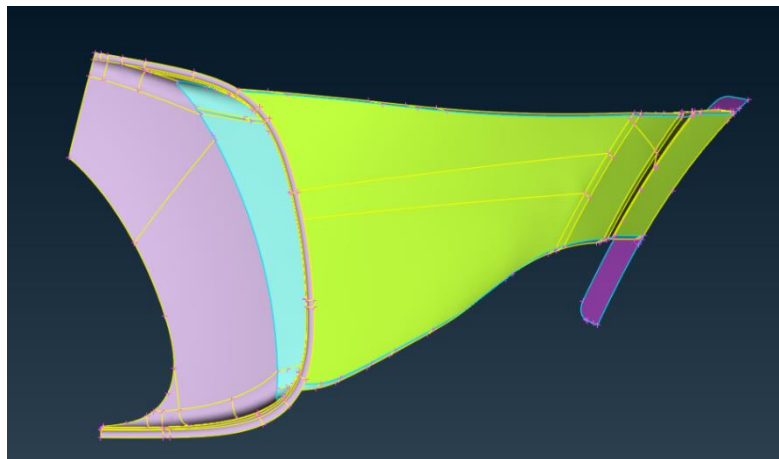


5.2 Prima fase di sensitivity

Nella prima fase di "sensitivity" eseguita si è scelto di mantenere invariata la struttura esterna dell'automobile.

In particolare, le dimensioni delle sezioni di inlet e outlet del sistema air curtain sono rimaste invariate rispetto al caso di progetto, ma è stata modificata la geometria interna dei condotti in maniera tale da modificare esclusivamente l'evoluzione del flusso al loro interno.

L'obiettivo principale di questa modifica è stato quello di rimuovere le possibili superfici di discontinuità presenti all'interno della canalizzazione, come spigoli, gradini e altre possibili fonti di ricircolo che renderebbero la corrente soggetta a possibili perdite di pressione.



5.6 Air curtain

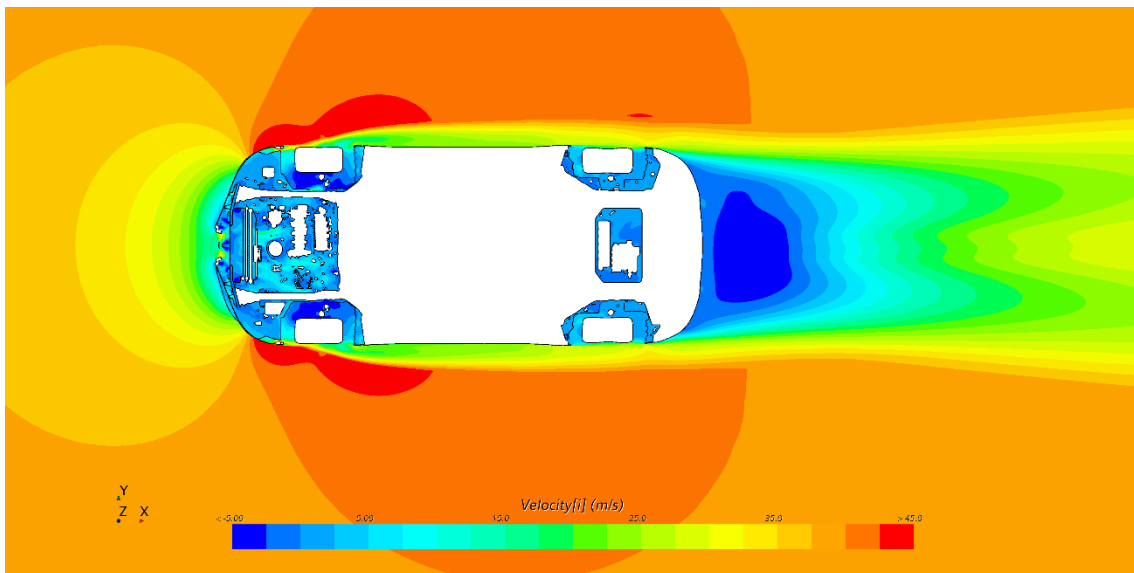
In particolare, lo sviluppo interno dei condotti è stato fatto variare avendo cura di garantire un'opportuna connessione alle altre parti del veicolo, specialmente con la PiD associata al paraurti anteriore lato vano motore (UH_Front_Fascia, dove UH indica Under Hood, tradotto "sotto-cofano"), verificando che questi non interferiscano con altri componenti del presenti in prossimità, causando quindi problemi di sovrapposizione tra le facce e conseguenti intersezioni della mesh, da evitare per la fase successiva di analisi.

Mantenendo invariati inlet e outlet, il flusso in ingresso e in uscita non varia in alcun modo la propria direzione rispetto al modello di riferimento descritto nel paragrafo 5.1.

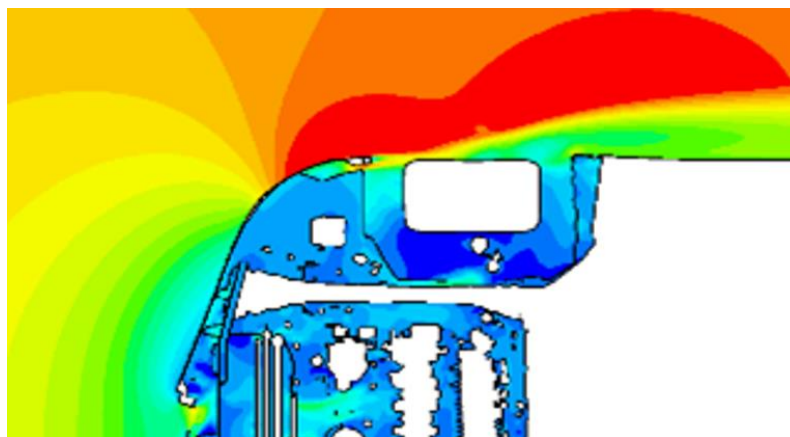
Dal momento che in questo modello non sono state fatte variare le sezioni di inlet e di outlet dei condotti rispetto alla simulazione di riferimento, ci si aspetta che non siano presenti modifiche in termini di portata che attraversa il condotto.



Tramite la creazione di opportune *plane section* su Star-CCM+ si osserva, invece, come essa vari sia in funzione della dimensione della sezione di ingresso, ma che sia anche strettamente influenzata dalla geometria del condotto: in questo caso la portata in ingresso è pari al 89% della portata valutata nel caso di riferimento. Il parametro $K = 0.89 \cdot K_{ref}$ risulta anche esso inferiore: questo valore indica che le modifiche apportate al condotto lo fanno operare in una condizione non ottimale che conduce a un rifiuto di portata, il quale si rifletterà sulle considerazioni fatte di seguito.



5.7 X-Z Velocity plane – Top ($z = 0.249$ m)

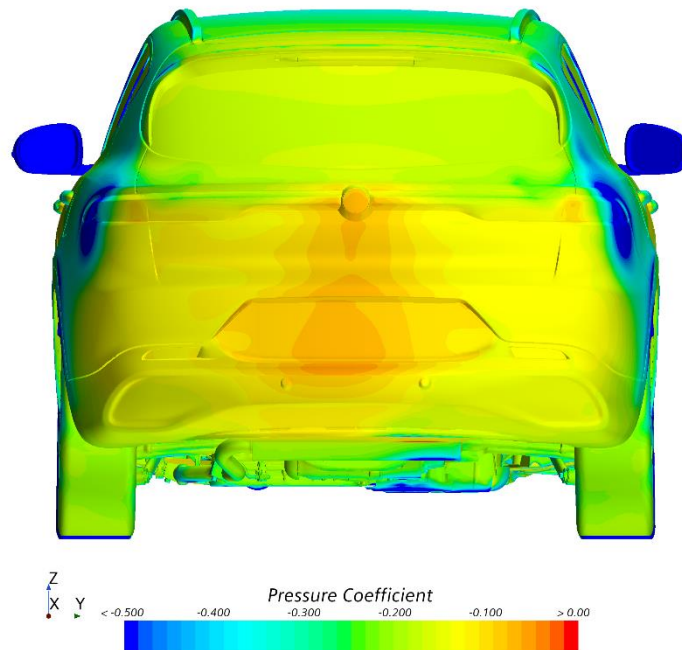


5.8 Dettaglio Velocity plane - air curtain



**Politecnico
di Torino**

Dalle immagini è possibile osservare che la regione intorno alla ruota anteriore sia caratterizzata da una riduzione delle regioni vorticosi (colore blu), la quale descrive come una migliore qualità del flusso all'interno del condotto sia in grado di abbattere significativamente la turbolenza delle ruote, posteriori comprese, tuttavia questo significativo miglioramento viene compensato dalla creazione di una scia molto più ampia a valle della vettura, che non risulta essere in grado di recuperare pressione come avviene nel caso iniziale, e portando alla formazione di una maggiore resistenza aerodinamica.



