

Alma Mater Studiorum Università di Bologna

SCUOLA DI INGEGNERIA

Sede di Forlì

Corso di Laurea in
INGEGNERIA AEROSPAZIALE
Classe L-9

Elaborato finale di laurea in:
Aerodinamica degli aeromobili

**Studio e analisi dei principali metodi di
correzione del bloccaggio in galleria del
vento**

Presentata da:
Valentino De Petris
Mattia Gulmanelli

Relatore:
Prof. Alessandro
Talamelli

Anno accademico
2021-2022

Sommario

Le gallerie del vento a pareti chiuse non permettono di ottenere risultati fedeli alla realtà a causa di numerosi effetti di interferenza. In questa tesi si provvederà ad elencare i fenomeni di maggior rilievo che contribuiscono al bloccaggio e successivamente si presenteranno le principali formule correttive da applicare ai risultati per renderli più vicini ai quelli ottenuti nei test su strada. Tali metodi di correzione saranno poi confrontati fra loro grazie al supporto di simulazioni in cui viene fatta variare sia la geometria del modello sia le condizioni al contorno, comprendendo quali formule fossero più efficienti in certe situazioni. Infine verranno proposte metodi alternativi alle soluzioni numeriche, in particolare saranno presentate le gallerie del vento a pareti aperte, comprendendo vantaggi e svantaggi rispetto a quelle con pareti chiuse. Riguardo queste ultime inoltre saranno esposti due metodi per limitare il bloccaggio agendo sulla loro geometria: le gallerie del vento a pareti fessurate e quelle con le pareti regolabili.

Indice

1	Introduzione	1
2	Teoria	3
2.1	Effetti del bloccaggio	3
2.2	Formule correttive per il bloccaggio	5
2.2.1	Metodo di correzione di Maskell	5
2.2.2	Metodo di correzione DNW Maskell	5
2.2.3	Metodo correttivo Maskell III	6
2.2.4	Metodo di correzione di Tom and Herriot	7
2.2.5	Metodo di correzione di Tom and Herriot modificato	7
2.2.6	Metodo di correzione di Mercker	7
3	Simulazioni	9
3.1	Modelli utilizzati	9
3.1.1	Modello di Ahmed body	9
3.1.2	Modello Windsor	11
3.1.3	Raccordo "A-pillar" e "C-pillar" nel modello Windsor	12
3.2	Risultati e analisi metodi di correzione del bloccaggio	13
3.2.1	Simulazione usando Ahmed Body come modello	13
3.2.2	Simulazione con modello Windsor(squareback e 25) con spigoli non raccordati	15
3.2.3	Simulazione con modello Windsor(squareback e 25) con raccordo "A-pillar"	19
3.2.4	Simulazione con modello Windsor_25 con raccordo "C-pillar"	21
4	Metodi alternativi per contenere il bloccaggio	24
4.1	Gallerie del vento a pareti aperte: confronto con gallerie del vento a pareti chiuse e principali effetti di interferenza	24
4.1.1	Convergente	27
4.1.2	Bloccaggio solido ed espansione del getto	27
4.1.3	Collettore	28

4.2	Gallerie del vento a pareti fessurate	31
4.3	Gallerie del vento con pareti regolabili	35
5	Conclusioni	39
6	Suggerimenti per lavori futuri	42

Elenco dei simboli

β	Angolo di yaw
ν	Viscosità cinematica
ρ	Densità dell'aria
θ	Fattore di bloccaggio empirico
A	Area frontale del veicolo
A_C	Area del collettore
A_N	Area del convergente
A_{sep}	Area della regione di separazione
BR	Blockage ratio
C_d	Angolo di resistenza
C_l	Angolo di portanza
C_p	Coefficiente di pressione
C_p	Coefficiente di resistenza non corretto lungo l'asse vento
C_{dcM}	Coefficiente di Maskell corretto
C_{di}	Coefficiente di resistenza indotta
C_{dt}	Doppio della sezione del tunnel
C_{pB}	Coefficiente di pressione di base
$Cd0$	Coefficiente di resistenza di forma
Cdw	Coefficiente di resistenza lungo l'asse vento
d_N	Diametro del convergente

F	Doppio dell'area frontale proiettata del veicolo
F_d	Forza di resistenza
H	Coefficiente di bloccaggio di scia di Mercker
h_m	Altezza del veicolo
h_t	Altezza della sezione della galleria del vento
L	Lunghezza del veicolo
l_0	Lunghezza della sezione della galleria del vento
l_p	Lunghezza proiettata del veicolo
L_{sens}	Lunghezza sensibile del modello
L_{TS}	Lunghezza della sezione di test
p_∞	Pressione statica all'infinito
q	Pressione dinamica non corretta
q_c	Pressione dinamica corretta
Re	Numero di Reynolds
$S_{dm,side}$	Doppio dell'area del fianco del veicolo
S_{dm}	Doppio dell'area frontale del veicolo
SSt	Shear stress transport
T	Fattore di forma del tunnel di Thompson
U_∞	Velocità del flusso in entrata
V_{dm}	Doppio del volume del veicolo
w_m	Larghezza de veicolo
w_t	Larghezza della sezione di test della galleria del vento

Capitolo 1

Introduzione

Durante il processo di design di un veicolo, i test su strada sono il miglior strumento per analizzare le forze e i momenti che si generano sul corpo investito dal flusso, determinandone così le performance. Il problema è che tali test non possono essere svolti poiché il modello completo del veicolo non è ancora stato prodotto.

L'importanza delle gallerie del vento nel determinare possibili miglioramenti nel design del veicolo è quindi fondamentale. Possono tuttavia presentarsi differenze significative rispetto ai test su strada a causa del bloccaggio. Con il termine bloccaggio si intende tutto ciò che può portare a un risultato differente da quello reale. Nelle gallerie del vento il bloccaggio è principalmente causato dalla presenza delle pareti, le quali provocano una convergenza delle linee di flusso e quindi un'accelerazione che porta ad una sovrastima delle forze aerodinamiche agenti sul veicolo. Si è notato anche che le gallerie del vento a pareti aperte forniscono risultati non corretti, infatti in questo caso si ottiene una sottostima delle forze che agiscono sul veicolo.

Esistono vari modi per ovviare al problema del bloccaggio; un esempio è quello di usufruire di gallerie del vento con pareti che presentano delle fessure, infatti, dal momento che quelle con pareti chiuse generano una sovrastima e quelle a pareti aperte una sottostima, è pensabile che i due effetti possano compensarsi. Una seconda possibilità invece è quella di accettare la presenza di un errore nei test effettuati in galleria del vento con pareti chiuse e cercare di correggere tale errore a posteriori tramite formule correttive empiriche. Esistono numerose correzioni del bloccaggio e la loro efficienza varia da caso a caso siccome sono state pensate per situazioni diverse.

Attualmente la 'Computational Fluid Dynamics(CFD)' gioca un ruolo fondamentale nell'industria automotive in quanto permette di analizzare e ottimizzare le performance di un veicolo senza costosi test e in un tempo

minore. Inoltre la CFD è utile per studiare gli effetti di interferenza nelle gallerie del vento e riconoscere a priori quei casi in cui è preferibile usare una correzione piuttosto che un'altra. Gli obiettivi di questo elaborato saranno:

1. Presentare i principali metodi di correzione e analizzare i parametri fondamentali all'interno di tali formule correttive.
2. Analizzare le performance di tali metodi tramite l'ausilio delle simulazioni CFD effettuate in precedenza in (1) al variare della lunghezza caratteristica del modello e in (2) dove vengono fatti variare sia i parametri del modello utilizzato sia le condizioni al contorno.
3. Scegliere in quali condizioni di test è preferibile usare un determinato metodo piuttosto che un altro poiché in base alla situazione l'accuratezza di ogni formula correttiva può variare.
4. Confrontare le gallerie del vento a pareti chiuse con quelle a pareti aperte, dopo averle descritte, e presentare metodi alternativi alle soluzioni numeriche per limitare il bloccaggio agendo sulla geometria.

Capitolo 2

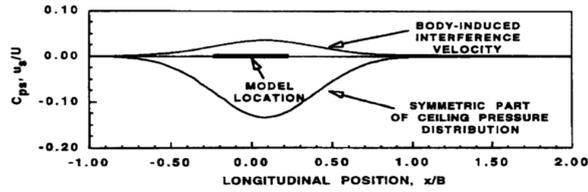
Teoria

2.1 Effetti del bloccaggio

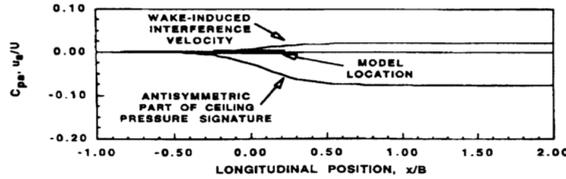
Durante i test in galleria del vento, gli effetti di interferenza sono principalmente due: il bloccaggio solido e di scia e l' "horizontal buoyancy".

Il bloccaggio solido è dato dalla presenza delle pareti nelle gallerie del vento che restringe il flusso attorno al veicolo causando un'accelerazione locale. Esso comporta un gradiente di pressione simmetrico e una sovrastima della resistenza. L'accelerazione locale porta anche ad un aumento dello spessore dello strato limite e quindi anche a un aumento delle dimensioni della scia dietro il veicolo che restringe la sezione della galleria del vento ulteriormente generando così un'accelerazione ulteriore del flusso. Tale effetto prende il nome di bloccaggio di scia e crea un gradiente di pressione asimmetrico in direzione del flusso causando un ulteriore aumento di resistenza.

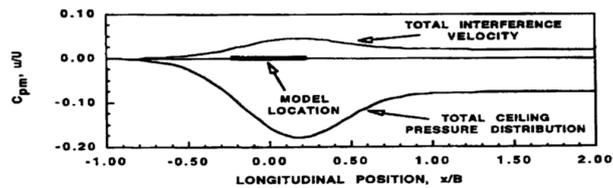
Le figure 2.1 provvederanno a fornire una valida interpretazione grafica dei concetti sopra esposti.



(a) Grafico della velocità e della distribuzione di pressione in una sezione della galleria del vento a causa del bloccaggio solido



(b) Grafico della velocità e della distribuzione di pressione in una sezione della galleria del vento a causa del bloccaggio di scia



(c) Grafico della velocità e della distribuzione di pressione in una sezione della galleria del vento a causa del bloccaggio solido e di scia

Figura 2.1: Rappresentazione grafica bloccaggio solido e di scia (3)

Lo strato limite sulle pareti cresce lungo la galleria del vento causando un aumento di velocità e influenzando il gradiente di pressione. Tale fenomeno prende il nome di "horizontal buoyancy" e, a causa della sua presenza, le gallerie del vento sono progettate con un diametro che aumenta leggermente lungo la direzione del flusso permettendo quindi di trascurare tale effetto.

Esiste un parametro che tiene conto di questi effetti che prende il nome di "Blockage Ratio" (BR), che è definito come il rapporto tra l'area frontale del modello e la sezione della galleria del vento.

$$BR = \frac{A}{h_t \cdot w_t} \quad (2.1)$$

2.2 Formule correttive per il bloccaggio

I metodi presi in esame sono stati sviluppati per gallerie del vento a pareti chiuse e le correzioni si basano sull'ipotesi di flusso invariante, implicando quindi che il punto di separazione rimanga lo stesso in presenza della galleria del vento. Nella tesi, le correzioni sono presentate per il coefficiente di resistenza, definito come segue:

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (2.2)$$

2.2.1 Metodo di correzione di Maskell

La prima formula correttiva è quella di Maskell (2.3).

Maskell studiò in (4) gli effetti che la separazione del flusso genera sulle lastre piane ad incidenza. Tale metodo fu ricavato tramite un bilancio della quantità di moto al di fuori della scia e i risultati furono utilizzati per ottenere una formula correttiva per flussi separati.

$$\frac{q_c}{q} = 1 + \frac{1}{2} \cdot C_{d0} \cdot \left(\frac{S_{dm}}{C_{dt}}\right) - \frac{1}{C_{pB}} \cdot (C_{duw} - C_{di} - C_{d0}) \cdot \frac{S_{dm}}{C_{dt}} \quad (2.3)$$

L'ultimo termine dell'equazione rappresenta la correzione dovuta al flusso separato e quindi, se omessa, la formula (2.3) diventa una correzione per i corpi aerodinamici. Inoltre, il reciproco del coefficiente C_{pB} può essere stimato tramite un fattore di bloccaggio empirico $\theta = -\frac{5}{2}$.

Dall'equazione (2.3), trascurando l'influenza della resistenza di attrito e indotta, si ottiene la formula finale di Maskell (2.4).

$$\frac{q_c}{q} = 1 + \theta \cdot C_{duw} \cdot \frac{S_{dm}}{C_{dt}} \quad (2.4)$$

Tale formula semplificata tiene conto solamente del bloccaggio di scia causato dalla separazione. Per tale motivo questa correzione risulta essere meno appropriata per i veicoli lunghi, dove il flusso resta attaccato lungo il corpo. Si può così ottenere il coefficiente di resistenza corretto

$$C_{dw} = \frac{C_{duw}}{\frac{q_c}{q}} \quad (2.5)$$

2.2.2 Metodo di correzione DNW Maskell

La formula seguente è denominata DNW-Maskell (2.6).

