

POLITECNICO DI MILANO

**Facoltà Di Ingegneria Industriale
Sede di Piacenza**



**Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Meccanica
Orientamento Trasporti**



**Analisi della forza di resistenza aerodinamica dei
veicoli in platoon.**

***Relatore:* Prof. Ing. Francesco Braghin**

***Co-relatore:* Ing. Paolo Schito**

**Tesi di Laurea di
Luca Cignatta
Matr. n° 736359**

Anno Accademico 2009 / 2010

Indice generale

1	Introduzione	1
1.1	Vantaggi del Platooning	2
1.2	Stato dell'Arte della CFD nelle ricerche aerodinamiche	3
1.2.1	Introduzione	3
1.2.2	Studi precedenti per lo studio dell'aerodinamica dell'Ahmed Body tramite la CFD	5
1.3	Il platoon: spostamento delle auto in convogli	8
1.4	Un'applicazione: sistemi di trasporto intelligenti (FGITS)	14
2	L'aerodinamica dell'Automobile	15
2.1	Panoramica	15
2.2	La resistenza aerodinamica	16
2.3	Surface friction drag	17
2.3.1	Pressure drag	18
2.3.2	Vortex-Induced drag	19
2.4	Configurazione assunta dal flusso intorno all'automobile	20
2.4.1	Flusso mediato nel tempo	20
2.4.2	Flussi non stazionari	28
3	Analisi Fluidodinamica Computazionale (CFD)	29
3.1	Introduzione	29
3.2	Scelta della griglia	30
3.2.1	Size Function	30
3.2.2	Specifiche della size functio	32
3.3	Generazione delle griglie con Gambit	32
3.3.1	Modello 2D	33
3.3.2	Modello 3D	37
3.3.3	Veicoli 3D	41
3.4	La fluidodinamica computazionale	43
3.4.1	Equazioni di base	43
3.4.2	Modello di turbolenza	43
3.5	Condizioni al contorno	50
3.5.1	Velocity Inlet	50
3.5.2	Pressure Outlet	50
3.5.3	Simmetry	51
3.5.4	Wall	51
3.5.5	Material	51
4	Risultati CFD e Discussione	52
4.1	Flusso e forze di drag sull'Ahmed Body	52
4.1.1	Modello a due dimensioni	53

4.1.2	Analisi tridimensionale	62
4.2	Dettagli delle forze di resistenza aerodinamica dei veicoli.....	73
4.2.1	Modello veicolo isolato.....	73
4.2.2	Da due a sei furgoncini in tandem	74
4.2.3	Tre veicoli in tandem	82
4.2.4	Sei veicoli in tandem.....	92
5	Conclusioni	99
6	Nomenclatura.....	101
7	Bibliografia	103

Sommario

Un modo per aumentare l'efficienza del trasporto stradale è quello di ridurre il coefficiente di resistenza aerodinamica dei veicoli. Fino ad ora gli studi per ridurre tale coefficiente si sono concentrati soprattutto sul singolo veicolo, ma un'altra possibilità è quella di sfruttare il cosiddetto effetto scia (wake effect), che si genera quando i veicoli viaggiano a bassa distanza longitudinale l'uno dall'altro. Infatti la riduzione delle distanze inter-veicolari comporta generalmente la diminuzione del coefficiente di resistenza aerodinamica dei veicoli.

L'applicazione ai veicoli stradali degli Intelligent Transportation System (ITS) può consentire la riduzione delle distanze inter-veicolari, come nel caso del platooning, che consiste nel formare convogli (platoon) di veicoli a guida automatica. Questo rende lo studio delle interazioni aerodinamiche fra i veicoli sempre più importante.

In questa ricerca è stata utilizzata l'analisi fluidodinamica computazionale (CFD) per comprendere l'aerodinamica dei veicoli in platoon e l'influenza della distanza inter-veicolare sul coefficiente di resistenza aerodinamica. Inizialmente i veicoli sono stati modellati come Ahmed Body per poi passare a riproduzioni semplificate di diverse tipologie di veicoli, per studiare così l'influenza della geometria dei veicoli, oltre a quella della distanza inter-veicolare, sull'aerodinamica all'interno di un platoon.

Parole chiave:

Platooning, distanziamento interveicolare, coefficiente di resistenza aerodinamica, CFD, .

Abstract

A way to increase road transport efficiency is to reduce the aerodynamic drag coefficient of vehicles. Studies regarding the reduction of this coefficient have so far focused on the single vehicle, but another opportunity is to exploit the so-called wake effect, that generates when vehicles travel with a low longitudinal spacing among each other. In fact, inter-vehicular spacings reduction generally implies the decrease of the aerodynamic drag coefficient of vehicles.

Intelligent Transportation Systems (ITSs) application to road vehicles can allow the reduction of inter-vehicular spacings, as in the case of platooning, which deals with making convoys (platoons) of automatically driven vehicles. This makes the study of aerodynamic interactions among vehicles more and more important.