5.9 Coefficiente di pressione

Dall'immagine sopra si notano le regioni di separazione della corrente (in blu) caratterizzate da un'ampiezza maggiore rispetto al caso iniziale.

Per questo motivo il risultato della simulazione porta a ottenere un C_x relativo maggiore rispetto a quello associato al modello attualmente sul mercato, corrispondente ad un $\Delta C_x = +0.018$: la modifica eseguita in questa fase di sensitivity non risulta essere ottimizzata per ottenere un miglioramento della resistenza aerodinamica.

Si pensa così di agire sui parametri geometrici del condotto per migliorare tale coefficiente, oltre che a migliorare l'evoluzione del flusso all'interno dei condotti.



5.3 Seconda fase di sensitivity

In questa fase di sensitivity, seguendo il filo logico della simulazione precedente, è stata modificata la geometria interna del condotto, rimuovendo le possibili discontinuità al suo interno.

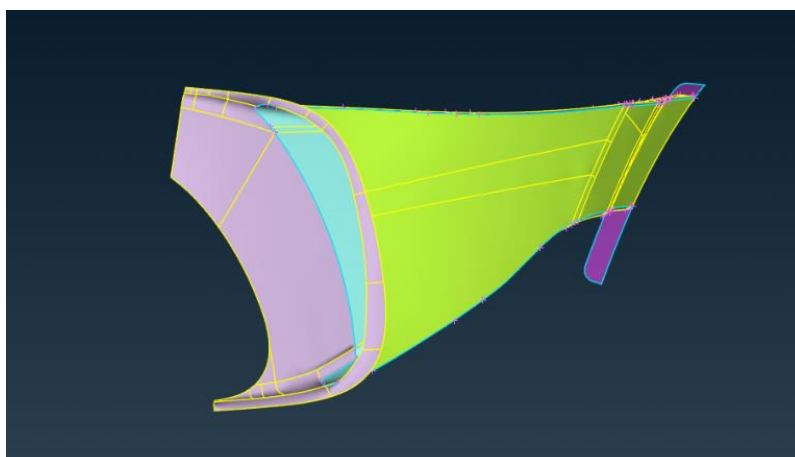
Inoltre, sfruttando il potenziale della corrente in ingresso in termini di pressione statica massima, si è scelto di ampliare la sezione di inlet del condotto per garantire una maggiore accelerazione della corrente al suo interno, aumentando il rapporto tra la sezione di inlet e quella di outlet.

In questo caso la sezione di inlet viene aumentata rispetto al modello di riferimento, mentre la sezione di outlet viene mantenuta invariata.

La portata che attraversa le canalizzazioni risulta essere pari al 95% della portata ottenuta nella simulazione iniziale: il parametro $K = 0.89 * K_{ref}$ descrive una condizione di rifiuto di portata non ottimale per sfruttare al meglio gli air curtain.

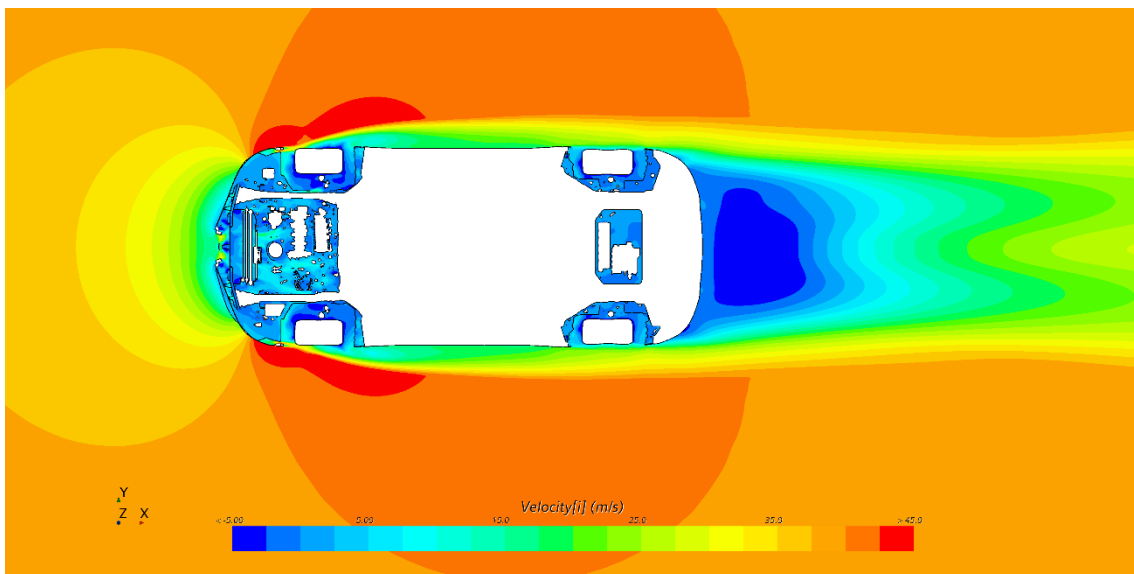
Inoltre, viene confermato così il problema del rapporto portata-geometria, la cui relazione potrebbe essere oggetto di maggiori approfondimenti.

È importante osservare che trattandosi di modifiche su componenti di dimensioni relativamente ridotte non è possibile eseguire modellazioni con accuratezza, ottenendo dei parametri definiti con estrema precisione.

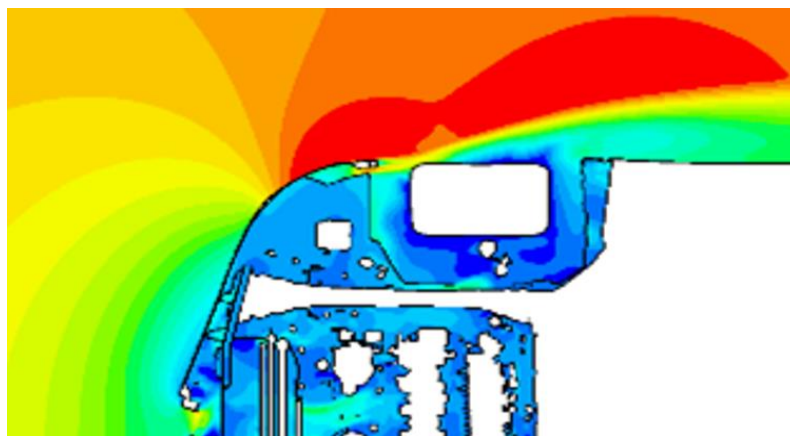




L'analisi dei risultati della simulazione ci portano ad ottenere, come osservabile nell'immagine seguente, una scia significativamente più ampia in corrispondenza della regione delle ruote anteriori, caratterizzate inoltre da un livello di vorticità maggiore, mentre la scia a valle dell'automobile è caratterizzata da un'ampiezza simile al nostro caso di partenza: il C_x ottenuto come output della simulazione, infatti, risulta essere maggiore e corrispondente ad un incremento pari a $\Delta C_x = +0.0011$ rispetto al caso descritto nel paragrafo 5.2.