Tale correzione aggiunge la dipendenza dalla lunghezza del veicolo per il calcolo della pressione dinamica corretta e quindi della resistenza (5); infatti l'equazione (2.6) è praticamente identica alla (2.4); l'unico cambiamento risiede nel fattore di bloccaggio empirico definito ora come $\theta = (\frac{L}{l_0} + \frac{5}{2})$. L'introduzione della dipendenza dalla lunghezza è fondamentale quando il modello risulta essere molto lungo e caratterizzato da un elevato bloccaggio, come ad esempio un camion.

$$\frac{q_c}{q} = 1 + \left(\frac{L}{l_0} + \frac{5}{2}\right) \cdot C_{duw} \cdot \frac{S_{dm}}{C_{dt}} \quad (2.6)$$

2.2.3 Metodo correttivo Maskell III

La terza formula correttiva è la Maskell III(2.10).

Nel libro (6), Hackett e Cooper presentarono una versione migliore del metodo correttivo di Maskell e, come l'originale, anche questo fu sviluppato usando lastre piane variando l'angolo di attacco. Come primo passo, l'incremento di resistenza dovuto alla distorsione di scia ΔC_{dm} ottenuto dalla (2.8), è rimosso dal coefficiente di resistenza C_{dcM} valutato tramite la (2.5). Dopodiché questo contributo compare con segno negativo nella correzione della pressione dinamica mentre con segno positivo in quella del coefficiente di resistenza corretto. Il fattore di bloccaggio (θ) calcolato con la 2.7 e adottato per questa correzione è affidabile per applicazioni di terra.

$$\theta = 0.96 + 1.94 \cdot e^{-0.12h_m/w_m} \quad (2.7)$$

$$\Delta C_{dm} = C_{duw} \cdot \left(\frac{1}{1+x} + \frac{1 - \sqrt{1+4x}}{2x}\right), x = \theta \left(\frac{S_{dm}}{C_{dt}}\right) \quad (2.8)$$

$$C_{dcM} - \Delta C_{dm} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4C_{duw}\theta\left(\frac{S_{dm}}{C_{dt}}\right)}}{2\theta\left(\frac{S_{dm}}{C_{dt}}\right)} \quad (2.9)$$

La pressione dinamica è corretta tramite la (2.10)

$$\frac{q_c}{q} = 1 + \theta \cdot C_{duw} \cdot \frac{S_{dm}}{C_{dt}} - \Delta C_{dm} \quad (2.10)$$

Coefficiente di resistenza indotta

$$C_{dw} = \frac{C_{duw}}{1 + \theta\left(\frac{S_{dm}}{C_{dt}}\right)(C_{dcM} - \Delta C_{Dd})} + \Delta C_{Dd} \quad (2.11)$$

2.2.4 Metodo di correzione di Tom and Herriot

Correzione di Thom and Herriot (2.12).

Thom ed Herriot svilupparono un metodo correttivo, presentato nel libro (7), originariamente pensato per applicazioni aeronautiche e successivamente adottato per i veicoli terrestri. Tale metodo si basa sulla teoria del flusso potenziale; la scia fu modellata tramite una sorgente alla base del modello e un pozzo di uguale intensità all'infinito a valle, mentre gli effetti del bloccaggio delle pareti furono introdotti tramite una serie di sorgenti e pozzi immagini. La correzione della pressione dinamica è data da:

$$\frac{q_c}{q} = \left[1 + T \left(\frac{V_{dm}}{C_{dt}^{3/2}} \right) + \frac{1}{4} C_{duw} \left(\frac{S_{dm}}{C_{dt}} \right) \right]^2 \quad (2.12)$$

Dove il secondo e il terzo termine rappresentano rispettivamente le correzioni del bloccaggio solido e di scia. Il fattore di forma del tunnel T è definito come

$$T = 0.36 \left(\frac{w_t}{h_t} + \frac{h_t}{w_t} \right) \quad (2.13)$$

Il coefficiente corretto si ottiene poi dalla formula (2.5)

$$C_{dw} = \frac{C_{duw} - T \left(\frac{V_{dm}}{A_{dt}^{3/2}} \right) C_{duw}}{\frac{q_c}{q}} \quad (2.14)$$

2.2.5 Metodo di correzione di Tom and Herriot modificato

Nell'equazione (2.14) si nota la presenza del volume in relazione con lo spessore di scia ed è dimostrabile che esso non alteri la resistenza. Trascurando tale termine si ottiene una formulazione più accurata del coefficiente di resistenza che viene chiamata formula di Thom and Herriot modificata. (2.15). L'equazione (2.14) è più affidabile per la correzione nel caso di gallerie del vento con gradiente di pressione indotto e veicoli lunghi ad alto "blockage ratio".

$$C_{dw} = \frac{C_{duw} - \frac{1}{4} C_{duw}^2 \left(\frac{S_{dm}}{C_{dt}} \right)}{\frac{q_c}{q}} \quad (2.15)$$

Il problema principale di tale correzione è che sottostima la resistenza dovuta alla separazione del flusso quando applicata a veicoli di terra poiché fu sviluppata per applicazioni aeronautiche.

2.2.6 Metodo di correzione di Mercker

L'ultima correzione è quella di Mercker (2.16).

Mercker sviluppò un metodo, presentato nel libro (8), dove la teoria del flusso potenziale è utilizzata per la correzione del bloccaggio solido, mentre la correzione del bloccaggio di scia è basata sui precedenti studi di Maskell e Thom. Il metodo di Mercker, presentato nel suo libro, è basato sulla correzione della pressione dinamica data dalla (2.16). Tale metodo usa l'area frontale proiettata (F) e la lunghezza proiettata (l_p) del veicolo calcolate rispettivamente nella (2.17) e nella (2.18).

$$\frac{q_c}{q} = \left[1 + \frac{2T}{\pi} \left(\frac{F}{\sqrt{l_p} V_{dm}} \right) \left(\frac{V_{dm}}{C_{dt}^{3/2}} + \left(\frac{S_{dm}}{C_{dt}} \right) \left(\frac{1}{4} C_{duw}(\beta = 0) + \eta \frac{F}{S_{dm}} \right) \right) \right]^2 \quad (2.16)$$

$$F = S_{dm} \cos \beta + S_{dm,side} \sin \beta \quad (2.17)$$

$$l_p = L \cos \beta + w_m \sin \beta \quad (2.18)$$

Il coefficiente di resistenza si corregge come segue

$$C_{dw} = \frac{C_{duw} + \frac{1}{4} C_{duw}^2 \frac{S_{dm}}{C_{dt}}}{\frac{q_c}{q}} \quad (2.19)$$

Il vantaggio del metodo correttivo di Mercker è che tiene conto delle alterazioni del flusso in caso condizioni di angolo di yaw diverso da zero.

Capitolo 3

Simulazioni

In questa sezione sono presentati i modelli utilizzati per fare le simulazioni e le loro caratteristiche geometriche. Le simulazioni fatte al CFD saranno usate per visualizzare cosa accade al flusso quando entra in contatto con il modello e, i relativi risultati potranno essere usati per verificare l'efficacia delle formule di correzione presentate precedentemente al fine di studiarne le prestazioni e capire le condizioni migliori in cui applicare ciascuna formula.

3.1 Modelli utilizzati

Nelle seguenti simulazioni sono stati adottati due modelli di corpo: il primo è il corpo dalla geometria più semplice chiamato Ahmed body e il secondo è il modello Windsor.

3.1.1 Modello di Ahmed body

L'Ahmed body (rappresentato in figura 3.1) è un modello geometrico di una macchina che comprende una parte anteriore piatta con spigoli arrotondati e un retro con spigoli vivi nella superficie superiore. L'inclinazione di tale superficie è variabile e la massima resistenza si ottiene con un'inclinazione di 30° . La struttura della scia è molto complessa con una regione di separazione e vortici controrotanti generati ai bordi laterali inclinati. La lunghezza del modello standard è $L = 1044mm$, la larghezza è $W = 369mm$ e l'altezza è $H = 288mm$. L'altezza da terra è $G = 50mm$, mentre il diametro dei quattro piedi che permettono al modello di non toccare terra è $\Phi = 30mm$. Le simulazioni fatte con questo modello sono ricavate da (1).

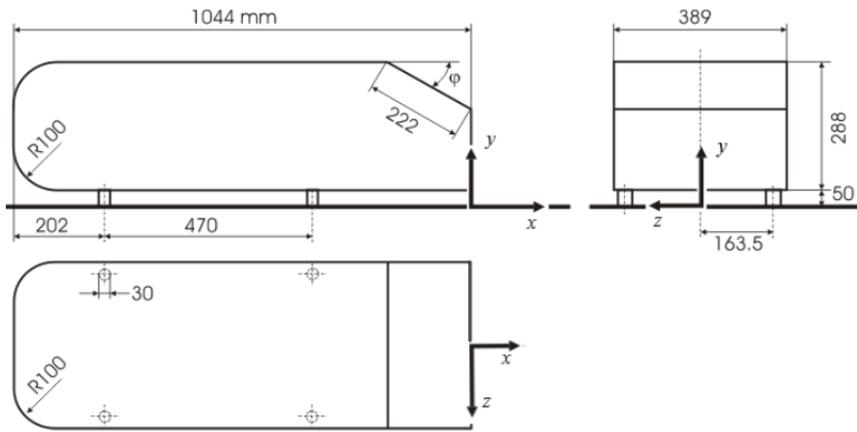


Figura 3.1: Ahmed body(1)

3.1.2 Modello Windsor

Il modello del veicolo Windsor permette di rendere più semplice la computazione poiché semplifica la geometria del veicolo (così come l'Ahmed body) rispetto ad una autovettura dotata di tutti i dettagli e fornisce risultati accurati; inoltre se confrontato con l'Ahmed Body, il modello Windsor permette di rappresentare la parte anteriore del modello in modo più realistico. Due differenti versioni di tale modello sono utilizzate per valutare l'effetto del "back angle". Il primo è un modello standard con una geometria quadrata nella parte posteriore e prende il nome di Windsor_Squareback (figura 3.2). Il secondo modello presenta invece un "back angle" di 25° sulla parte finale della superficie superiore e prende il nome di Windsor_25 (figura 3.3). Le principali dimensioni sono le seguenti: Lunghezza = $L = 1.045m$, Larghezza = $W = 0.39m$, Altezza = $H = 0.29m$, Area Frontale $A = 0.113m^2$. Per il modello Windsor_25 la lunghezza della parte inclinata è di $0.222m$. Tali dimensioni forniscono un Aspect Ratio di 1.75 e, per minimizzare la separazione al bordo di attacco, gli spigoli anteriori hanno un raggio di curvatura di $0.05m$ mentre il bordo di uscita superiore presenta un raggio di curvatura di $0.2m$. Le simulazioni fatte con questi due modelli sono state ricavate da (2).

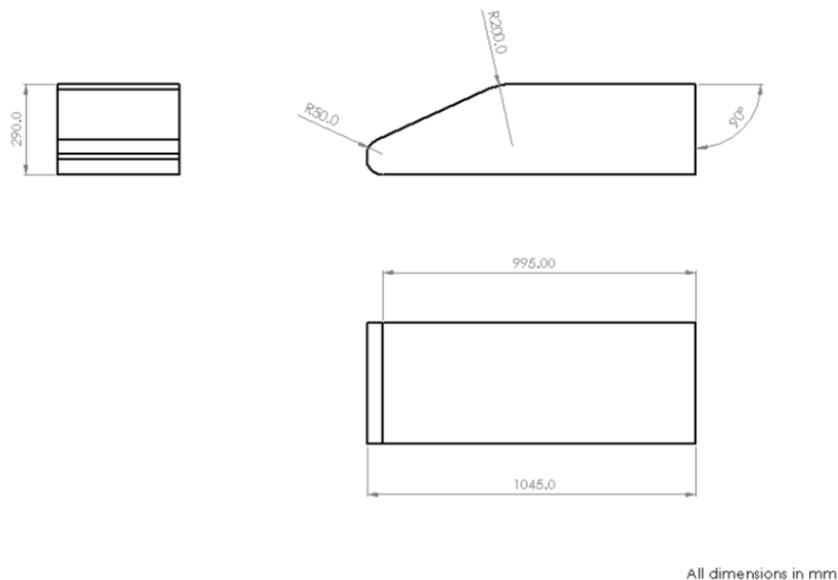


Figura 3.2: Windsor_squareback (2)

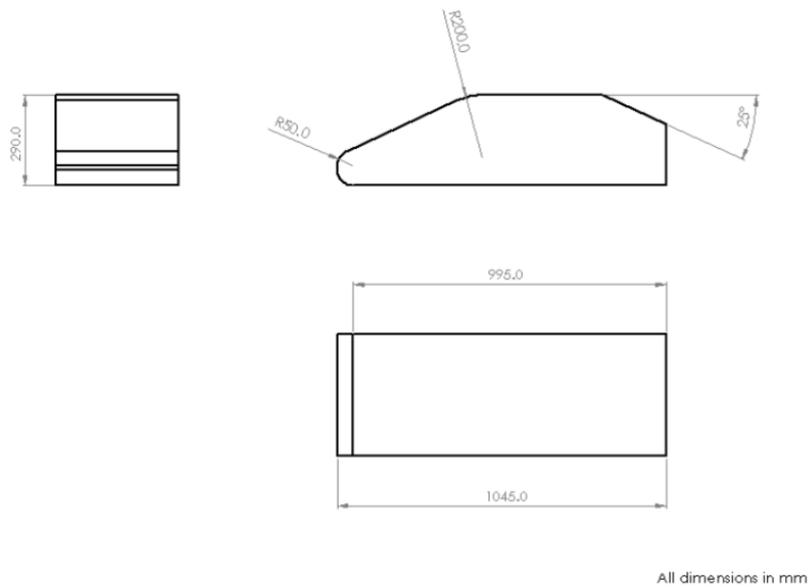


Figura 3.3: Windsor_25(2)

3.1.3 Raccordo "A-pillar" e "C-pillar" nel modello Windsor

Con il termine raccordo "A-Pillar" si intende la presenza di un raggio di curvatura dato agli spigoli vivi della superficie superiore della parte anteriore del modello, come si può notare in Fig.3.4; mentre per raccordo "C-Pillar" si intende l'arrotondamento degli spigoli posti sulla superficie superiore della parte posteriore del modello (Fig.3.5). Le simulazione per il caso di "A-pillar" e "C-Pillar" sono state effettuate con un raggio di curvatura di 50mm.