In this paper Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis has been used to understand the aerodynamics of vehicles into a platoon and the influence of inter-vehicular spacing on the aerodynamic drag coefficient. Vehicles have been initially modelled as Ahmed Body, then simplified reproductions of different vehicle types have been employed, so the influence of vehicles geometry on aerodynamics into a platoon has been studied, besides the effect of inter-vehicular spacing.

Keywords:

Platooning, intervehicular spacing, aerodynamic drag coefficient, CFD..

1 Introduzione

Il comportamento aerodinamico delle automobili di serie ha rappresentato per molti decenni un importante settore di ricerca e lo rappresenta tuttora; vi è infatti ancora molto da apprendere su tale argomento e, in particolare, sono necessari approfondimenti sull'interazione aerodinamica fra più veicoli.

Il continuo aumento della popolazione pone il problema di avere a disposizione infrastrutture e sistemi di trasporto sempre più efficienti. In passato, tale esigenza è stata affrontata tramite la costruzione di nuove infrastrutture, ma tale approccio non può essere applicato all'infinito. Un metodo alternativo preso in considerazione dal California PATH (California Partners for Advanced Transit and Highways) è l'AHS (Automated Highway System) (Hall, 1997 [1]). In tale sistema i veicoli in viaggio si dispongono in file assumendo l'aspetto di un convoglio (*platoon*) in modo da sfruttare i vantaggi aerodinamici dovuti alla loro vicinanza. A tale scopo i veicoli sono equipaggiati con dispositivi intelligenti di trasporto (ITS - Intelligent Transport System) quali sensori di distanza, ABS (Adaptive Braking System), GPS (Global Positioning System), ecc., in grado di permettere il moto dei veicoli a distanza limitata (al di sotto della lunghezza di un'auto) in modo sicuro. Prima di poter implementare i sistemi ITS sulle auto è però necessario capire il loro comportamento aerodinamico quando viaggiano in prossimità. Da tale punto di vista, il PATH ha condotto significative ricerche sui fenomeni aerodinamici che intervengono fra veicoli in moto ravvicinato.

Lo scopo di questo studio è quello di comprendere le caratteristiche aerodinamiche del flusso di aria creato dall'interazione, di un convoglio di automobili con l'ambiente circostante. A tale fine verrà usato un approccio numerico CFD (Computational Fluid Dynamics) a volumi finti.

1.1 Vantaggi del Platooning

L'implementazione del platooning, grazie alle ridotte distanze interveicolari, comporta potenzialmente due vantaggi principali. L'aumento della capacità stradale e la riduzione della resistenza all'avanzamento dei veicoli dal punto di vista aerodinamico.

Il primo vantaggio può essere facilmente esplicito assumendo particolari semplificazioni. Si supponga che il sistema sia costituito da una colonna di veicoli viaggiante lungo una corsia stradale rettilinea, e che tutti i veicoli che la compongono viaggino alla medesima velocità costante. Si deduce che la riduzione del distanziamento interveicolare comporti un aumento del massimo flusso veicolare attraversante una sezione della corsia stradale considerata. Tale flusso massimo è definito capacità stradale, ed il suo aumento consente di diradare il verificarsi di fenomeni di congestione (almeno nel breve periodo, a parità di domanda di mobilità).

Grazie al platooning è perciò possibile ottenere un aumento della capacità stradale senza intervenire sulle infrastrutture, il che richiederebbe forti investimenti ed andrebbe a occupare suolo spesso non disponibile nelle aree metropolitane e limitrofi.

Il secondo vantaggio prospettato dall'impiego del platooning consiste nella riduzione della forza di resistenza aerodinamica ($F_D = \frac{1}{2} \rho C_D V^2 A$) che si oppone all'avanzamento longitudinale dei veicoli.

1.2 Stato dell'Arte della CFD nelle ricerche aerodinamiche

1.2.1 Introduzione

I test tradizionalmente utilizzati in ambito industriale per valutare le prestazioni aerodinamiche delle auto vengono realizzati:

- in galleria del vento;
- su strada.

Le gallerie del vento, presentano alcuni vantaggi: permettono di effettuare delle misure di forza e pressione sui modelli in scala imponendo delle condizioni al contorno e permettono analisi metodiche. D'altra parte sono strutture costose con elevati costi di esercizio e le prove, necessitano di un'attenta progettazione di tutti i dettagli oltre alla realizzazione accurata dei modelli in scala. Inoltre, anche se grandi a sufficienza per testare i veicoli in scala 1:1, non riescono a riprodurre le condizioni reali di flusso a causa della dimensione finita della galleria, alla complessità degli eventuali sistemi di movimentazione del suolo, alla complessità di effettuare prove in condizioni di vento laterale, ecc. Tali problemi possono essere parzialmente risolti utilizzando modelli in scala ridotta che però non possiedono tutte le caratteristiche del veicolo reale.