5.10 X-Z Velocity plane – Top (Z = 0.249 m)



5.11 Dettaglio Velocity plane - air curtain

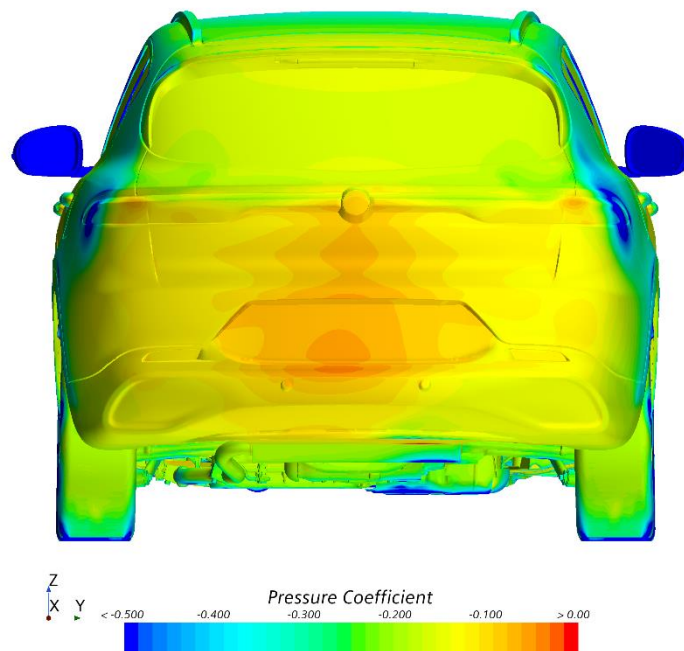


**Politecnico
di Torino**

Dalle immagini si osserva la presenza di una regione vorticososa significativa nella regione esterna in corrispondenza della ruota e che nella simulazione precedente era stata apparentemente ridotta.

Inoltre, nella regione caratterizzata da una corrente a maggiore velocità (in rosso) si apprezza una porzione caratterizzata da una velocità inferiore: questo fenomeno è attribuibile a un errore numerico in fase di calcolo durante le ultime iterazioni più che a un fenomeno fisico effettivamente presente nella corrente.

Dal grafico seguente del c_p posteriore è possibile osservare un recupero di pressione migliore da parte della corrente rispetto alla simulazione precedente ma che risulta comunque non ottimale come avviene sul modello di riferimento.



5.12 Coefficiente di pressione

Questo ci può dunque condurre alle prime due prime considerazioni su quanto sia possibile abbattere effettivamente il C_x tramite la presenza del sistema air curtain e quanto influisca la geometria del condotto sulla qualità del flusso poi destinato a ridurre la zona di turbolenza attorno alle ruote.

Queste considerazioni sono state prese in esame nelle fasi successive dell'attività di sensitivity.



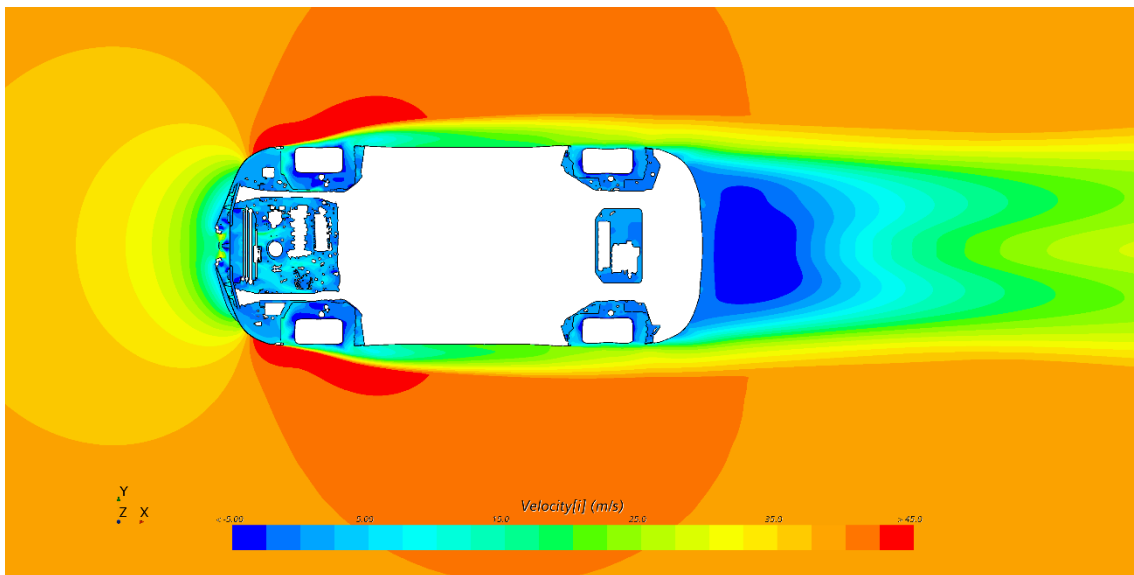
5.4 Terza fase di sensitivity

In questa simulazione si è scelto di analizzare il caso in cui non siano presenti gli air curtain sul modello per valutare quale sarebbe il C_x complessivo in assenza di tale sistema.

In tal modo, dal modello su ANSA sono state rimosse tutte le superfici associate ai condotti e rimosse le rispettive PiD, avendo cura di assegnare le pareti esterne di tale sistema rispettivamente al paraurti esterno e a quello "under hood" del vano motore.

È stata eseguita inoltre la chiusura dei fori corrispondenti alle sezioni di inlet e outlet.

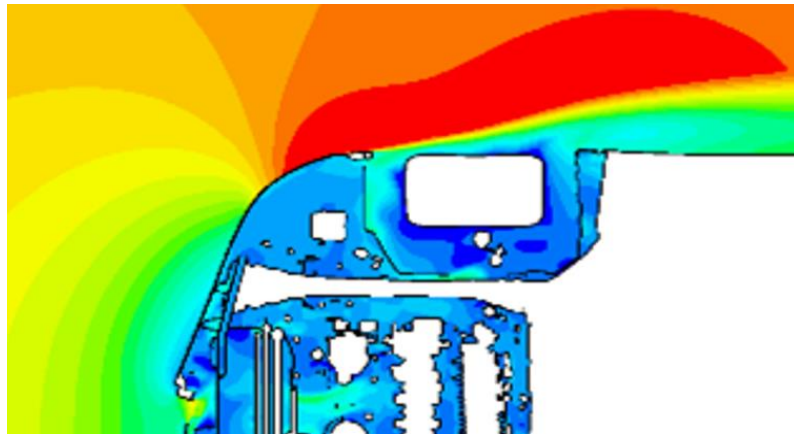
Come si può osservare dall'immagine sottostante, l'assenza delle canalizzazioni porta alla creazione di una regione caratterizzata da un maggiore livello di vorticità in corrispondenza delle ruote anteriori molto simile al caso 5.1 e da una scia con un'ampiezza leggermente maggiore rispetto al modello su cui vengono adottati gli air curtain.



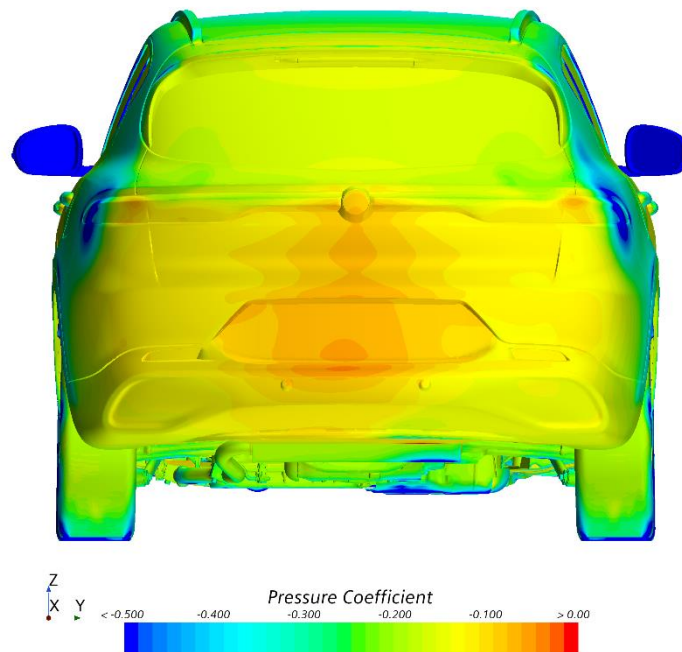
5.13 X-Z Velocity plane – Top (Z = 0.249 m)