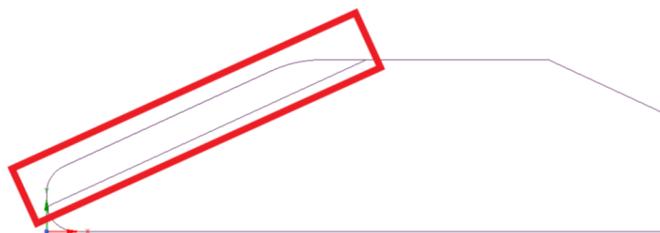


Figura 3.4: Modello Windsor_25 con raccordo "A_pillar" (2)

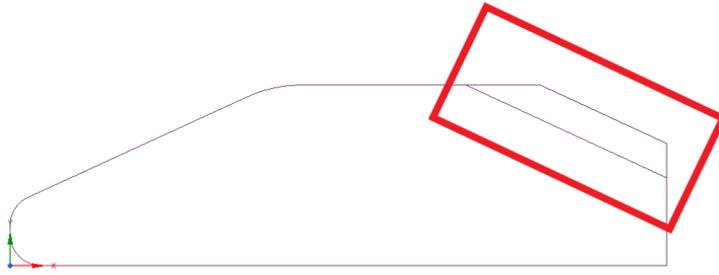


Figura 3.5: Modello Windsor_25 con raccordo "C_pillar" (2)

3.2 Risultati e analisi metodi di correzione del bloccaggio

Di seguito verranno esposti ed analizzati i risultati di varie simulazioni usando i modelli precedentemente esposti e con l'eventuale presenza di un angolo di yaw, al fine di simulare la presenza di raffiche laterali, confrontando i diversi metodi di correzione della resistenza.

3.2.1 Simulazione usando Ahmed Body come modello

I metodi di correzione esposti nella capitolo precedente sono usati per valutare la variazione del coefficiente di resistenza rispetto a quello ottenuto nel caso reale. La tabella 3.1 riassumerà tutti i risultati dei metodi di correzione delle simulazioni usando un Ahmed body di diversa lunghezza.

$$\Delta C_d = C_{d,blockagecorrected} - C_{d,opencase} \quad (3.1)$$

Veicolo testato	Standard	L=1.544m	L=2.244m
Maskell	0.021	0.026	0.032
DNW Maskel III	0.020	0.025	0.030
Maskell III	0.012	0.017	0.022
Thom and Herriot	-0.001	-0.012	-0.031
Modified Thom and Herriot	0.010	0.004	-0.006
Mercker	0.012	0.017	0.024

Tabella 3.1: Confronto dei metodi di correzione del coefficiente di resistenza per un Ahmed body di lunghezza $L = 1.544m$ e $L = 2.244m$ (1)

Il metodo di correzione è tanto più valido tanto più il ΔC_d si avvicina a zero, anche se sarebbe consigliabile l'introduzione di un errore percentuale che aiuterebbe a valutare con più precisione e in modo più intuitivo l'efficacia del metodo facilitando il confronto tra le varie formule. Si può notare quindi l'efficacia del metodo di correzione di Thom and Herriot (2.12) per il modello standard di Ahmed body che però tende a dare risultati peggiori all'aumentare della lunghezza. Quest'ultimo risultato è inaspettato dato che nella formula correttiva compare un termine che tiene conto della lunghezza del modello, che è quello volumetrico. La formula correttiva di Thom and Herriot modificata (2.15) al contrario fornisce risultati soddisfacenti all'aumentare della lunghezza del corpo, non solo rispetto alla formula non modificata ma anche rispetto a tutti gli altri metodi di correzione questo perché il termine di volume è sempre presente ma si trascura quello che tiene conto dell'ispessimento della scia, che si dimostra non causare un aumento della resistenza.

E' evidente come i risultati peggiori siano forniti dalla correzione di Maskell (2.3). Si può notare inoltre che le correzioni di Mercker (2.16) e Maskell III (2.9) producono risultati molto simili e sufficientemente buoni, questo è dato dal fatto che sono due metodi sviluppati appositamente per i veicoli terrestri, infatti tengono conto della separazione del flusso nella parte posteriore. Nonostante ciò questi due metodi correttivi sviluppano il loro potenziale quando è introdotto un certo angolo di yaw poiché tengono conto della distorsione di scia, dell'area e della lunghezza del veicolo proiettate.

DNW Maskell (2.6) fornisce risultati leggermente migliori rispetto a Maskell ma non sono comunque risultati accettabili per la correzione della resistenza se li compariamo ad esempio a quelli forniti da Maskell III, nonostante tenga conto della lunghezza del corpo.

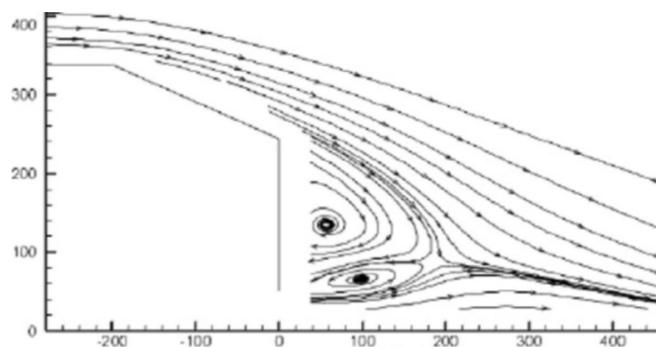


Figura 3.6: Esperimento con Ahmed body (1)

3.2.2 Simulazione con modello Windsor(squareback e 25) con spigoli non raccordati

La tabella rappresenta i risultati delle simulazioni confrontando i due modelli Windsor con angoli non raccordati e facendo variare l'angolo di imbardata:

$$\Delta C_d = C_{d_{uw}}(opencase) - C_{d_{uw}}(windtunnelwith8\%blockage) \quad (3.2)$$

$$\Delta C_d = C_{dw} - C_{d_{uw}}(windtunnelwith8\%blockage) \quad (3.3)$$

Angolo di yaw(deg)	0		5		10	
Back angle(deg)	0	25	0	25	0	25
Reference CFD	-0.058	-0.059	-0.074	-0.080	-0.109	-0.089
Maksell	-0.028	-0.029	-0.039	-0.042	-0.069	-0.068
DNW Maskell	-0.027	-0.031	-0.040	-0.044	-0.072	-0.071
Maskell III	-0.038	-0.037	-0.050	-0.050	-0.083	-0.076
Thom and Herriot	-0.044	-0.044	-0.049	-0.054	-0.075	-0.072
Modified Thom and Herriot	-0.034	-0.034	-0.042	-0.043	-0.063	-0.060
Mercker	-0.040	-0.034	-0.055	-0.045	-0.082	-0.065

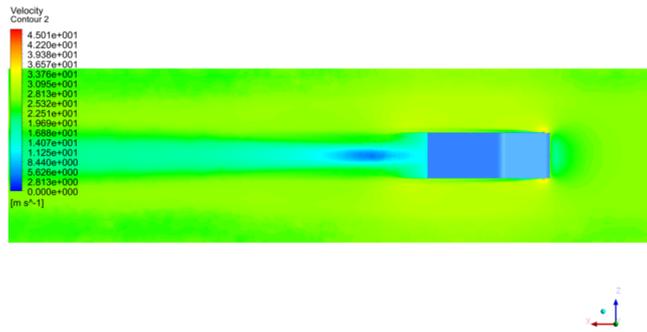
(2)

Dalla tabella, per angoli di yaw nulli, si nota come le correzioni di Maskell III (2.9) e Mercker (2.16) forniscano rispettivamente buoni risultati per i modelli Windsor_squareback e Windsor_25 pur presentando una sottostima, mentre la correzione di Thom and Herriot(2.12) produce i risultati più vicini ai valori ottenuti tramite CFD. Ad angoli di yaw di 5° e 10°, le correzioni di Mercker e Maskell III forniscono rispettivamente i risultati migliori per il modello Windsor_squareback. Una possibile spiegazione risiede nel fatto che sono due metodi sviluppati specificamente per veicoli terrestri e quindi considerano meglio gli effetti di interferenza al variare dell'angolo di yaw. Infatti all'aumentare dell'angolo di yaw, la quantità di flusso che separa aumenta, quindi si possono notare differenze fra i risultati. Il metodo correttivo di Mercker tiene conto di numerosi fenomeni di bloccaggio, comprendendo anche l'alterazione del flusso in caso di angolo di yaw non nullo e perciò fornisce risultati soddisfacenti. Per il modello Windsor_25, nel caso di angolo di yaw di 5°, il risultato migliore è fornito sorprendentemente dalla correzione di Thom and Herriot e una spiegazione deve essere ancora

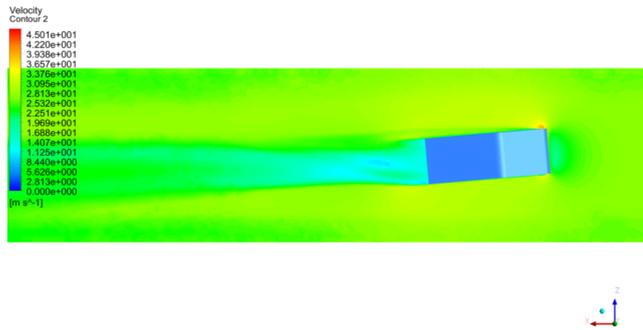
trovata. Aumentando a 10° l'angolo di yaw, la distorsione di scia aumenta a causa del bloccaggio locale e i risultati migliori sono ottenuti tramite Maskell III in quanto tale correzione tiene conto della distorsione di scia.

Anche in questa simulazione Maskell(2.3) e DNW Maskell(2.6) non sono metodi efficienti per entrambi i modelli poiché Maskell tiene conto solo del bloccaggio di scia ed è applicato per correggere la resistenza dovuta alla separazione del flusso, trascurando quella di attrito e indotta. DNW Maskell tiene conto anche della resistenza di attrito fornendo risultati leggermente migliori rispetto a Maskell, non ancora soddisfacenti, ma più affidabili per veicoli lunghi dato che all'aumentare della lunghezza aumenta anche la resistenza dovuta all'attrito, essendoci più superficie esposta al flusso.

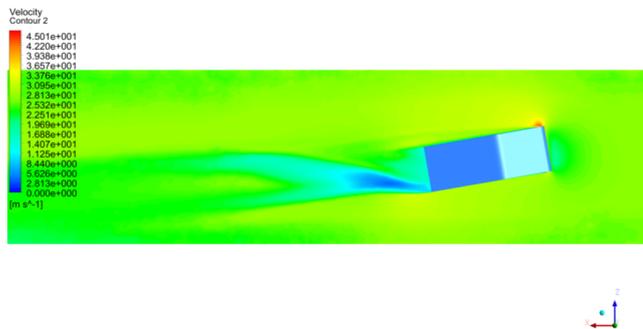
Di seguito vengono rappresentate le simulazioni fatte con il modello Windsor_sqaureback al variare dell'angolo di yaw.