I test su strada sono caratterizzati da condizioni di prova reali ma risentono degli effetti di disturbo dovuti alla variabilità delle condizioni ambientali (intensità e direzione del vento, ad esempio) che spesso rendono tali test difficilmente ripetibili.

Per soddisfare le richieste dei clienti riducendo i costi ed il tempo necessario per lo sviluppo della macchina, i produttori di automobili hanno dovuto sviluppare veicoli economici, sicuri e confortevoli ad un ritmo sempre più elevato. Per tali motivi i grandi costruttori hanno iniziato a fare uso della CFD (Fluidodinamica computazionale) per poter simulare l'interazione del veicolo con l'aria circostante. I test in galleria del vento sono comunque necessari per la validazione dei risultati.

La simulazione CFD presenta numerosi vantaggi:

- permette di effettuare uno studio parametrico su eventuali modifiche geometriche di un veicolo in modo più economico ed in tempi minori rispetto alle prove in galleria del vento o alle prove su strada;
- permette analizzare con maggiore dettaglio il modo in cui i cambiamenti di forma influenzeranno le caratteristiche del flusso generato da uno o più veicoli;
- permette di realizzare simulazioni altrimenti impossibili in galleria del vento (come ad esempio il vento trasversale).

Ma anche alcuni svantaggi:

- è complicata da svolgere poiché richiede elevata professionalità per ottenere buoni risultati
- I modelli realizzati devono essere validati con prove sperimentali.

È per tali motivi che gli studi attuali sugli effetti aerodinamici del platooning vengono eseguiti tramite software CFD.

1.2.2 Studi precedenti per lo studio dell'aerodinamica dell'Ahmed Body tramite la CFD

Gillieron e Chometon (1999) [2] utilizzarono un modello numerico per validare i risultati sperimentali ottenuti in galleria del vento su due modelli di Ahmed con angoli posteriori di 25° e 35° . I calcoli vennero eseguiti utilizzando il modello $k-\varepsilon$ standard.

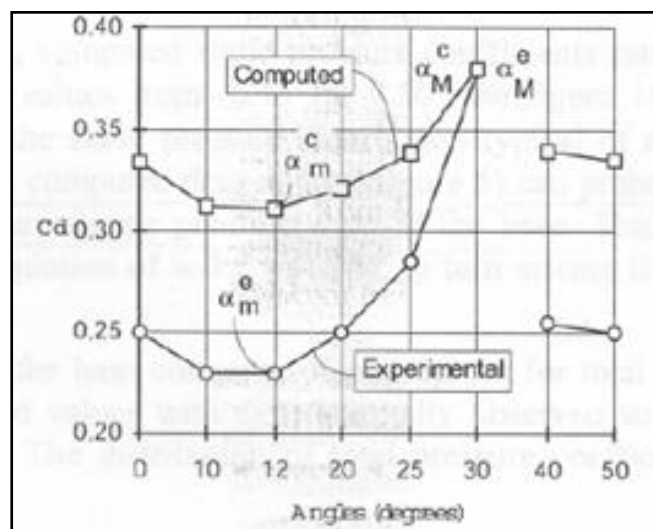


Figura 1.1 Valori numerici e sperimentali del coefficiente di drag al variare dell'inclinazione posteriore dell'Ahmed Body, Gillieron and Chometon (1999).

La simulazione numerica fornì risultati ampiamente in accordo con quelli ottenuti in galleria del vento. In particolare vennero riprodotti in modo corretto i vortici e l'andamento dei coefficienti di drag. La sovrastima dei coefficienti di drag (vedi Figura 1.2) venne attribuita alla tendenza del codice a calcolare una caduta di pressione più elevata in corrispondenza della parete verticale della zona posteriore dell'auto. I risultati misero in luce come la simulazione numerica CFD costituisse una tecnica promettente per lo studio dell'aerodinamica dei veicoli.

Siniša Krajnović e Lars Davidson (2004) [3] eseguirono una LES (Large Eddy Simulation) per determinare il flusso generato da un modello di Ahmed con angolo posteriore di 25° per Reynolds pari a $2 \cdot 10^5$. I risultati ottenuti, per la parte posteriore del modello, erano molto simili a quelli restituiti dalle simulazioni ad elevato numero di Reynolds ($Re = 7,68 \cdot 10^5$). Ciò permise di dedurre che per elevati numeri di Reynolds il modello di Ahmed diventava insensibile al numero di Reynolds. Inoltre si constatò come fosse la geometria, piuttosto che la viscosità a determinare le caratteristiche del flusso e le zone di distacco. Anche C. Hinterberger (2004) [4] eseguì una LES sul modello di

Ahmed con angolo posteriore di 25° , concludendo che i risultati ottenuti erano molto promettenti, in quanto mettevano in luce come la struttura del flusso calcolata fosse molto vicina a quella sperimentale.