Politecnico
di Torino



5.14 Dettaglio Velocity plane - air curtain



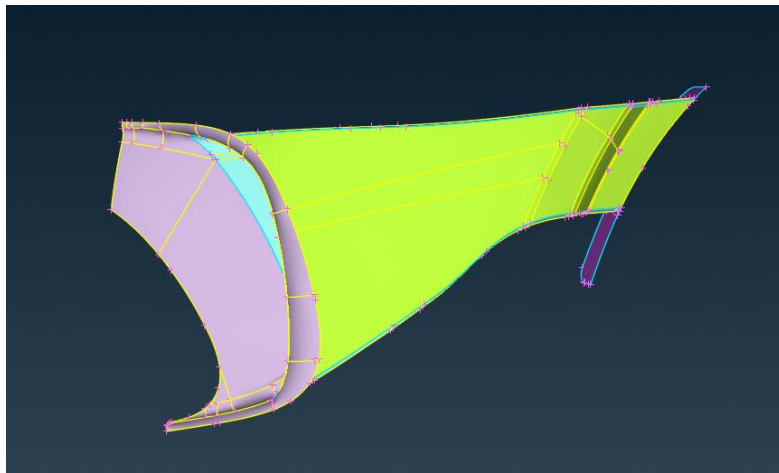
5.15 Coefficiente di pressione

Il coefficiente adimensionale ottenuto come output della simulazione risulta essere maggiore ($\Delta C_x = +0.001$) rispetto al caso con gli air curtain: tale sistema, seppur con le dovute approssimazioni, è utile per riduzioni dell'ordine del millesimo del C_x che possono portare, in ogni caso, alla riduzione delle emissioni e dei consumi.



5.5 Quarta fase di sensitivity

In questa fase si è proceduto scegliendo di tenere in considerazione quanto affermato nella fase precedente, avendo cura di rimuovere le possibili discontinuità nell'evoluzione del flusso all'interno del condotto, tuttavia è stata fatta una scelta diversa per la sezione di inlet, mentre la geometria della sezione di outlet è stata mantenuta invariata anche in questo caso.



5.16 Air curtain

In questa fase si è scelto di ridurre la sezione di ingresso dell'air curtain rendendola pari a circa il 70% della sezione del modello di riferimento, andando ad aumentare il rapporto

$$A_{out} / A_{in}$$

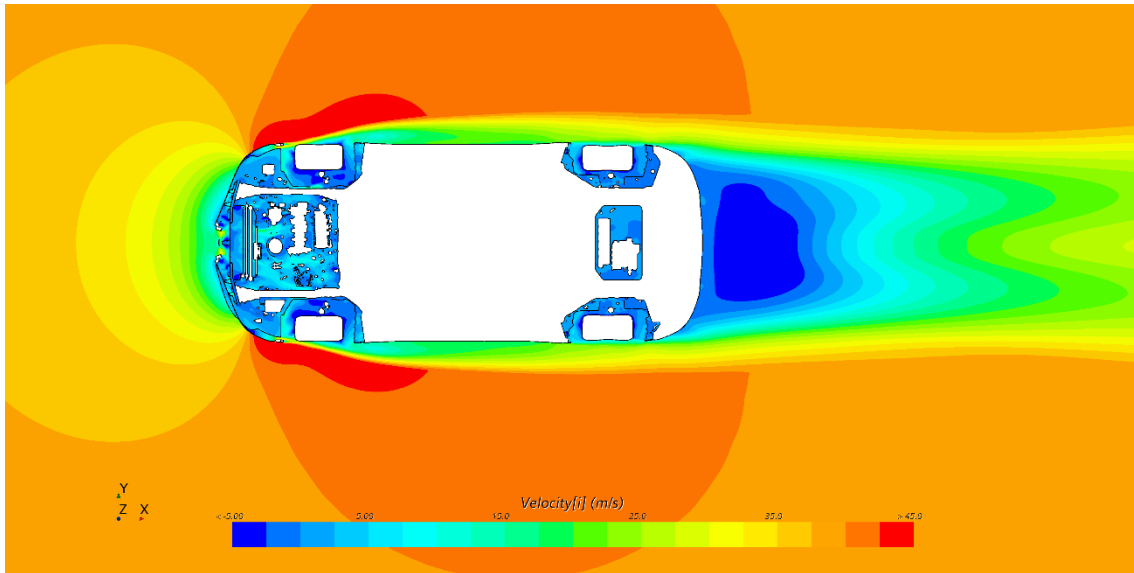
rispetto al caso di riferimento.

La riduzione della sezione di ingresso crea una notevole riduzione di portata rispetto al nostro caso di riferimento, tuttavia l'influenza della geometria del condotto determina che il parametro K risulta essere maggiore rispetto al paragrafo 5.1 ($K = 1.23 * K_{ref}$): esso indica quindi che, nonostante la riduzione di sezione di inlet, il condotto opera in una condizione migliore rispetto a quanto valutato nei casi precedenti, richiamando portata rispetto al caso 5.1.

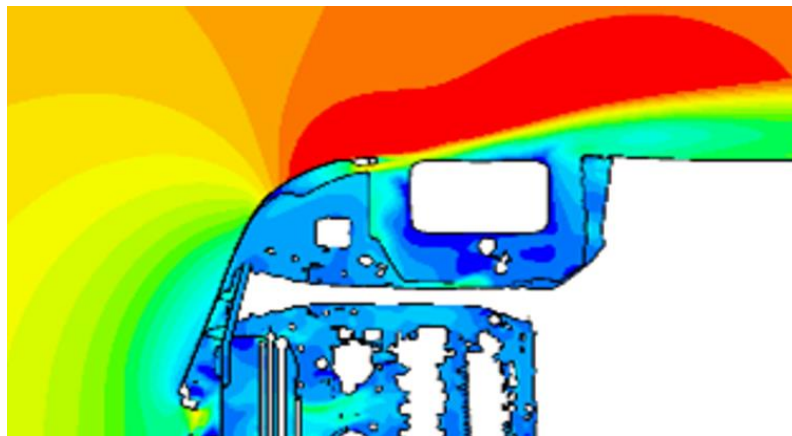
La riduzione della sezione di ingresso, a parità di sezione di outlet, ha come effetto risultante sulla corrente una minore accelerazione all'interno del condotto stesso, con un livello di pressione sull'outlet necessariamente maggiore (per Bernoulli).



Politecnico
di Torino



5.17 X-Z Velocity plane – Top (Z = 0.249 m)

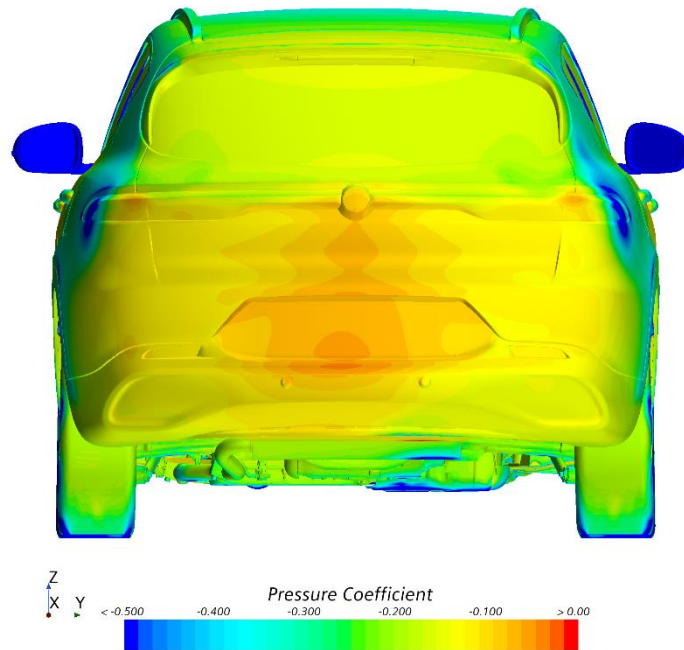


5.18 Dettaglio Velocity plane - air curtain

Seppure dalle sezioni seguenti non siano presenti significativi miglioramenti della scia complessiva a valle dell'automobile e dal dettaglio in corrispondenza dell'air curtain (tranne per la creazione di una corrente sull'outlet con una velocità minore), la simulazione porta a un piccolo miglioramento del coefficiente di nostro interesse ($\Delta C_x = -0.0002$) rispetto al modello di nostro riferimento.