(a) Simulazione con modello Windsor_squareback con angolo di yaw nullo



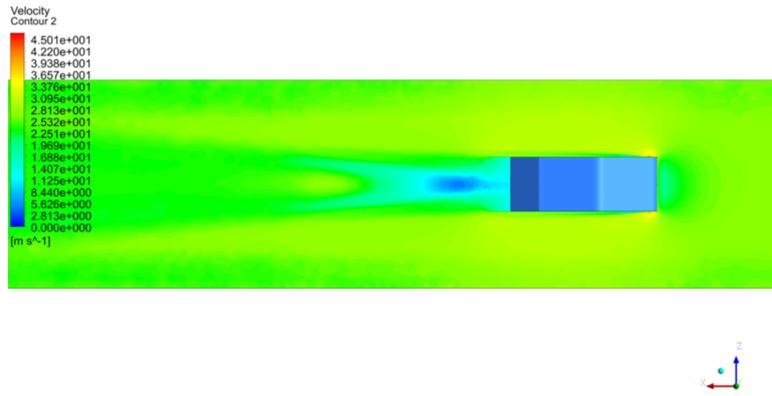
(b) Simulazione con modello Windsor_squareback con angolo di yaw di 5 °



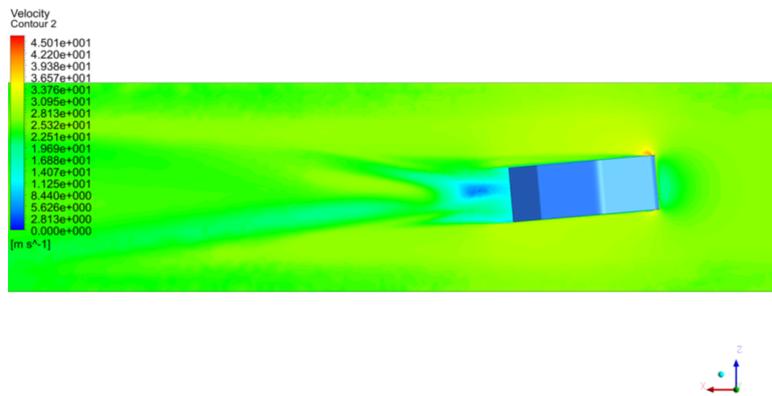
(c) Simulazione con modello Windsor_squareback con angolo di yaw di 10 °

Figura 3.7: Simulazioni con modello Windsor_squareback e angolo di yaw variabile(2)

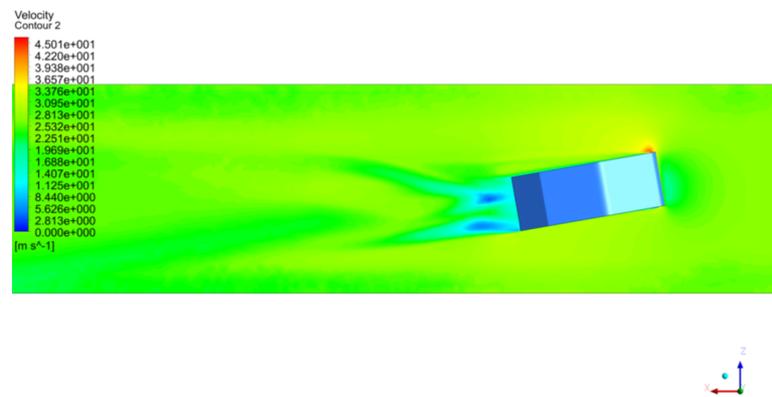
Per completezza vengono riportare anche le immagini relative alle simulazioni compiute con il modello Windsor_25 al variare dell'angolo di yaw.



(a) Simulazione con modello Windsor_25 con angolo di yaw nullo



(b) Simulazione con modello Windsor_25 con angolo di yaw di 5°



(c) Simulazione con modello Windsor_25 con angolo di yaw di 10°

Figura 3.8: Simulazioni con modello Windsor_25 e angolo di yaw variabile
(2)

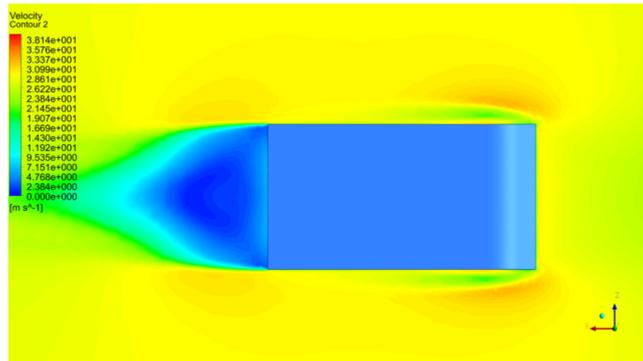
3.2.3 Simulazione con modello Windsor(squareback e 25) con raccordo "A_pillar"

Nella tabella sotto rappresentata vengono confrontati come nella simulazione precedente i due modelli Windsor al variare del angolo di yaw ma con raccordo "A-pillar":

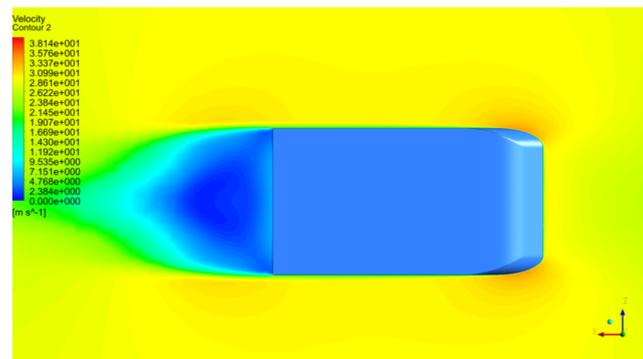
$$\Delta C_d = C_{Dw} - C_{Dww} \quad (3.4)$$

Angolo di yaw(deg)	0		10	
"Back angle"(deg)	0	25	0	25
Risultati CFD	-0.047	-0.041	-0.085	-0.069
Maksell	-0.018	-0.020	-0.045	-0.043
DNW Maskell	-0.019	-0.021	-0.046	-0.045
Maskell III	-0.026	-0.027	-0.056	-0.051
Thom and Herriot	-0.034	-0.035	-0.055	-0.055
Modified Thom and Herriot	-0.026	-0.027	-0.046	-0.044
Mercker	-0.031	-0.028	-0.065	-0.053

Come affermato nei risultati precedenti, anche in questa simulazione si nota che la correzione di Thom and Herriot (2.12) performa bene quando l'angolo di yaw è nullo per entrambi i modelli. Con un angolo di yaw di 10°, la correzione di Maskell III (2.9) presenta buoni risultati tuttavia quelli migliori sono forniti da Mercker (2.16) per il modello Windsor_squareback e da Thom and Herriot per il modello Windsor_25 con A-pillars. Per quanto riguarda quest'ultimo metodo di correzione, ad alti angoli di yaw, una maggior quantità di flusso separa soprattutto nel modello Windsor_squareback, quindi Tom and Herriot torna a non performare bene poiché tale metodo è stato sviluppato per applicazioni aeronautiche, quindi per corpi dalla geometria aerodinamica dove la resistenza di forma non dà un contributo così importante come nei veicoli terrestri. La differenza evidente nella scia generata la si può apprezzare nel confronto tra le simulazioni CFD che seguono, dove si vede un evidente ispessimento della scia prodotta nel caso di angolo di yaw di 10°.



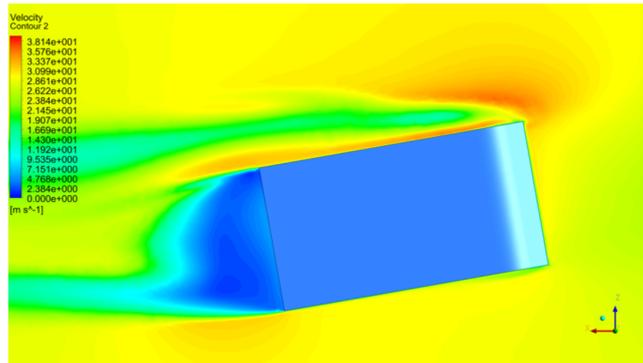
(a) Modello Windsor_squareback con spigoli vivi.



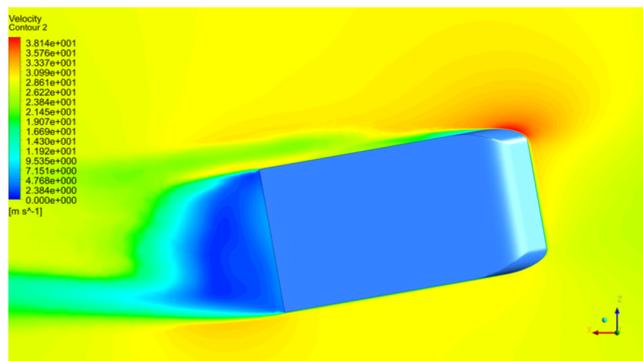
(b) Modello Windsor_squareback con raccordo "A-pillars"

Figura 3.9: Confronto Windsor_squareback con spigoli vivi e raccordo "A-pillar"(2)

Di seguito abbiamo il confronto tra i due modelli dove si introduce un angolo di yaw.



(a) Modello Windsor_squareback con spigoli vivi



(b) Modello Windsor_squareback con raccordo "A-pillars"

Figura 3.10: Confronto tra modello Windsor_squareback con spigoli vivi e con raccordo "A-pillar" con angolo di yaw di 10 gradi (2)

3.2.4 Simulazione con modello Windsor_25 con raccordo "C-pillar"

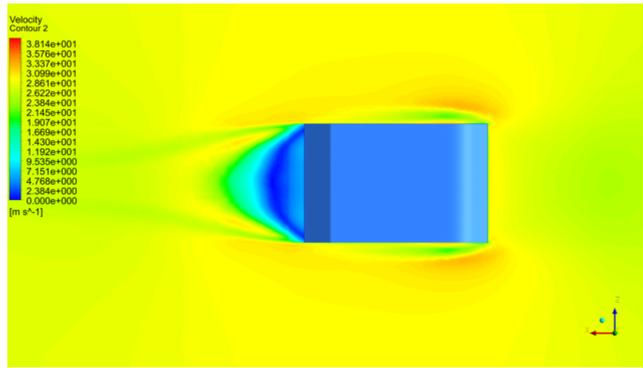
Questa simulazione è realizzata utilizzando il modello Windsor con "back angle" di 25° con raccordo "C-pillar" e facendo variare l'angolo di yaw:

Angolo Yaw(deg)	0	10
Risultati CFD	-0.041	-0.080
Maskell	-0.039	-0.064
DNW Maskell	-0.042	-0.067
Maskell III	-0.047	-0.072
Thom and Herriot	-0.052	-0.070
Modified Thom and Herriot	-0.042	-0.058
Mercker	-0.039	-0.064

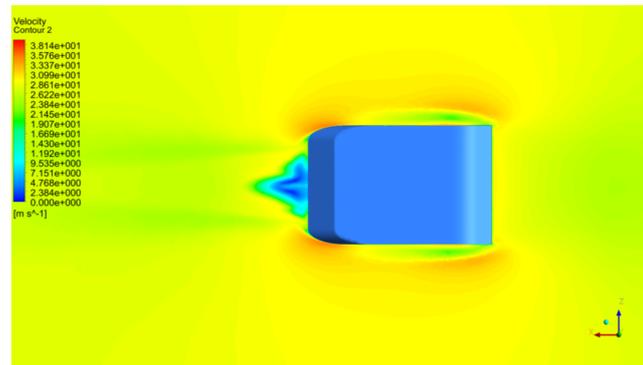
(2)

Dalla tabella si nota sorprendentemente come per angoli di yaw nulli le correzioni di Maskell (2.3) e Mercker(2.16) diano risultati con differenze trascurabili rispetto al riferimento CFD, tuttavia i migliori sono forniti da

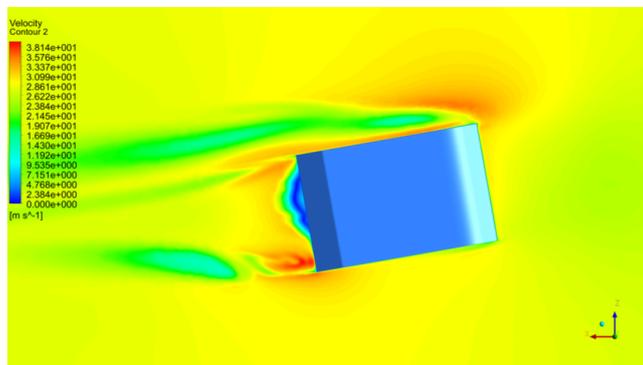
DNW Maskell(2.6) e da Modified Thom and Herriot (2.15). Per angoli di yaw di 10° , il metodo che fornisce i risultati migliori risulta essere ancora Maskell III (2.9) per le ragioni citate precedentemente. Va notato che la riduzione del coefficiente della resistenza a causa del cambio di geometria, soprattutto dopo aver introdotto un angolo di yaw, trova spiegazione nel fatto che non avendo più spigoli vivi la separazione viene ritardata, il flusso quindi rimane attaccato alla superficie e si evita la formazione di grandi vortici che andrebbero ad aumentare l'energia di scia nel piano di Trefftz, con un conseguente aumento della resistenza come nel caso del modello Windsor che presenta spigoli vivi. Questo fenomeno può essere osservato nella Figure 3.9 e Figure 3.10 dove si comparano le due simulazioni. Lo stesso discorso è applicabile nel caso di raccordo "C-pillar". Di seguito sono riportate le simulazioni dove si può osservare il diverso comportamento del flusso a seconda della geometria. Inoltre questa riduzione della resistenza si può apprezzare meglio quando viene introdotto un angolo di yaw dove si può notare un sostanziale cambiamento della scia prodotta dal corpo.