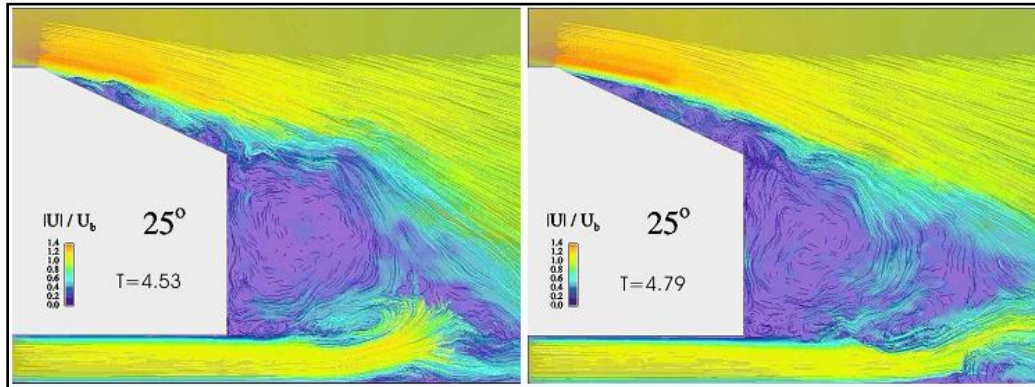


Figura 1.2 Campi di velocità istantanea nel piano di mezzeria della scia posteriore, C. Hinterberge et.al. (2004)

R.K. Strachan (2004)[5] prese in considerazione il piano di mezzeria della scia posteriore generata da un modello di Ahmed (Figura 1.29, e confrontò i dati misurati in galleria del vento da un anemometro Laser Doppler (LDA) con quelli calcolati con una simulazione con un modello $k-\varepsilon$ RNG per la schematizzazione della turbolenza. La simulazione predisse i vortici controrotanti in modo soddisfacente nonostante ci fosse una discrepanza riguardo la loro posizione, che venne attribuita ad un errore di allineamento del modello durante i test in galleria del vento. I risultati forniti dalla simulazione CFD furono comparati anche con:

- i risultati ottenuti da un precedente studio che impiegava una *DES* (*Detached Eddy Simulation*) per simulare con migliore accuratezza il flusso turbolento nella zona iniziale della scia. La correlazione tra i due modelli risultò essere buona;
- le forze misurate in galleria del vento, determinando uno scostamento del 3%; dalle forze calcolate dai dati misurati sperimentalmente

Francis T. Makowski e Sung-Eun Kim (2000) [6] condussero simulazioni CFD sul flusso generato da un modello di Ahmed con angolo posteriore di 30° (Figura 1.3) risolvendo le equazioni di “Reynolds averaged Navier Stokes”. La simulazione venne eseguita con due differenti modelli di turbolenza: il modello $k-\varepsilon$ standard e il modello *RSM* (*Reynolds Stress Model*).

Venne concluso che il modello $k-\varepsilon$ standard sovrastimava la viscosità nella regione dove la turbolenza era anisotropa mentre l’RSM era in grado di riprodurre correttamente tutte le caratteristiche salienti del flusso osservate negli esperimenti.

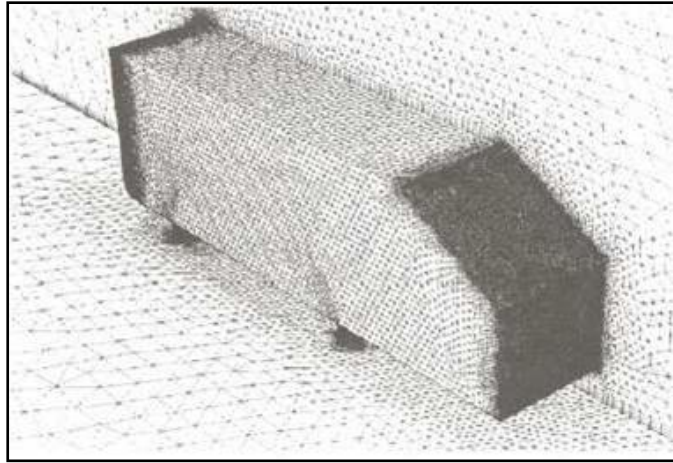


Figura 1.3 Mesh di superficie generate per un Ahmed Body con angolo posteriore pari a 30°, Francis T. Makowski e Sung-Eun Kim

Kapadia e Roy (2003) [7] simularono la scia generata da un modello di Ahmed con angolo posteriore di 25° usando una DES per modellizzare la turbolenza. I risultati ottenuti vennero confrontati con quelli calcolati tramite equazioni RANS con lo stesso passo temporale.