**Politecnico
di Torino**



5.19 Coefficiente di pressione

Seppure il miglioramento ottenuto sia di entità praticamente trascurabile (in quanto ottenuto sulla quarta cifra decimale), dal momento che i miglioramenti considerati significativi coinvolgono al massimo la terza cifra decimale del C_x , questa simulazione tuttavia ci permette di comprendere meglio un aspetto del problema: per ridurre il C_x complessivo agendo sulla geometria del sistema air curtain è possibile modificare la sezione di inlet del condotto riducendola, oltre a modificare l'evoluzione del flusso all'interno dei condotti per limitare i rifiuti di portata, come è stato descritto nelle simulazioni precedenti.



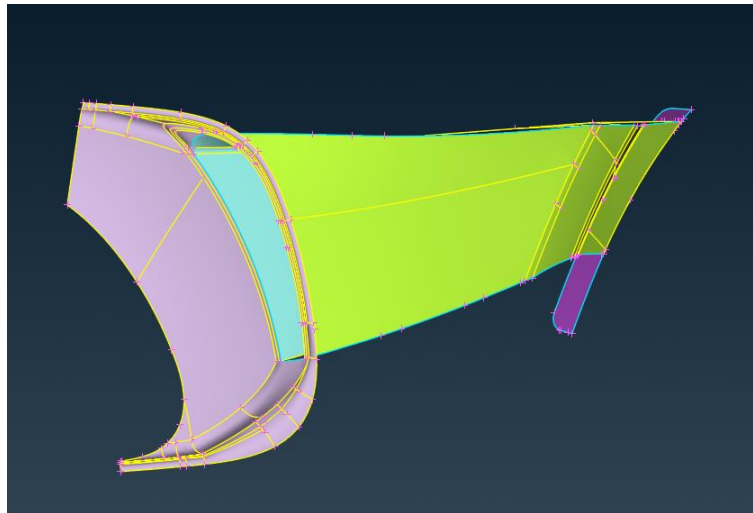
5.6 Quinta fase di sensitivity

In questa fase si è cercato di applicare le considerazioni precedentemente fatte.

La sezione di inlet è stata ulteriormente ridotta, rendendola circa pari al 60% della sezione del modello di riferimento mentre la sezione di outlet è stata mantenuta praticamente invariata: il rapporto tra le sezioni di outlet e inlet risulta quindi aumentato rispetto al caso di riferimento. Inoltre, con l'obiettivo di limitare al minimo gli effetti associati al "rifiuto di portata" dovuto alla geometria del condotto, è stata rimossa la curvatura che seguiva il condotto nei casi precedenti e che rappresentava una sorta di gradino per il flusso all'interno.

La portata che attraversa i condotti risulta essere pari al 80% del caso iniziale, tuttavia il parametro $K = 1.35 \cdot K_{ref}$ descrive come questa modifica sostanziale nell'evoluzione porti i condotti a operare in una condizione più benefica rispetto al caso precedente: in questa condizione si ha il massimo rapporto portata-area finora ottenuto.

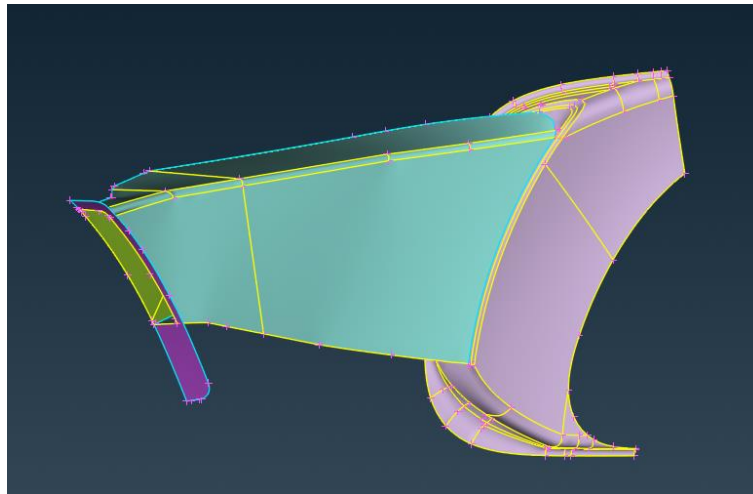
Questo risultato avrà degli effetti utili sull'efficienza aerodinamica, come verrà descritto nel seguito.



5.20 Air curtain

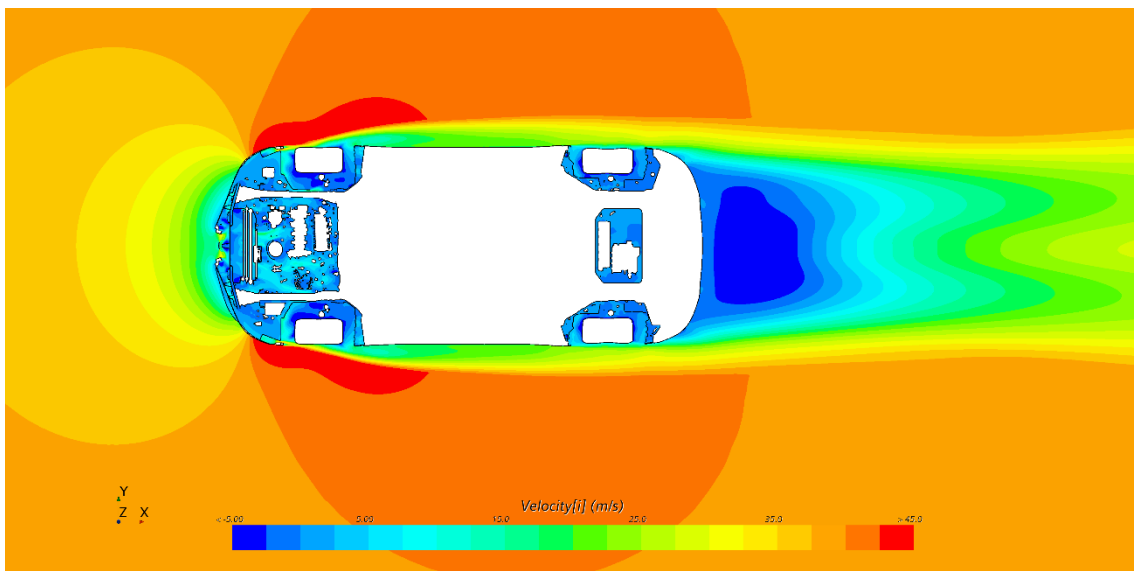


Politecnico
di Torino



5.21 Air curtain

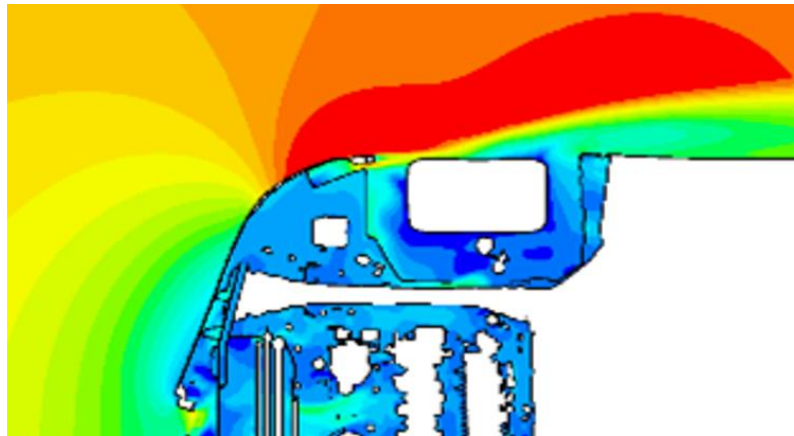
L'effetto benefico sul flusso all'interno delle canalizzazioni influisce in maniera positiva anche sull'ambiente esterno, andando a ridurre leggermente il livello di vorticità in corrispondenza delle ruote anteriori e, di conseguenza, l'ampiezza della scia se confrontate con il caso analizzato nel paragrafo 5.1.