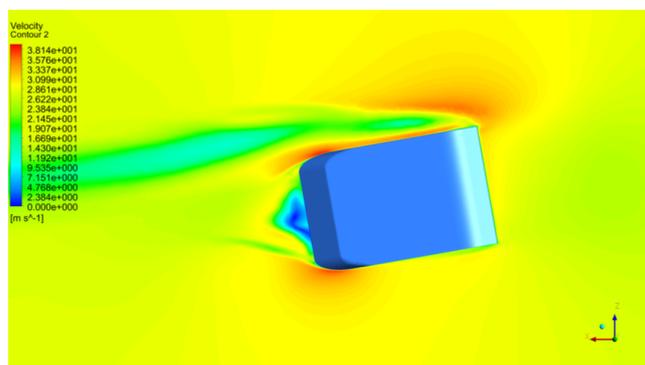
(a) Simulazione Windsor_25 con C-Pillar non raccordato



(b) Simulazione Windsor_25 con "C-Pillar" raccordato



(c) Simulazione Windsor_25 con C-Pillar non raccordato e con angolo di yaw



(d) Simulazione Windsor_25 con "C-Pillar" raccordato e con angolo di yaw

(2)

Capitolo 4

Metodi alternativi per contenere il bloccaggio

In questo capitolo verranno presentati metodi alternativi in una galleria del vento utilizzati in modo tale da limitare gli effetti del bloccaggio e rendere i risultati più fedeli alla realtà, sia nel caso che dovessimo scegliere di progettare, sia nel caso dovessimo scegliere un metodo alternativo da applicare ad una galleria del vento già esistente che presenti effetti di interferenza troppo elevati. Inizialmente si provvederà a capire come sono strutturate le gallerie del vento a pareti aperte per comprendere da dove derivi il problema del bloccaggio in esse facendo riferimento a diversi studi su come limitarlo, successivamente verranno presentati i due principali metodi utilizzati per correggere il bloccaggio in una galleria del vento a pareti chiuse. Queste ultime sono state già presentate nel capitolo 2.1 con i relativi effetti di interferenza.

4.1 Gallerie del vento a pareti aperte: confronto con gallerie del vento a pareti chiuse e principali effetti di interferenza

Le gallerie del vento a pareti aperte, come quelle a pareti chiuse, sono affette dal bloccaggio e presentano ancora risultati diversi da quelli reali. Tuttavia gli effetti del bloccaggio sono di intensità minore rispetto a quelli a pareti chiuse producendo l'effetto contrario, infatti non vi è alcun incremento di velocità dovuto alla convergenza delle linee di flusso siccome la sezione di test, comunque confinata dentro quella che viene chiamata "plenum chamber", non risente dell'immediata vicinanza delle pareti. La resistenza

misurata risulta essere quindi differente da quella reale a causa di numerosi effetti. La struttura generale di una galleria del vento a pareti aperte è rappresentata in figura 4.1.

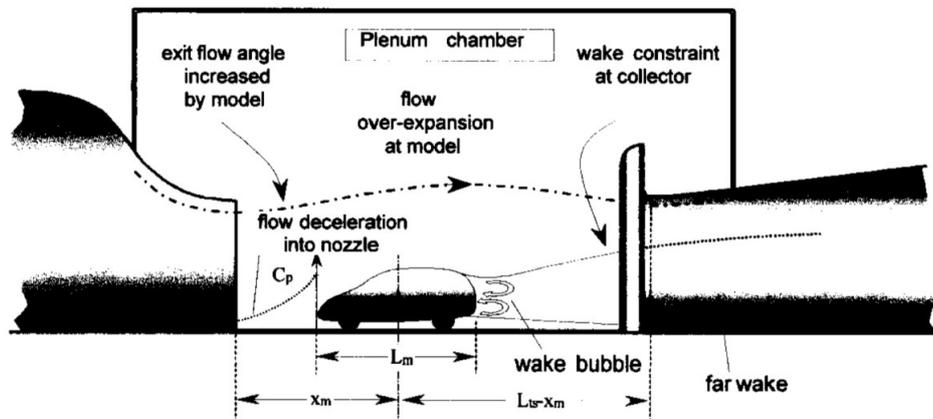
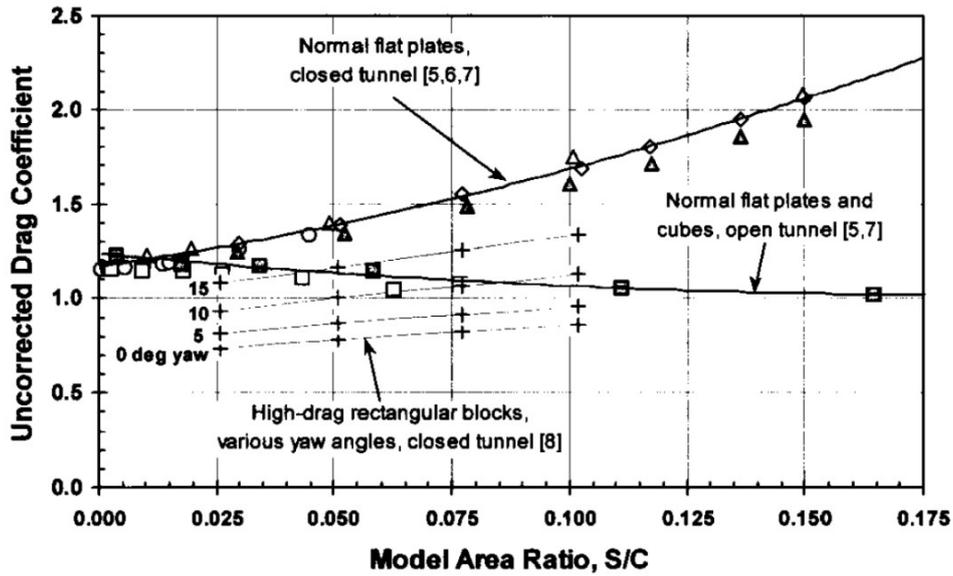
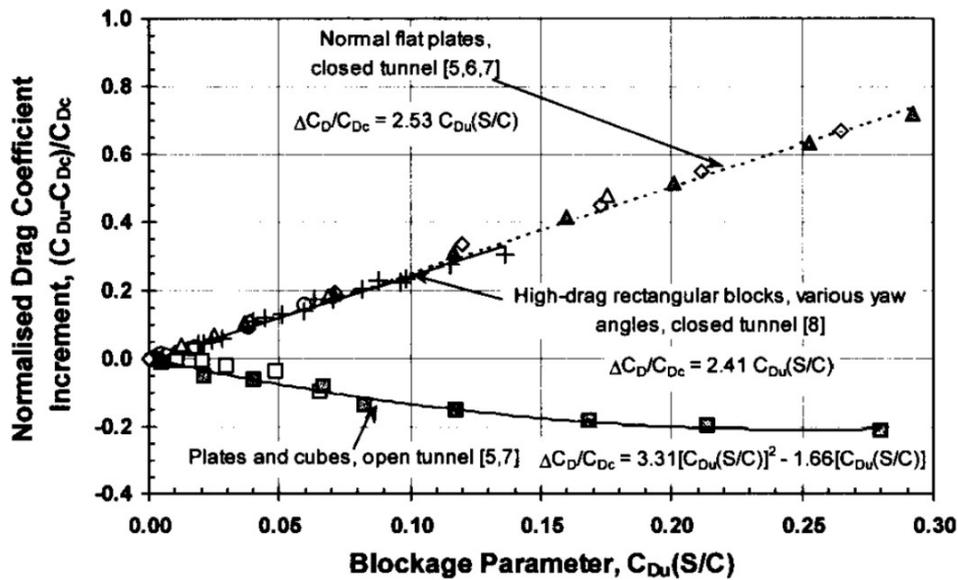


Figura 4.1: Galleria del vento a pareti aperte (9)

Un confronto tra le due tipologie di galleria del vento è reso noto tramite la figura 4.2 dove sono evidenziati sia le differenze del coefficiente di resistenza non corretto tramite formule empiriche al variare del rapporto tra area frontale del modello e area della sezione di test della galleria, sia i coefficienti di resistenza normalizzati al variare del "blockage ratio". I grafici sono ottenuti utilizzando i dati ottenuti in (10) e (11) per lastre piane e per blocchi rettangolari, entrambi posizionati centralmente nella sezione di test in galleria. Dal primo grafico si nota come nelle gallerie del vento a pareti chiuse si ottenga una sovrastima del coefficiente di resistenza mentre quelle a pareti aperte forniscano una sottostima. Il secondo grafico, invece, mostra come il coefficiente di resistenza affetto da meno errore risulta essere quello ottenuto tramite gallerie del vento a pareti aperte. Alla luce di questo, nel caso si dovesse scegliere di costruire una galleria del vento per test su autovetture cercando di avere meno effetti di interferenza possibili, ottenendo così misurazioni più affidabili, si dovrebbe optare per una galleria del vento a pareti aperte tenendo però in considerazione che il costo di queste ultime è nettamente maggiore di una galleria del vento a pareti chiuse.



(a) Effetti del bloccaggio su corpi tozzi in gallerie del vento a pareti aperte e a pareti chiuse



(b) Coefficiente di resistenza normalizzato al variare del blockage ratio per pareti aperte e per pareti chiuse

Figura 4.2: Grafici che mostrano l'andamento del coefficiente di resistenza al variare del rapporto tra aree o del blockage ratio sia per pareti aperte sia per pareti chiuse (9)

L'effetto del bloccaggio risulta perciò essere minore nelle gallerie del vento a pareti aperte ma bisogna in ogni caso fare attenzione a limitarlo progettando e correggendo in modo adeguato i componenti che contribuiscono in maniera sostanziale ad aumentare il bloccaggio. Il problema deve

essere studiato in maniera dettagliata e non è di facile risoluzione poiché la progettazione dei componenti dipende da molteplici fattori come verrà evidenziato a breve. Per quanto riguarda i principali effetti di interferenza di una galleria del vento a pareti aperte troviamo quelli dovuti:

- al convergente
- al bloccaggio solido e all'espansione del getto.
- al collettore

4.1.1 Convergente

Il convergente, a causa della presenza del modello, fa cambiare la calibrazione del sistema che misura la pressione dinamica rispetto a quella misurata con la galleria vuota. Si ricorda che la determinazione della pressione dinamica è di fondamentale importanza in quanto è uno dei parametri fondamentali nelle misurazione in galleria del vento oltre alla u_{inf} . Per ovviare a questo problema Mercker e Wiedemann (12) hanno sviluppato un metodo di correzione.

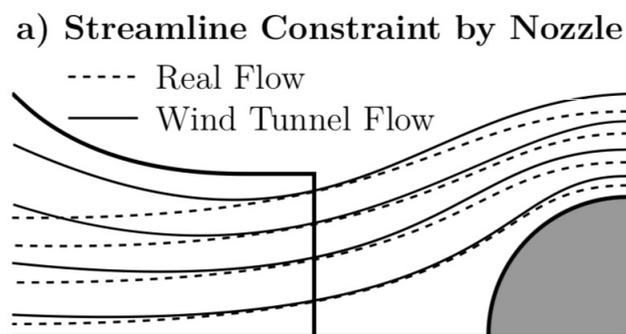


Figura 4.3: Linee di flusso alterate a causa della presenza del convergente (13)

4.1.2 Bloccaggio solido ed espansione del getto

Per quanto riguarda l'espansione del getto, il flusso di quest'ultimo tende a sovra-espandere nelle prossimità del modello provocando quindi una diminuzione della velocità rispetto al caso reale. In riferimento invece al bloccaggio solido abbiamo un problema anche quando il modello, che è un corpo tozzo, è troppo vicino al convergente provocando un aumento dell'angolo con cui il flusso investe il modello accentuando così la sua espansio-

ne. Questo è risolto tramite due metodi correttivi chiamati "nozzle method" e "plenum method" ideati sempre da Mercker, Widemann e Wickern (14)

La soluzione più semplice è quella di realizzare sezioni di test molto lunghe in modo da renderle indipendenti dalla geometria del collettore come dimostrato da Schulz-Hausmann and Vagt(15) ma questo comporterebbe ingombri e quindi costi molto elevati.

4.1.3 Collettore

Il collettore è uno dei componenti fondamentali di una galleria del vento a pareti aperte. I problemi di interferenza che si originano a causa della sua presenza nascono dal fatto che esso impone alla scia dell'oggetto un passaggio forzato che, se non adeguatamente progettato rischia di generare grandi differenze nella stima del C_d . Tutto ciò è accentuato a causa dei limiti che vengono imposti sul rapporto tra la lunghezza della sezione di test e il diametro del convergente che deve rispettare il seguente vincolo $\frac{L_{TS}}{d_N} = 3$ per non avere problemi di risonanza, come già dimostrato da diversi studi [(16),(17),(18)] e per evitare di avere un fattore di perdita di energia della galleria maggiore del 50%. Questa limitazione ci costringe a dover realizzare sezioni di test non eccessivamente lunghe, le quali potrebbero potenzialmente annullare gli effetti avversi del collettore ma che implicherebbero elevati costi nella loro realizzazione dati soprattutto dalle dimensioni molto ampie che il convergente dovrebbe avere. Va notato anche che l'area del convergente influenzerà l'area del collettore, dato che in base loro rapporto l'effetto del bloccaggio sarà più o meno accentuato come si può vedere in figura 4.5. Occorre quindi concentrarsi sulla realizzazione di un collettore dalla geometria ottimale, dandogli una forma ad imbuto in modo da limitare anche gli effetti di risonanza e minimizzare il rumore di fondo. Il principale effetto avverso che possiamo notare è la formazione di un gradiente di pressione statica dovuta al recupero di pressione che avviene a causa del collettore. Questo accumulo può influenzare la distribuzione di pressione statica all'interno della sezione di test andando ad agire conseguente sulle misurazioni della resistenza. Questo fenomeno chiamato "horizontal bouyancy", è il maggior responsabile della differenza nella misura del C_d in galleria. Nella figura 4.4 si può osservare e capire in modo intuitivo quest'ultimo fenomeno di interferenza.