Il confronto mostrò la capacità della DES di mettere in evidenza strutture instabili del flusso in modo migliore rispetto alle equazioni RANS. Per entrambe le simulazioni vennero determinati i coefficienti di drag in modo da poterli comparare con quelli noti dalla bibliografia. Il confronto mise in evidenza similitudini:

- fra i risultati forniti dalla DES e quelli di Ahmed (1984) [8];
- fra i risultati calcolati tramite le equazioni RANS e quelli di Gillieron e Chometon (1999) [2].
-

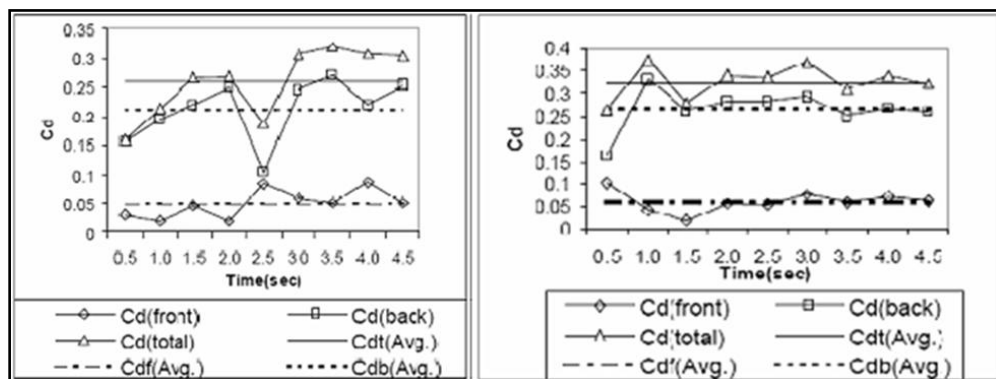


Figura 1.4 Anlisi temporale del C_D (Des a sinistra) e analisi temporale del C_D (Rans a destra) del C_D , Sagar Kapadia et.al. 2003

1.3 Il platoon: spostamento delle auto in convogli

Le prestazioni e la sicurezza dei veicoli stradali sono determinati anche dalle loro caratteristiche aerodinamiche, infatti, determinano le forze ed i momenti agenti sul veicolo influenzandone le caratteristiche. Quando più veicoli sono in scia le interazioni aerodinamiche tra i vari veicoli modificano il flusso intorno ai veicoli stessi, causando una variazione delle forze e dei momenti agenti sui veicoli stessi. Gli effetti della distanza fra più veicoli in fila sono stati analizzati da A. F. Abdel Azim (1994)[9] che osservò drastiche variazioni delle forze aerodinamiche quando un veicolo procedeva in prossimità di altri.

Il traffico intenso porta alla formazione di gruppi di veicoli tra cui si possono verificare interazioni di flusso particolarmente favorevoli per la diminuzione del drag. Infatti le zone di bassa pressione presenti nella scia generata dal primo veicolo influenzano il drag di quello che segue anche quando la distanza è relativamente grande (Bernard R, 1996; A. F. Abdel Azim, 1994; Vito e Watkins, 2004, California PATH). Gotz (1983)[9], studiò, in galleria del vento, l'effetto dell'interazione aerodinamica fra modelli di veicoli commerciali, trovando che alla velocità di 80 km/h ed una distanza di 40m, si otteneva una riduzione della forza di drag del 20% per il secondo modello e del 30% dal terzo modello del gruppo in poi.

Esperimenti sull'interazione fra flussi reali di due auto sono stati realizzati da Abdel Azim e Abdel Gawad (2000) [10]. Essi analizzarono il flusso dei modelli singoli, dei modelli in fila, delle auto affiancate ed in fase di sorpasso fra loro. Per le prove vennero utilizzati modelli in scala 1:60 di Mercedes Benz C 280 per numeri di Reynolds pari a $Re \approx 6000$ e $Re \approx 11000$. Azim e Gawad notarono l'esistenza di tre tipi di flusso dipendenti dalla velocità e dalla distanza tra le auto:

Reynolds 6000, distanza pari alla lunghezza di una auto: il flusso distaccato dal primo modello formava vortici intermittenti andando ad influire negativamente sul quello del secondo causando un aumento della resistenza aerodinamica.

Reynolds 11000, distanza pari alla lunghezza di una auto: il flusso distaccato dal primo modello si riattaccava sul corpo del secondo creando una cavità a bassa pressione (Figura 1.5) con effetti benefici sulla resistenza aerodinamica sia del primo che del secondo modello

Reynolds 6000, distanza pari alla lunghezza di mezza auto: il flusso distaccato dal primo modello si attorcigliava in un vortice stazionario.

Reynolds 11000, distanza fra i veicoli pari alla lunghezza di mezza auto: il vortice veniva sostituito dalla cavità a bassa pressione in modo del tutto analogo al caso per Reynolds pari a 11000 e distanza di una auto.

Introduzione

Distanza pari alla lunghezza di un terzo di auto: si formava il vortice stabile sebbene ciò avvenisse solo per Reynolds pari a 11000.