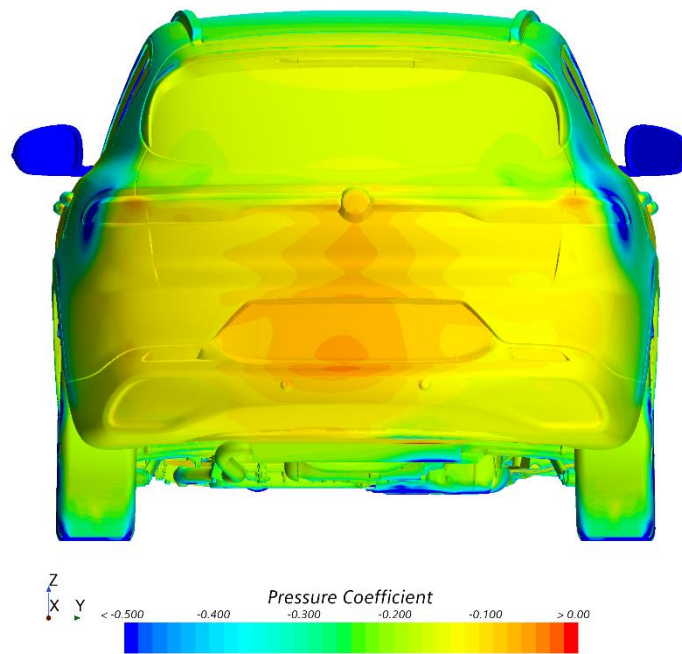
5.22 X-Z Velocity plane – Top (Z = 0.249 m)



Politecnico
di Torino



5.23 Dettaglio Velocity plane - air curtain



5.24 Coefficiente di pressione



**Politecnico
di Torino**

La migliore qualità della scia in corrispondenza delle ruote anteriori garantisce un piccolo, ma comunque significativo, abbattimento del C_x rispetto ai casi precedenti, utile al miglioramento della resistenza aerodinamica e a tutte le considerazioni che ne derivano: la sua riduzione corrisponde ad un $\Delta C_x = -0.0021$ rispetto al caso principale.

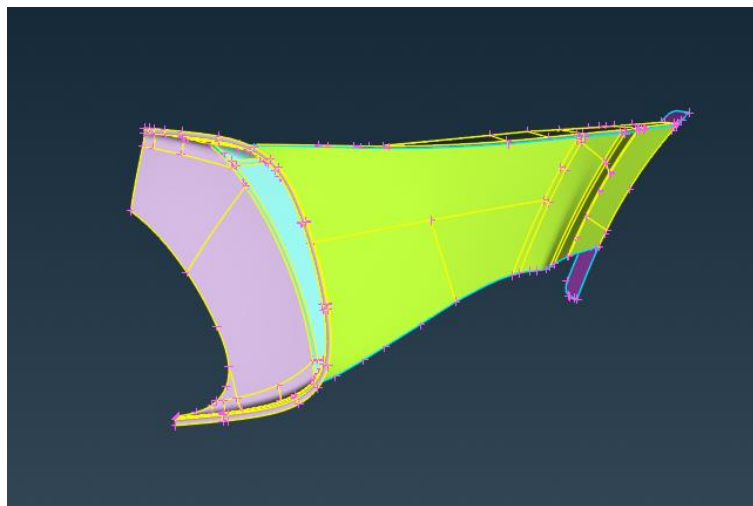
La modifica associata alla rimozione geometrica del "gradino" creato dal produttore durante la fase di progetto del modello attualmente sul mercato può essere considerata una correzione valida da poter apportare qualora si volesse agire su tale sistema per migliorare ulteriormente l'efficienza aerodinamica del modello Alfa Romeo Tonale.



5.7 Sesta fase di sensitivity

In questa fase di modellazione si è scelto di valutare l'influenza della dimensione della sezione di outlet sulla qualità del flusso in uscita nel passaruota, mantenendo fissata la sezione di inlet dei condotti e modificando la geometria interna del condotto.

In questa simulazione la sezione di outlet è stata aumentata del 35% rispetto al modello di riferimento: per questo motivo, dal momento che viene diminuito il rapporto tra le due sezioni del condotto, la corrente al loro interno sarà soggetta a una minore accelerazione e quindi a una pressione maggiore sulla sezione di outlet.



5.25 Air curtain

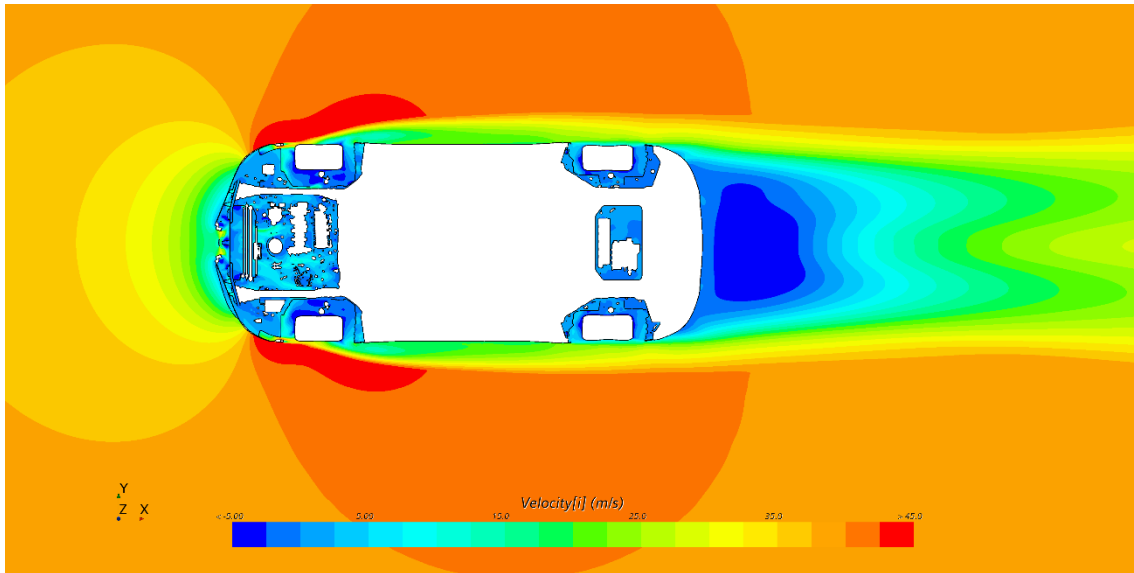
La modifica interna della geometria del condotto porta a ottenere una portata che complessivamente risulta essere maggiore rispetto ai casi precedenti, così come il parametro arbitrario K , da cui si ottiene un valore pari a $K = 1.19 \cdot K_{ref}$, se confrontato rispetto al caso di riferimento, ma inferiore a quello ottenuto nel paragrafo 5.6.

Per questo motivo si può affermare che questa configurazione non sia la soluzione migliore da adottare sul sistema air curtain.

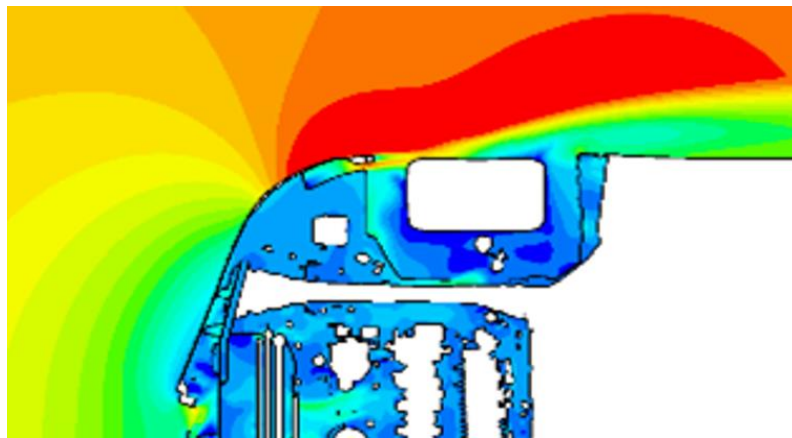
Infatti, come output dalla simulazione, non si hanno miglioramenti significativi nel C_x , che risulta essere il medesimo del caso di riferimento.