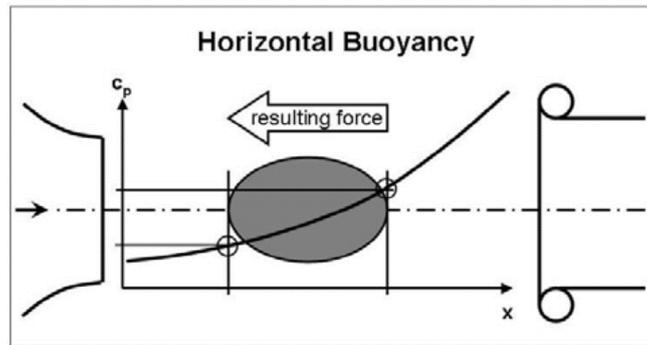


Figura 4.4: "Horizontal bouyancy": forza longitudinale a causa della distribuzione di pressione statica

La soluzione più semplice è quella di realizzare sezioni di test molto lunghe in modo da renderle indipendenti dalla geometria del collettore come dimostrato da Schulz-Hausmann and Vagt(15) ma questo comporterebbe ingombri e quindi costi molto elevati. In figura 4.5 i risultati dello studio (15) sono rappresentativi di come l'effetto del collettore sulla misura del coefficiente di resistenza sia fortemente connesso alla sua area, e in particolare usando il rapporto ottimale tra la lunghezza della sezione di test e il diametro del convergente, che nello studio corrisponde a 2.96, si può notare come gli effetti di interferenza del collettore diventino pressoché trascurabili. Va ricordato che la modellazione del collettore dipende anche inevitabilmente dal modello usato in galleria del vento, dato che l'influenza del collettore, a causa dell'accumulo di pressione statica, non deve influire né sul modello, né sulla zona di ricircolo dietro di esso. In particolare in uno studio condotto da Garry (19), è stata definita una lunghezza sensibile che è quella lunghezza dove il gradiente di pressione statica non deve influire, calcolata sulla base dell'area della regione separata tramite questa formula $L_{sens} \approx 2\sqrt{A_{sep}}$. Nello studio inoltre sono stati effettuati test su diversi tipi di autovetture in scala aventi area frontale, lunghezza geometrica e angolo posteriore variabili ed è stato evidenziato come un van avesse bisogno di una sezione di test più lunga rispetto ad una sportscar, questo perché la lunghezza sensibile di ogni modello variava a causa della differenza della superficie della zona separata. Quest'ultimo risultato, prettamente empirico, ci fa capire però che se utilizzassimo ad esempio un modello Windsor, in particolare quello che possiede il retro squadrato, denominato come Windsor_squareback, avrà una lunghezza sensibile maggiore come risultato del fatto che la zona dove il flusso separa avrà superficie molto ampia mentre il modello Windsor_25, avendo una zona dove il flusso separa di area minore, sarà caratterizzato da una lunghezza sensibile più piccola necessitando

quindi di una sezione di test meno lunga rispetto al modello precedente. I risultati però devono essere usati e interpretati in modo critico dato che gli esperimenti sono stati realizzati con modelli in scala molto ridotta, circa un tredicesimo della dimensione reale, riducendo così l'affidabilità dello studio. E' doveroso quindi fare uno studio e un progetto accurato del collettore al fine di limitare gli effetti di interferenza dato che esso dipende dal particolare modello utilizzato e da molti altri fattori.

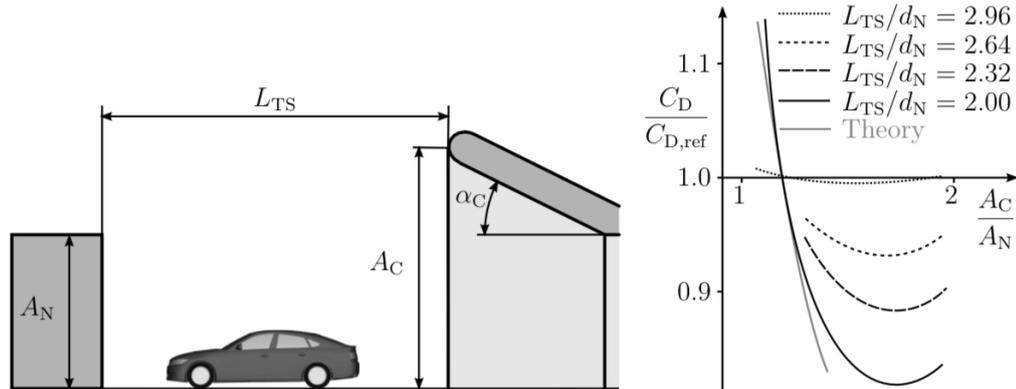


Figura 4.5: Grafico che riassume i risultati di Schulz-Hausmann e Vagt riportati dallo studio originale. Viene rappresentato il coefficiente di resistenza in funzione del rapporto $\frac{A_C}{A_N}$ parametrizzato con $\frac{L_{TS}}{d_N}$ (15)

4.2 Gallerie del vento a pareti fessurate

Esistono diversi metodi per contenere il bloccaggio di gallerie del vento a pareti chiuse, ad esempio agendo sulla geometria di esse. Una possibilità è l'impiego di pareti fessurate. Il concetto delle pareti fessurate non è recente, infatti è stato sviluppato negli anni '30 e implementato negli anni '40 nell'industria aeronautica per condurre test con velocità transoniche. E' stato tuttavia scoperto successivamente che tali gallerie funzionano bene a velocità subsoniche. Il principio su cui si basano è già stato accennato, infatti se le gallerie del vento a pareti chiuse forniscono una sovrastima dei carichi aerodinamici, poiché le linee di flusso sono schiacciate a causa della presenza delle pareti, mentre quelle a pareti aperte una sottostima, con le pareti fessurate si ottengono risultati dove i due effetti tendono a compensarsi. In (20) è stato condotto uno studio su tre modelli di macchina(4.6) collocati in quattro possibili posizioni in una galleria del vento a pareti fessurate con l'eventuale presenza di un angolo di imbardata. La figura 4.7 mostra come una galleria del vento a pareti fessurate è strutturata a livello della sezione di test.

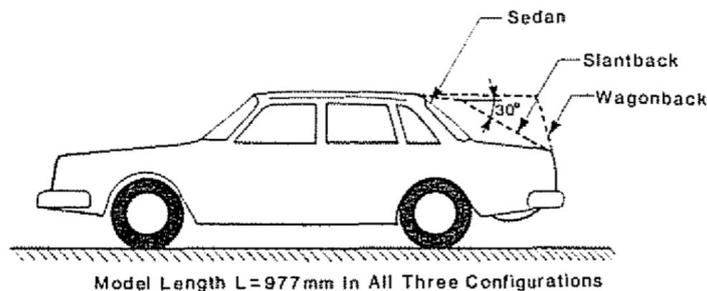


Figura 4.6: Modelli di macchina utilizzati nei test (20)

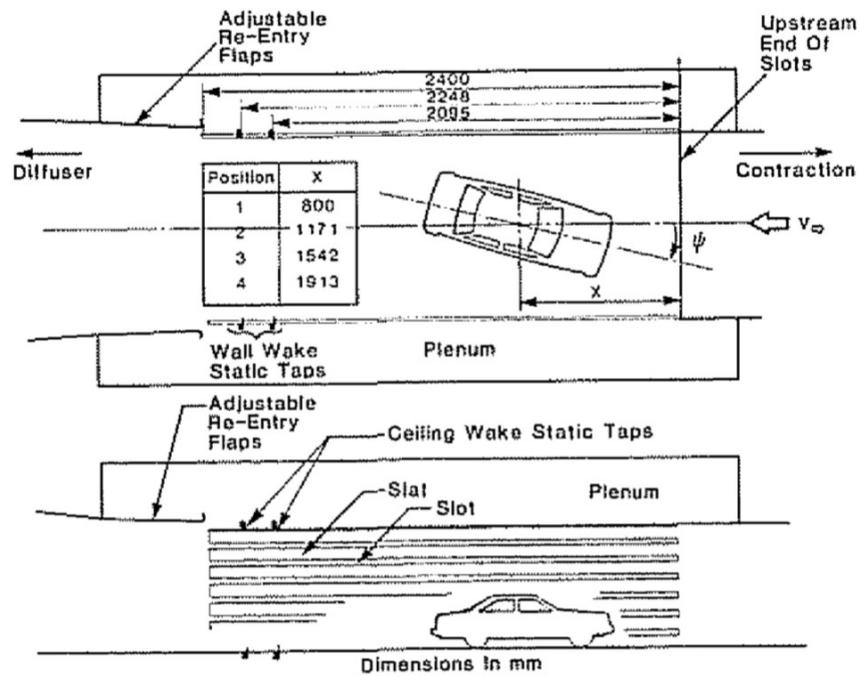
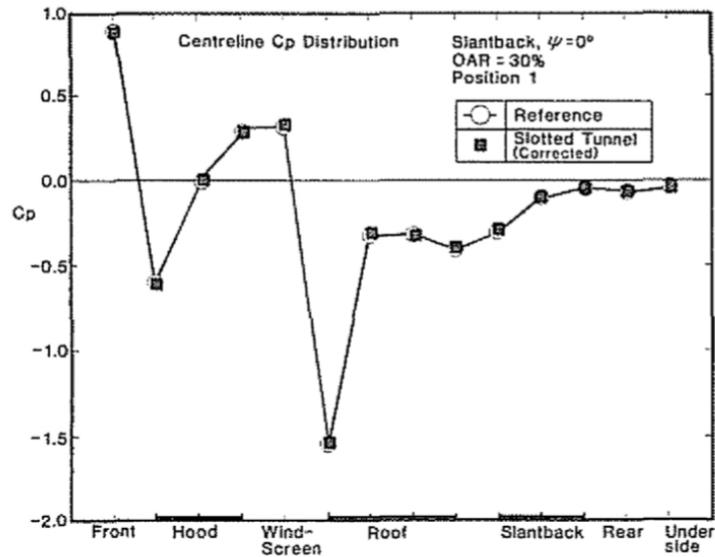
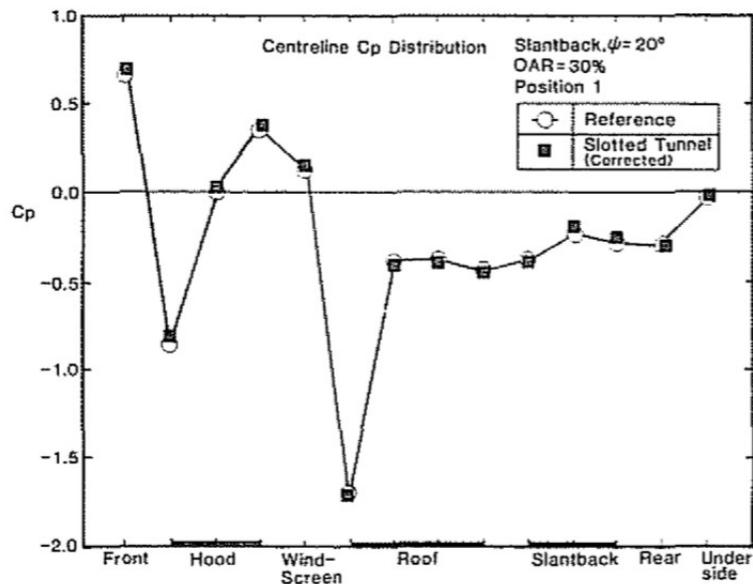


Figura 4.7: Schema della geometria di una sezione di test delle gallerie a pareti fessurate(20)

In (20) sono state compiute simulazioni sia in presenza del modello sia in assenza per comprendere se la distribuzione di pressione fosse simile a quella reale e i risultati si possono vedere nei grafici 4.8. Da essi si nota come le gallerie del vento a pareti fessurate riescano a fornire una distribuzione di pressione molto fedele alla realtà.



(a) Confronto delle distribuzioni di pressione lungo la linea di mezzzeria del piano longitudinale nel caso di angolo di imbardata nullo



(b) Confronto delle distribuzioni di pressione lungo la linea di mezzzeria del piano longitudinale nel caso di angolo di imbardata di 30°

Figura 4.8: Confronto tra le distribuzioni di pressione tra caso reale e simulazione in galleria del vento a pareti fessurate (20)

Un parametro fondamentale per le gallerie del vento a pareti fessurate risulta essere la posizione del flap che permette il rientro del flusso in galleria in modo tale da rendere le pressione di scia il più possibile vicina a zero; infatti nella figura 4.9 si può notare come al variare di questa posizione ven-

ga modificata in modo significativo la distribuzione di pressione a terra e ciò può essere utilizzato per ottenere le condizioni al contorno ottimali "all'infinito" a valle del veicolo. Per sfruttare questo vantaggio si adotta solitamente una strategia di controllo di posizione del flap basata su numerose misure della pressione di scia.