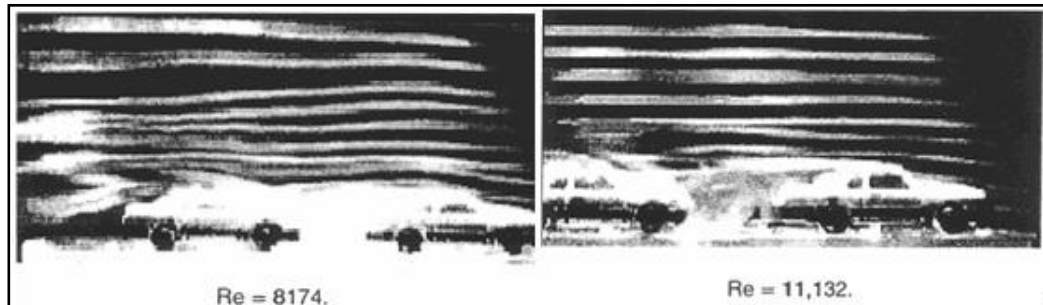


Figura 1.5 Flusso di due convoglio auto con spaziatura longitudinale $x = 1/3L_c$, Abdel Azim e Abdel Gawad (2000)

Azim e Gawad conclusero che per distanze ravvicinate il secondo modello traeva considerevoli vantaggi dalla presenza della cavità a bassa pressione, dato che la sua parte anteriore era interamente contenuta in tale zona.

Zabat (1994) [11] condusse prove sperimentali per determinare l'effetto della distanza sui coefficienti di drag di due modelli di minivan trovando che:

- il coefficiente di drag del veicolo in seconda posizione era più grande di quello in prima posizione; per distanze fra $0 < x/L < 0.35$ (dove x è la distanza tra i due veicoli, L è la lunghezza del modello utilizzato - vedi Figura 1.6),
- il coefficiente di drag del modello che seguiva assumeva valori compresi fra il 69% e il 76% del coefficiente calcolato per il modello preso singolarmente per distanze inferiori a $3L$.

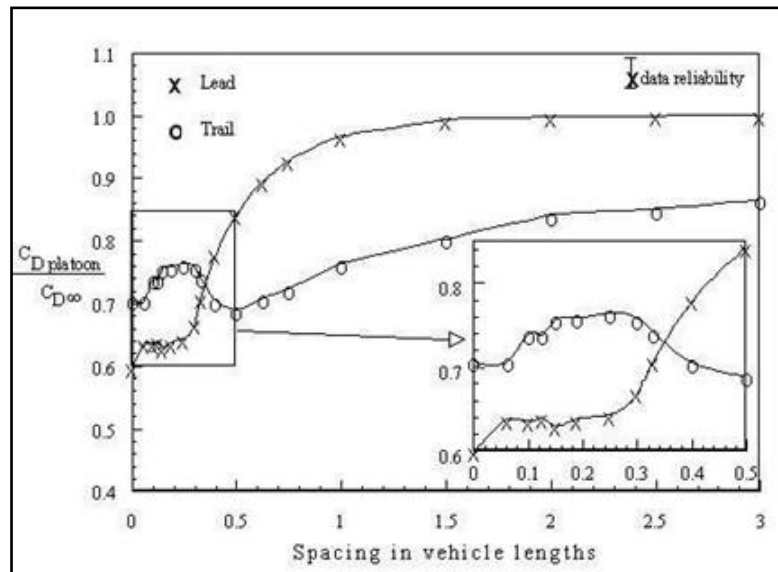


Figura 1.6 Variazione del coefficiente di drag di due minivan al variare della spaziatura longitudinale, Zabat et.al. (1994)

Anche Watkins e Vino (2004) [12] condussero prove sperimentali sull'effetto che la distanza fra i veicoli aveva sui loro coefficienti di drag, ma a differenza di Zabat, preferirono utilizzare due modelli di Ahmed.

I risultati ottenuti mostrarono che quando i modelli erano posti a distanza ravvicinata ($x/L < 1$): vi erano aumenti significativi del drag nel modello posteriore (Figura 1.7).