Politecnico
di Torino



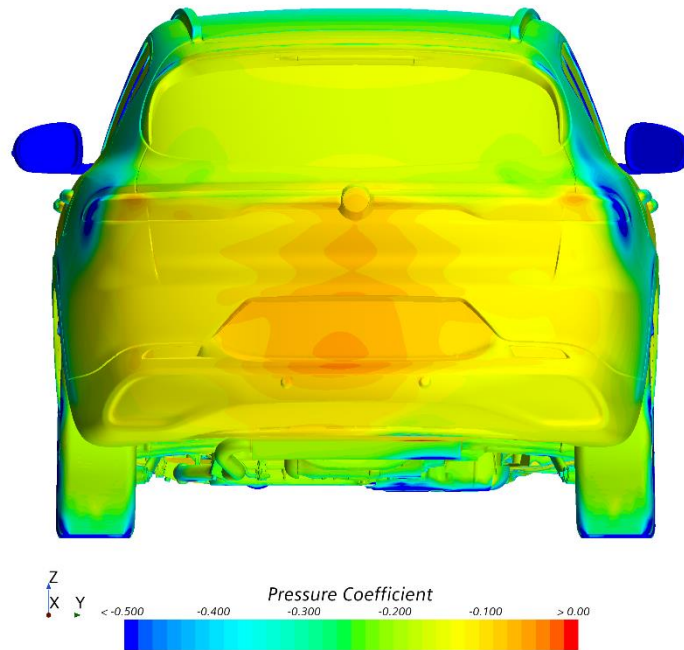
5.26 X-Z Velocity plane – Top (Z = 0.249 m)



5.27 Dettaglio Velocity plane - air curtain



Politecnico
di Torino



5.28 Coefficiente di pressione

Come osservabile dalle immagini, la corrente in uscita dall'air curtain permette di creare un flusso in corrispondenza della ruota anteriore caratterizzato da un'ampiezza e da un livello di vorticità leggermente inferiori rispetto al caso di partenza, tuttavia la scia a valle dell'automobile non subisce significative riduzioni di ampiezza, che portano a ottenere un C_x identico al caso 5.1.

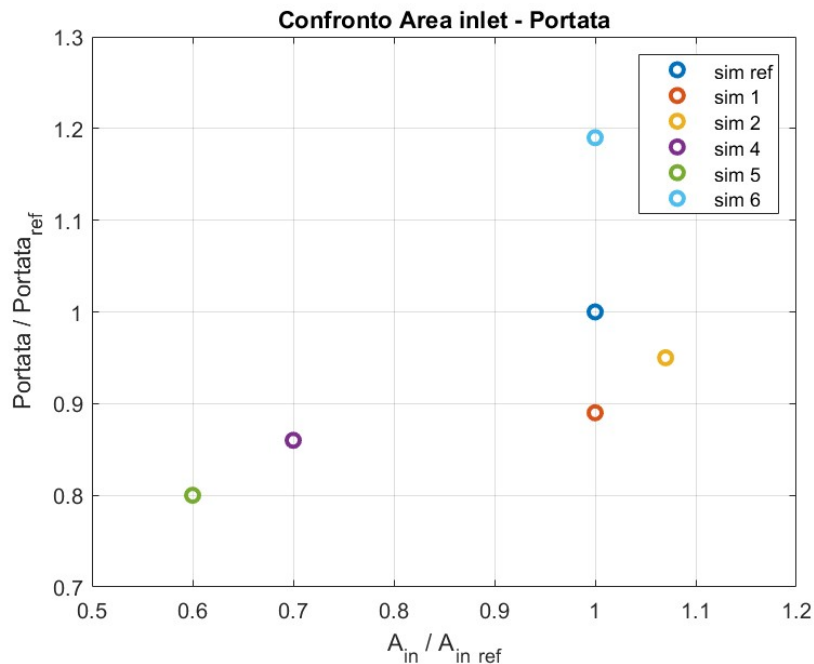


6. CONCLUSIONI

Una volta terminata la fase di sensitivity vera e propria, è possibile eseguire un confronto diretto tra le diverse casistiche prese in esame durante questa attività.

	A_{in} / A_{in_ref}	A_{out} / A_{out_ref}	Portata / Portata_ref	K / K_{ref}	ΔCx
SIM 1	1	1	0.89	0.89	0.018
SIM 2	1.07	1	0.95	0.89	0.0011
SIM 3	/	/	/	/	0.001
SIM 4	0.7	1	0.86	1.23	-0.0002
SIM 5	0.6	1	0.8	1.35	-0.0021
SIM 6	1	1.35	1.19	1.19	0

In particolare, nei grafici successivi i paragoni tra le diverse simulazioni vengono fatti utilizzando i diversi parametri definiti in precedenza, avendo cura di renderli adimensionali rispetto ai valori ottenuti nella simulazione di riferimento. Nei grafici non viene inserita la simulazione 3 in quanto è stata eseguita in assenza del sistema air curtain oggetto di questa tesi e che risulta, in ogni caso, peggiorativa rispetto al modello utilizzato come riferimento.

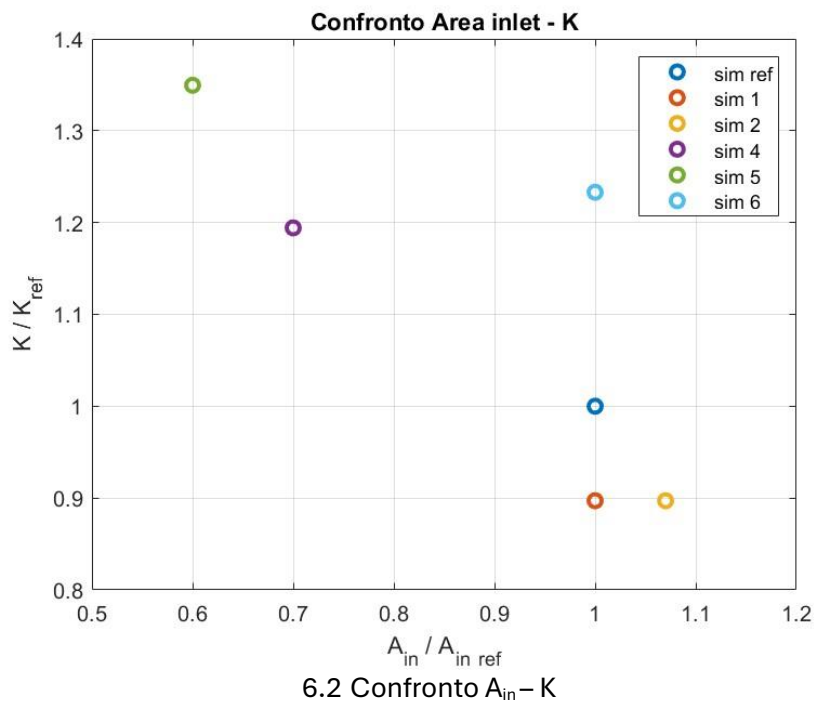


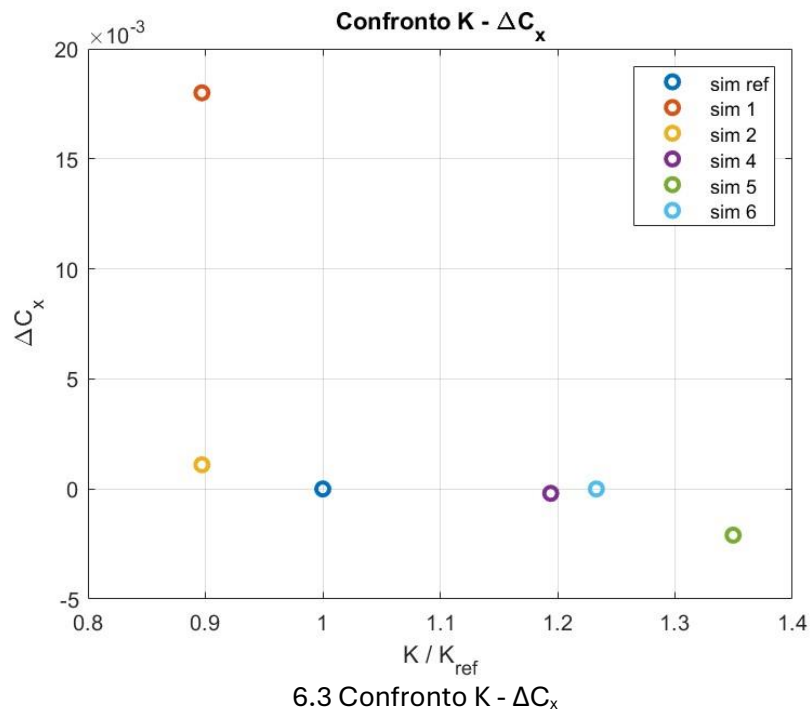
6.1 Confronto Area inlet - Portata



Come prima osservazione è possibile constatare che l'andamento della portata d'aria che attraversa i condotti abbia un andamento approssimabile ad una relazione lineare con la sezione di ingresso, come ci si aspetta dai risultati teorici e dalla relazione descritta nel paragrafo 5.1, tuttavia è utile constatare che nel caso delle simulazioni 1 e 6, a parità di sezione di ingresso dell'air curtain (confrontate con il modello di riferimento presente sul Tonale), la portata vari in maniera significativa tra i due casi, a indicare come la modellazione eseguita nella fase 6, ultima descritta all'interno della fase di sensitivity e risultato di un processo di ottimizzazione della geometria del condotto volto a limitare il "rifiuto di portata" e definito dal parametro K, sia caratterizzata da una portata in massa molto maggiore rispetto al caso descritto nella fase 1.