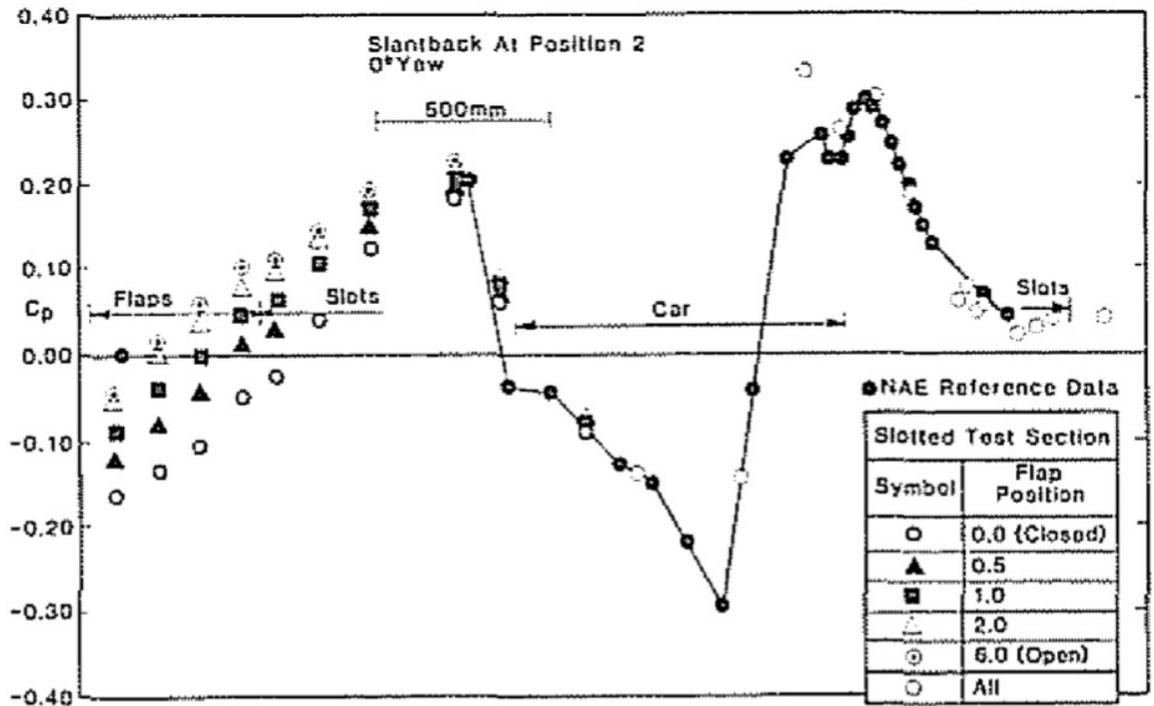


Figura 4.9: Distribuzione di pressione a terra al variare della posizione del flap(20)

4.3 Gallerie del vento con pareti regolabili

Una seconda possibilità per contenere e limitare il bloccaggio è l'impiego delle cosiddette gallerie del vento a pareti regolabili(4.10). Tale tipologia di galleria viene utilizzata dagli anni '90, soprattutto per i test di modelli sportivi e da competizione, come ad esempio la Formula 1.



Figura 4.10: Sezione di test in una galleria del vento a pareti regolabili con un modello F1 (21)

Il loro impiego risulta essere limitato poiché, oltre all'elevato grado di complessità, per costruire una galleria del vento viene investita un'ingente somma di denaro e quindi è richiesto che vengano soddisfatti numerosi requisiti, tra cui ad esempio quelli sulla rumorosità del flusso e le prestazioni della galleria. Il principio su cui si basano tali gallerie dimostra che se la distribuzione dell'inclinazione del flusso su una superficie di controllo attorno al corpo assumesse i valori che si avrebbero sulla medesima superficie di controllo se il corpo si trovasse all'interno di un dominio infinito, allora il corpo non sarebbe affetto da effetti di interferenza. L'inclinazione del flusso sulla superficie di controllo tuttavia non è conosciuta a priori. Nelle gallerie del vento tali superfici di controllo sono le pareti della galleria stessa. In questo modo le linee di flusso vicino alle pareti sarebbero le stesse che si avrebbero nei test su strada e quindi anche quelle vicino al veicolo sarebbero le stesse del caso reale, con la possibilità quindi di condurre dei test non affetti da effetti di interferenza. Per applicazioni sportive si può assumere un numero di Mach tale da considerare il flusso incomprimibile e, con gli effetti viscosi trascurabili, il flusso esterno si può assumere sia go-

vernato dall'equazione di Laplace. Sotto tali ipotesi, è possibile applicare una soluzione del flusso potenziale per il campo di flusso esterno.

Tramite una procedura iterativa, si possono determinare le condizioni necessarie alle pareti. Tale procedura iterativa si basa sull'accoppiamento di un flusso interno alle pareti (dominato dall'aerodinamica dovuta alla presenza del veicolo) e un flusso esterno immaginario, utilizzato per ridurre gli effetti interferenza. Tale regione esterna al tunnel può essere descritta tramite l'equazione di Laplace(4.11), che può essere risolta numericamente tramite il metodo delle singolarità in un flusso potenziale e un metodo a pannelli, usando come condizioni al contorno i coefficienti di pressione alla parete. I pannelli sono posizionati come in 4.12 e in ogni centroide la velocità tangenziale è determinata misurando la pressione statica alla parete tramite l'equazione di Bernoulli. La soluzione del metodo a pannelli fornirà l'intensità della sorgente di ogni centroide.

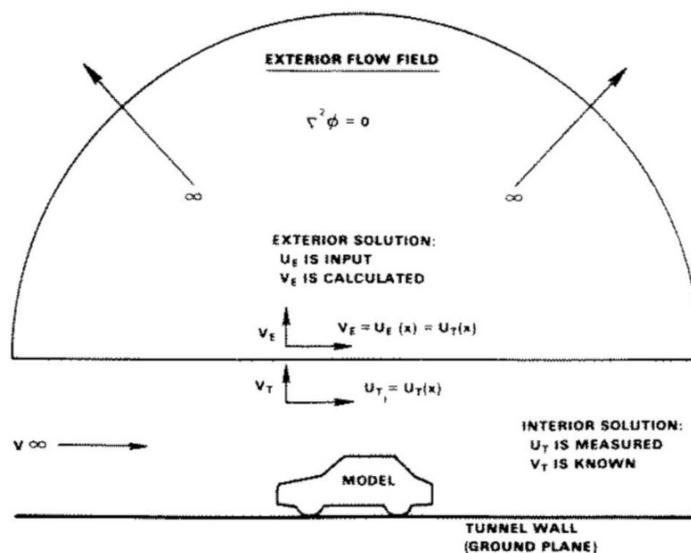


Figura 4.11: Rappresentazione schematica della soluzione della regione esterna (21)

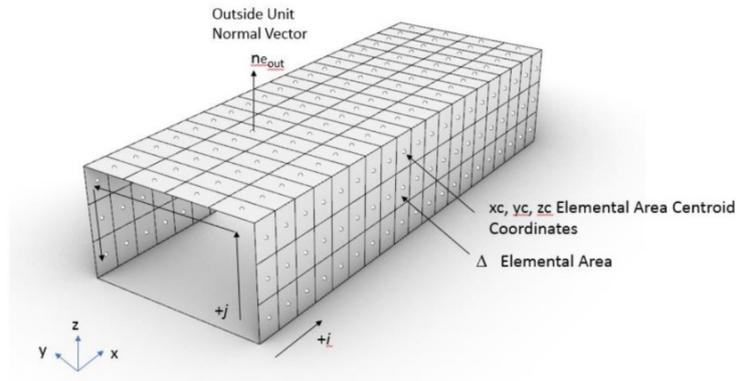


Figura 4.12: Distribuzione dei pannelli sorgente in modo da formare una superficie di controllo attorno alle pareti (21)

Si nota dal grafico in 4.13 come all'aumentare del numero di iterazioni la differenza tra i coefficienti ottenuti dai test e quelli reali diminuisca rapidamente.

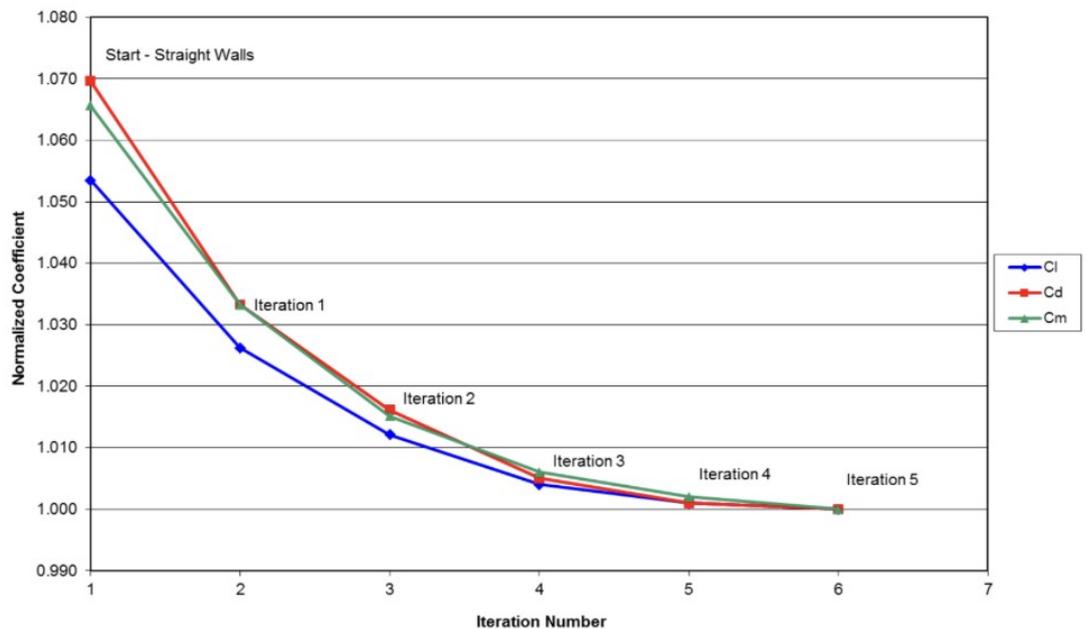


Figura 4.13: Convergenza dei coefficienti normalizzati all'aumentare delle iterazioni (21)

La figura 4.14, inoltre, mostra come dopo poche iterazioni le gallerie con pareti regolabili generino un campo di pressione molto simile a quello dei test su strada, mentre con zero iterazioni, quindi come se si avesse una galleria con pareti chiuse, la distribuzione pressione ottenuta attorno al modello differisce in maniera evidente dai due casi precedenti.

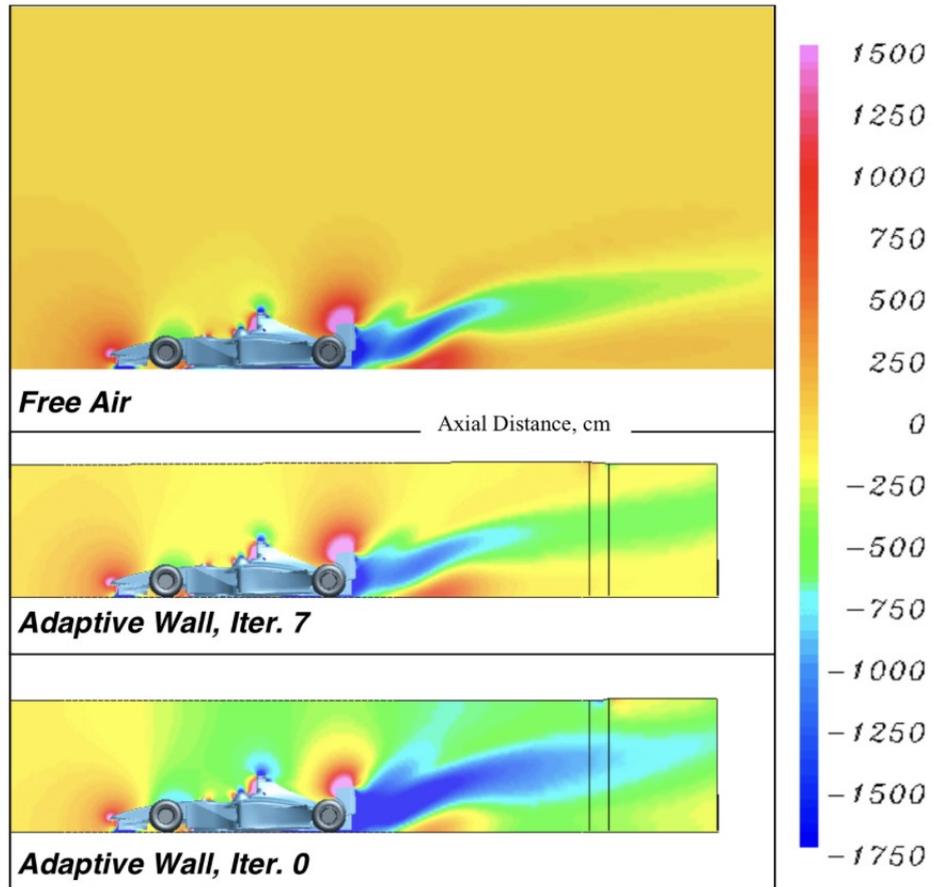


Figura 4.14: Grafici sulla pressione statica relativa attorno al modello nel caso di test su strada(a) e di simulazione in galleria con pareti regolabili senza iterazioni(c) e alla settima iterazione(b) (21)

Capitolo 5

Conclusioni

Con il supporto delle simulazioni fatte con l'ausilio della CFD è stata analizzata e valutata l'efficacia dei metodi di correzione del bloccaggio, dopo essere stati presentati, usando due diversi modelli: l'Ahmed body, dove è stata fatta variare la lunghezza, e il modello Windsor dove i parametri che variavano erano il "back angle" e l'angolo di yaw.