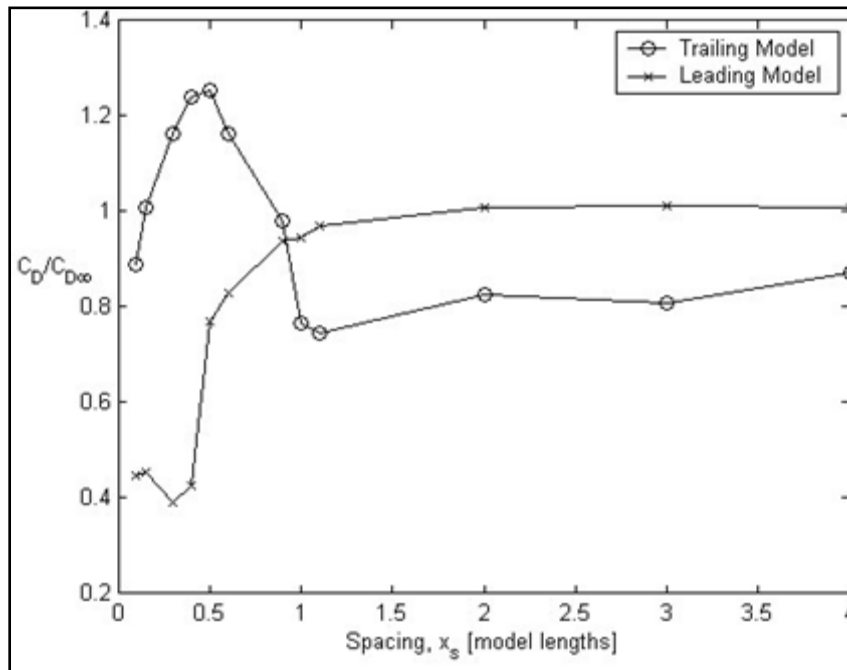


Figura 1.7 Effetti della spaziatura inter-veicolare sui coefficienti di resistenza aerodinamica, Vino (2004)

Watkins e Vino osservarono che l'incremento del coefficiente di drag del modello posteriore era dovuto all'interazione fra i vortici generati dal modello anteriore che andavano ad interferire con quello posteriore e che erano necessari nuovi approfondimenti per capire il loro effetto in modo dettagliato.

Nell'ambito del progetto California PATH [13] è stata indagata l'influenza della distanza inter-veicolare (distanza longitudinale fra i veicoli membri di un platoon) sul coefficiente di resistenza aerodinamica (C_D), effettuando prove in galleria del vento con modelli in scala 1:8 di minivan (GM Lumina APV). I modelli avevano lunghezza pari a 0,619 m.

I risultati sono riportati in Figura 1.8, Figura 1.9 e Figura 1.10, dove le distanze intra-platoon (d) sono misurate in rapporto alla lunghezza dei modelli (L), e coprono il campo delle misure effettuate.

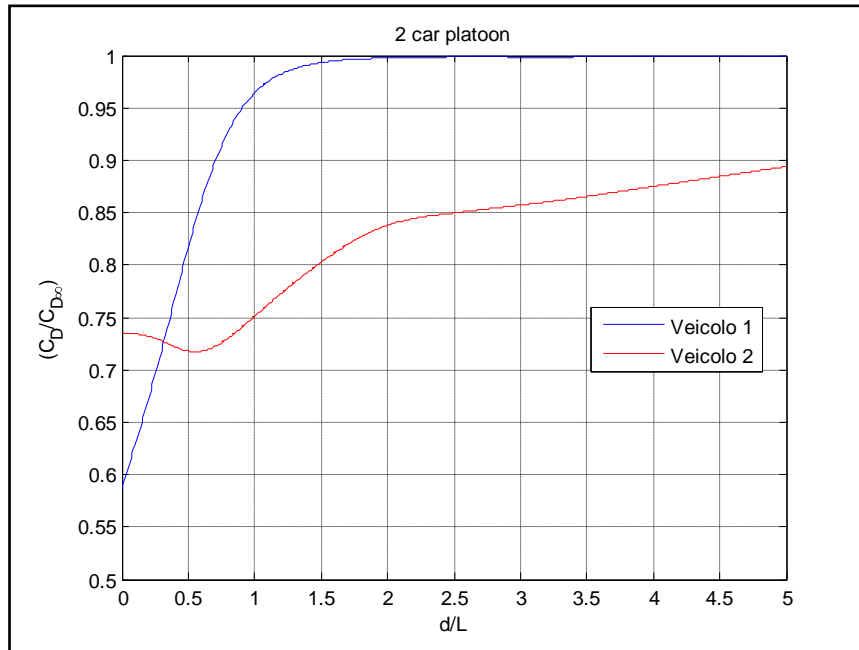


Figura 1.8 coefficiente di resistenza aerodinamica normalizzato al caso di veicolo isolato, in funzione della distanza intra-platoon, per i veicoli di un platoon di 2 elementi.