La simulazione 5 invece, nonostante sia quella che ci permette di ottenere il miglior C_x , risulta essere caratterizzata dalla portata in massa più piccola tra i diversi casi considerati, poichè è il caso con la sezione di inlet minore: in questo caso la portata viene utilizzata nella maniera considerata più efficace per abbattere la vorticità generata dalla rotazione dalle ruote anteriori.





Dal grafico si può osservare che le prime due fasi di modellazione eseguite risultino essere peggiorative in termini di C_x in quanto caratterizzate dal maggiore rifiuto di portata ($K < K_{ref}$), il quale non permette di sfruttare al meglio la sezione di ingresso a parità di dimensioni (nel caso 1) o maggiore (nel caso 2) rispetto al modello utilizzato come metro di paragone, a causa della geometria non opportunamente ottimizzata.

Una volta compresa la direzione in cui sarebbe dovuta evolvere la fase di sensitivity, a partire dalla simulazione 4, si è cominciato a ottenere dei miglioramenti in termini di efficienza aerodinamica, fino a raggiungere il migliore risultato nella fase 5, che appare come la fase caratterizzata anche dal migliore rapporto portata-geometria (K).

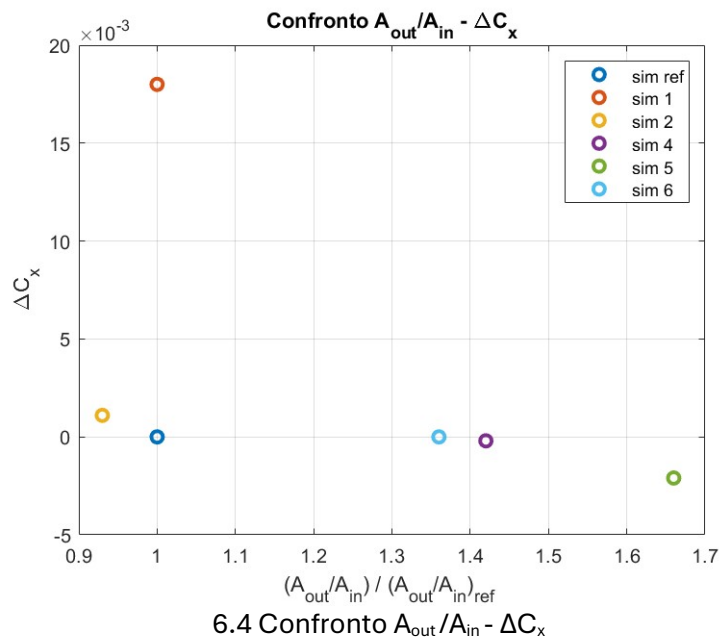
La fase 6, invece, ha permesso di comprendere che la dimensione della sezione di outlet dei condotti, a parità di inlet, non sia un parametro che influenzi in maniera significativa il flusso e che non conduca quindi a miglioramenti rilevanti per la resistenza aerodinamica, nonostante la loro geometria garantisca la portata più alta rispetto a tutte le altre soluzioni.

Per questo motivo, per garantire una riduzione della resistenza aerodinamica complessiva del veicolo attraverso l'utilizzo del sistema di canalizzazioni air curtain, è possibile trarre le seguenti conclusioni, a cui si è giunti dopo aver analizzato le diverse configurazioni.



La prima modifica utile per ottenere dei miglioramenti è agire sulla geometria dei condotti per garantire al flusso continuità e uniformità, rimuovendo possibili zone di ricircolo e separazione, responsabili di perdite di pressione totale e, quindi, di un utilizzo non ottimale della portata d'aria utile ad abbattere il livello di turbolenza a cui sono soggette le ruote anteriori e che andrà a influire, a seconda dei casi, anche sulla scia a valle dell'automobile. Infatti, come è stato affermato, la rimozione delle discontinuità permette alla canalizzazione di limitare la condizione di rifiuto di portata.

La seconda considerazione utile per migliorare il funzionamento dei condotti potrebbe essere la riduzione della sezione di inlet e quindi diminuendo il rapporto inlet-outlet, rendendo la corrente all'interno dall'air curtain soggetta a una minore accelerazione. Questa considerazione, in ogni caso, deve essere accompagnata da un'opportuna modellazione della geometria interna del condotto, con lo scopo di creare una sorta di "effetto accoppiato".



Il processo di ottimizzazione di un componente aerodinamico, in ogni caso, richiede analisi più approfondite e test in galleria per verificare che i miglioramenti ottenuti dalle simulazioni con i codici numerici portino a benefici effettivi anche nel caso reale.



**Politecnico
di Torino**

Inoltre, la modellazione di questi componenti aerodinamici andrebbe effettuata contemporaneamente alla creazione del modello e precedente alla fase di chiusura degli stili, in maniera tale da ottimizzare gli spazi occupati all'interno del veicolo (del vano motore in questo caso) e per garantire la connessione più adatta con le altre parti del veicolo, e non a posteriori come effettuato durante questa attività.

L'utilizzo degli air curtain porta a miglioramenti tendenzialmente marginali di C_x rispetto al modello caratterizzato dall'assenza di questo sistema: la differenza tra la "best solution" ottenuta in seguito al processo di ottimizzazione e il caso analizzato nel paragrafo 5.4 è pari ad una riduzione di circa 3 millesimi ($\Delta C_x = 0.0031$), che rappresenta, in ogni caso, una riduzione comunque rilevabile di resistenza aerodinamica e che comporta qualche g/km di CO_2 in meno emesso durante la fase di marcia su strada.

In ultima analisi, prima di applicare tali componenti ad una automobile è necessario comprendere quale sia il loro effettivo beneficio a livello aerodinamico e trovare, di conseguenza, il giusto compromesso con i costi da sostenere per la loro produzione e integrazione sulla vettura oggetto dell'analisi, avendo cura di verificare quale sia la soluzione migliore da adottare, il cui effetto potrebbe variare a seconda dell'automobile su cui avviene la loro applicazione.



**Politecnico
di Torino**



**Politecnico
di Torino**

7. BIBLIOGRAFIA

- Slide del corso di Aerodinamica Sperimentale (2023-24) [1]
- Slide del corso di Fluidodinamica Computazionale (2023-24) [2]
- Slide del corso di Flussi Turbolenti (2023-24) [3]
- Materiale aziendale:
 - [4] FP0641- Air Curtain - 2021-12-20.pptx
 - [5] Corso aerodinamica ottobre 2024
- Guida Star-CCM+ 17.08.008 [6]
- Siti web
 - [7] <https://www.jdpower.com/cars/shopping-guides/what-is-an-air-curtain-on-a-car>
 - [8] <https://www.motori.it/glossario/active-grille-shutter-ags>
 - [9] <https://www.automobile.it/magazine/recensioni-modelli/alfa-romeo-tonale-2-36747#alfa-romeo-tonale:-dimensioni>
 - [10] https://en.wikipedia.org/wiki/Automotive_aerodynamics
 - [11] <https://www.wrcwings.tech/2017/10/20/underbody-aerodynamics-of-the-2017-wrc-cars/>
 - [12] https://en.wikipedia.org/wiki/Detached_eddy_simulation
 - [13] <https://www.emilcar.it/auto/nuove/alfa-romeo/tonale/mild-hybrid/1-5-130cv-hybrid-tct7-sprint/2024/1000357799/>