Alla luce dei risultati esposti nei capitoli precedenti si può evincere che:

1. Usando il modello di Ahmed Body con lunghezza variabile il metodo di Maskell è quello con cui si ottengono i risultati peggiori nelle simulazioni effettuate, questo era prevedibile dato che è stato ideato per essere applicato a casi con flussi separati. I metodi di Mercker e Maskell III, sviluppati appositamente per veicoli terrestri, danno risultati migliori mentre analizzando DNW Maskell si vede che nonostante tenga conto della lunghezza del veicolo non riesce a dare una buona approssimazione del C_d considerando degli effetti di interferenza. La correzione che ha ottenuto risultati migliori è stata quella di Thom and Herriot per la lunghezza standard del modello mentre la formula modificata di Thom and Herriot quando la lunghezza è stata aumentata, questo ultimo risultato potrebbe trovare spiegazione nel fatto che la formula tiene sempre conto del termine volumetrico ma trascura quello che considera l'ispessimento di scia che non influisce sulle resistenza ed evidentemente crea problemi nella formula non modificata.
2. Prendendo come riferimento il modello Windsor, quando questo possiede spigoli vivi si vede chiaramente dalle simulazioni che con angoli di yaw nulli la correzione di Thom and Herriot fornisce la migliore approssimazione mentre per angoli di yaw di 5° la migliore approssimazione è fornita da Mercker per il modello Windsor_squareback,

dato che presenta un termine che tiene conto della distorsione di scia, mentre per il modello Windsor 25 Thom and Herriot permette di avere un migliore risultato. Maskell III performa bene nel caso di angolo di yaw di 10° dato che tiene conto della distorsione di scia che risulta essere marcata nei modelli con spigoli vivi e aventi un certo angolo di yaw. E' quindi da tenere in considerazione come eventuale metodo di correzione quello di Maskell III nel caso si vogliano effettuare simulazioni dove sono presenti componenti del flusso laterali.

3. Considerando il modello Windsor con raccordo "A-pillar" si vede che la correzione di Thom and Herriot è la migliore nel caso di angolo di yaw nullo, per i motivi sopra elencati, mentre nel caso di angolo di yaw di 10° dà comunque risultati soddisfacenti ma si deve considerare anche i risultati Maskell III nonostante quella che performa meglio è la correzione di Mercker, dove risulta essere vincente la correzione sul bloccaggio solido dato che il bloccaggio di scia è stato ripreso dai modelli di Thom e Maskell.
4. Nel caso di modello Windsor con raccordo "C-pillars" DNW Maskell e Maskell III danno risultati soddisfacenti per traiettorie rettilinee mentre se viene introdotto un angolo di yaw e di 10° e si nota come ancora una volta Maskell III risulti la correzione migliore da utilizzare oltre a quella di Thom and Herriot.

Inoltre successivamente sono stati analizzati metodi alternativi per la correzione del bloccaggio e si può concludere che:

1. Anche le gallerie del vento a pareti aperte presentano effetti di interferenza non trascurabili. Gli errori che si ottengono sono tuttavia minori, a parità di blockage ratio, rispetto a quelli forniti dalle gallerie del vento a pareti chiuse.
2. Il problema principale delle gallerie del vento riguarda il gradiente di pressione statica che si crea nel collettore che può potenzialmente influenzare in modo significativo la pressione nella regione di base della scia del modello, se quest'ultimo è posizionato troppo vicino ad esso. Occorre quindi valutare in modo accurato per ogni modello considerato la minima lunghezza della sezione di test richiesta, che dipende dalle caratteristiche geometriche del modello e dalla scia che esso genera, affinché gli effetti avversi del collettore siano limitati al massimo. Il problema delle gallerie del vento a pareti aperte riguarda quindi la progettazione dei componenti che la costituiscono come ad esempio

il convergente oltre che al collettore, che genera misurazioni anomale della pressione dinamica se il modello è troppo vicino. La soluzione ideale sarebbe quindi di avere una sezione di test più lunga ma questo implicherebbe una galleria del vento troppo grande dato che bisogna rispettare il vincolo di progettazione $\frac{L_{TS}}{d_N} = 3$ e inoltre per avere una sezione di test indipendente dagli effetti di interferenza il rapporto tra la superficie del collettore e quella del convergente deve tendere a 2. A causa della scarsità di dati sperimentali è preferibile quindi optare per soluzioni più contenute dal punto di vista economico e di ingombro per effettuare test su autovetture ad alte prestazioni.

3. Un metodo ampiamente utilizzato per limitare il bloccaggio in galleria del vento è l'impiego di pareti fessurate. In questo modo si ottengono risultati dove i due effetti negativi delle pareti aperte e chiuse si compensano, infatti si nota che tali gallerie, che funzionano in modo ottimale a velocità subsoniche, forniscono una distribuzione di pressione attorno al modello in maniera accurata. Inoltre tali strutture presentano un flap che può modificare il suo grado di apertura per il rientro del flusso in galleria del vento in modo da imitare in maniera ottimale le condizioni al contorno all'infinito a valle che si hanno nei test su strada.
4. Una seconda possibilità più costosa e complessa è l'utilizzo delle pareti regolabili. Il principio su cui si basano dimostra che se le linee di flusso sulle pareti avessero la stessa direzione che avrebbero a livello delle pareti stesse nel caso in cui il modello investito dal flusso fosse in un dominio infinito, allora i risultati non sarebbero affetti da interferenza. Per ottenere l'inclinazione ottimale delle pareti si utilizza un processo iterativo basato sull'accoppiamento di un flusso interno alla galleria e uno esterno immaginario(descrivibile tramite l'equazione di Laplace). Si nota dai risultati come all'aumentare del numero iterazioni la distribuzione di pressione attorno al modello imiti in maniera più fedele quella ottenuta nei test su strada e i coefficienti aerodinamici convergono verso i valori reali(raggiunti dopo poche iterazioni).

Capitolo 6

Suggerimenti per lavori futuri

Proponiamo di seguito i seguenti consigli da sviluppare in un ipotetico studio futuro:

- Valutare tramite simulazioni CFD l'efficacia dei metodi usando differenti modelli più elaborati introducendo dettagli come gli specchietti laterali oppure la presenza delle ruote per vedere se le osservazioni fatte sui vari metodi sono ancora valide.
- Dal punto di vista aerodinamico, invece, sono stati simulati casi con linee di flusso con o senza angolo di yaw, ma sempre ad un'altezza dal suolo costante. Si potrebbe quindi implementare una simulazione con le stesse condizioni al contorno ma ad altezze differenti per comprendere se tale aspetto può avere effetti sulla struttura di scia e quindi sui risultati finali.
- Nella tesi è stato presentato come le correzioni di Mercker e Maskell III fossero le più efficaci in presenza di un angolo di yaw fino a 30° e sarebbe quindi interessante studiare cosa accade per angoli maggiori.
- I confronti tra le varie correzioni e i risultati ottenuti tramite CFD sono stati fatti mediante l'utilizzo di un errore assoluto e riteniamo sia utile in futuro l'utilizzo di un errore percentuale per quantificare correttamente le differenze tra i vari metodi.

Bibliografia

- [1] M. Castriotta, *Numerical assessment of wind tunnel blockage effects for bluff bodies*. 2020/2021.
- [2] S. Gupta, *Numerical study of the effects of wind-tunnel conditions on a passenger vehicle in crosswinds*. 15 ottobre 2020.
- [3] D. Sahini, *Wind Tunnel Blockage Corrections : A Computational Study*. August, 2004.
- [4] E. Maskell, *A theory of the blockage effects on bluff bodies and stalled wings in a closed wind tunnel*. Aeronautical Research Council London (united Kingdom), 1963.
- [5] W. Willemsen, *Wind tunnel tests on three full scale tractors with semi-trailer for scania cv ab*. DNW (project number 2410.1313). 2005.
- [6] J. Hackett and K. Cooper, *Extensions to Maskell's theory for blockage effects on bluff bodies in a closed wind tunnel*. *The Aeronautical Journal*, 05(1050):409-418, 2001.
- [7] K. Cooper, *Closed-test-section wind tunnel blockage corrections for road vehicles*. SAE SP-1176, Warrendale, 1996.
- [8] E. Mercker, *A blockage correction for automotive testing in a wind tunnel with closed test section*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 22(2-3):149-167, 1986.
- [9] K. Cooper, *Bluff-body blockage corrections in closed- and open-test section wind tunnels*. 2020.
- [10] T. Owen, *Measured blockage effects on bluff bodies in closed and open wind tunnels*. Technical Report 78151, 1978.
- [11] R. Gould, *Wake blockage correction in a closed wind tunnel for one or two wall mounted models subject to separated flow*. Aeronautical Research Council RM, 1970.

- [12] J. W. E. Mercker, *On the Correction of Interference Effects in Open Jet Wind Tunnels*. 1996.
- [13] C. Collin, *Interference effects in automotive, open jet wind tunnels*. 2019.
- [14] G. W. E. Mercker and J. Wiedemann, *Views on Nozzle Interference Effects in Open Jet*. 1997.
- [15] F. von Schulz-Hausmann and J. Vagt, *Influence of Test-Section Length and Collector Area on Measurements in $\frac{3}{4}$ -Open-Jet Automotive Wind Tunnels*. 1988.
- [16] G. W. E. Mercker and J. Wiedemann, *Audi Aero-Acoustic Wind Tunnel*. 1993.
- [17] J. Lacey, *A Study of the Pulsations in a $\frac{3}{4}$ Open Jet Wind Tunnel*. 2002.
- [18] B. T. Arnette, S. and M. Zabat, *On Low-Frequency Pressure Pulsations and Static Pressure Distribution in Open Jet Automotive Wind Tunnels*. 1999.
- [19] C. K. F. A. W. S. e. a. Garry, K., *The Effect on Aerodynamic Drag of the Longitudinal Position of a Road Vehicle Model in a Wind Tunnel Test Section*. 1994.
- [20] R. Flay, G. Elfstrom, and P. Clark, *Slotted-wall test section for automotive aerodynamic test in yaw*. 1983.
- [21] G. Flynt, W. Martinelli, and E. Duell, *Application of adaptive wall wind tunnels for automotive and aerospace testing*. 2020.

Ringraziamenti

In conclusione a questa tesi mi sento di ringraziare tutti coloro che hanno contribuito alla realizzazione di questo elaborato e che mi sono stati vicini supportandomi in questi fantastici anni di università. Un ringraziamento speciale al mio relatore Alessandro Talamelli per la sua disponibilità, la sua immensa pazienza, per avermi guidato in questo percorso fornendomi i consigli e le conoscenze necessarie per la stesura di questo elaborato e per avermi fatto maturare a livello professionale. Un immenso grazie a mia madre Francesca, mio padre Mario e mia sorella Maria Giulia e, in generale, a tutta la mia numerosa famiglia per aver sempre creduto in me e per avermi supportato durante questo mio percorso, standomi vicino nei momenti di difficoltà. Questo traguardo che ho raggiunto lo dedico anche a voi che siete la mia forza e il pilastro che mi ha sostenuto e mi sosterrà per tutta la vita. Un grandissimo ringraziamento va al mio collega e amico Mattia Gulmanelli, con il quale non solo ho collaborato per la realizzazione di questa tesi ma con il quale ho affrontato fianco a fianco tutti e 3 gli anni di università, tra gioie post-esame, lezioni passate a fare tutto tranne che ascoltare e pomeriggi interi al telefono per studiare. Grazie a tutti i miei amici che mi sono stati vicini in questi anni, da quelli che porto nel cuore fin dall'infanzia a quelli che ho conosciuto durante il mio cammino e che, sorprendentemente, hanno deciso di accompagnarmi fino a questo punto, di loro spontanea volontà aggiungerei dato che a volte non è facile essere amici di un aspirante ingegnere, nonostante i numerosi benefici. In modo particolare un immenso grazie va al mio amico e collega Niccolò che negli ultimi mesi cruciali prima della laurea è stata una delle persone che più mi ha spronato e che non mi ha mai abbandonato, francamente non so da dove abbia tirato fuori tutta quella pazienza. Grazie amici miei. *Dulcis in fundo* vorrei dedicare questo traguardo a me stesso, ai miei sacrifici, alla mia tenacia e alla mia instancabile voglia di mettermi in gioco e migliorarmi. Il mio percorso è ancora lungo e non so dove mi porterà né quale sarà la mia destinazione ma finché avrò tutte queste persone stupende al mio fianco so che sarà un viaggio fantastico che varrà la pena di intraprendere.