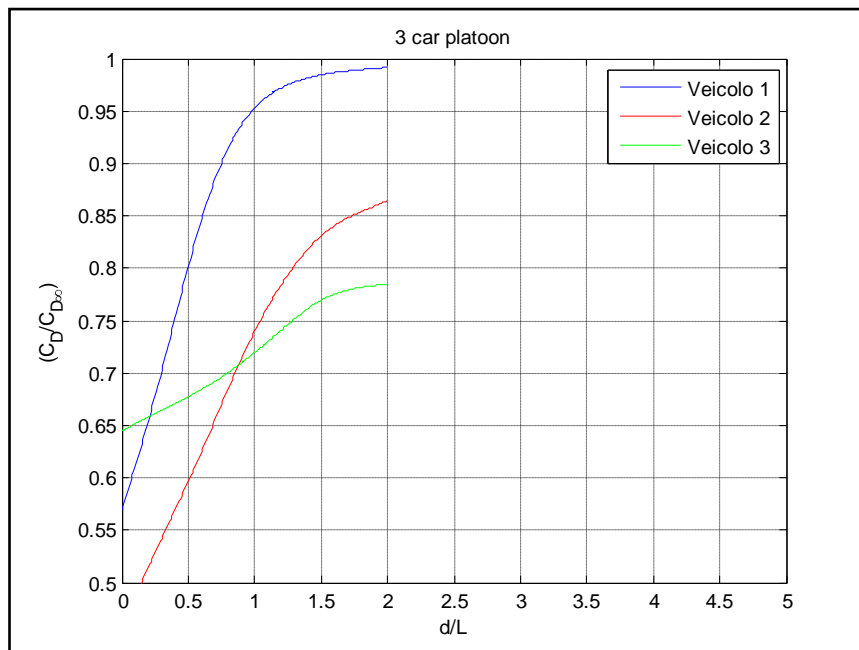


Figura 1.9 coefficiente di resistenza aerodinamica normalizzato al caso di veicolo isolato, in funzione della distanza intra-platoon, per i veicoli di un platoon di 3 elementi.

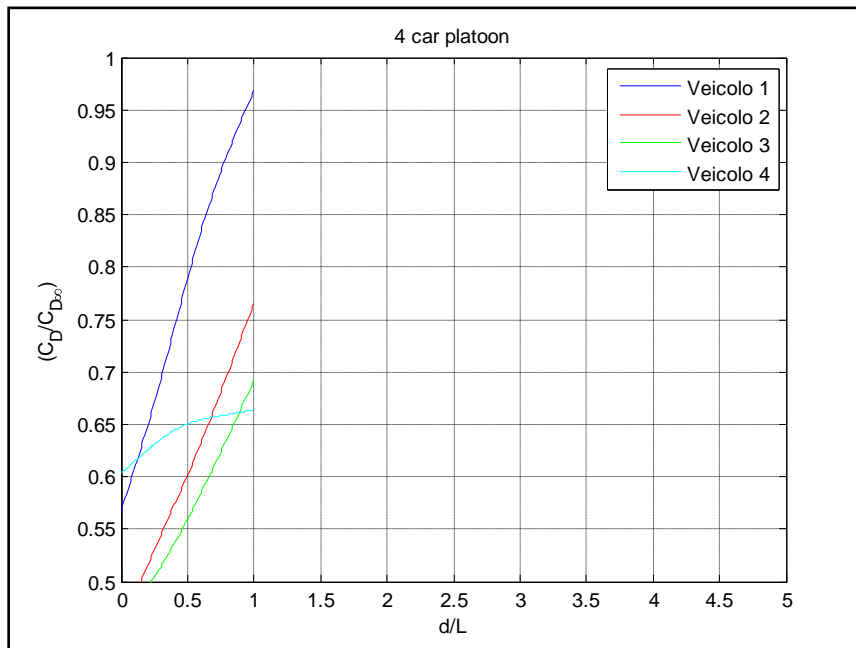


Figura 1.10 coefficiente di resistenza aerodinamica normalizzato al caso di veicolo isolato, in funzione della distanza intra-platoon, per i veicoli di un platoon di 4 elementi

Dal studio del Californian PATH è emerso che:

- Generalmente, ad una minor distanza intra-platoon corrisponde un minor coefficiente di resistenza aerodinamica per ogni veicolo del platoon.
 - In genere, ogni veicolo del platoon sente una riduzione della resistenza aerodinamica. Generalmente l'ultimo veicolo ha un beneficio minore che è più evidente per piccole distanze.
 - È stato stimato per estrapolazione dei dati acquisiti in galleria del vento, che l'effetto di riduzione della resistenza aerodinamica diventa trascurabile per distanze inter-veicolari superiori a $10L$.

1.4 Un'applicazione: sistemi di trasporto intelligenti (FGITS)

La futura generazione di sistemi intelligenti di trasporto (FGITS: Future Generation Intelligent Transport System) conterrà un'ampia gamma di tecnologie per lo scambio continuo di informazioni fra gli stessi veicoli e fra i veicoli e le infrastrutture circostanti. Gli FGITS saranno equipaggiati con sistemi anticollisione, sistemi di assistenza alla guida come l'Adaptive Cruise Control (ACC) e sistemi per la condivisione delle informazioni topografiche quali le condizioni della strada o le condizioni atmosferiche. Per funzionare correttamente gli FGITS dovranno spostarsi su di un sistema di autostrade automatizzato (AHS Automated Highway System - vedi Figura 1.11) e tutto ciò permetterà di evitare le collisioni, diminuire la fatica dei passeggeri, incrementare la capacità delle strade, diminuendo le emissioni e riducendo il consumo di energia



Figura 1.11 FGITS e veicoli in platoon (Courtesy, PATH 1997)

2 L'aerodinamica dell'Automobile

2.1 Panoramica

Per gran parte del ventesimo secolo, le caratteristiche estetiche e le esigenze costruttive hanno limitato l'aerodinamica nell'obiettivo di ridurre i consumi energetici delle automobili. All'inizio degli anni '70 un gruppo di nazioni esportatrici di petrolio, decisero di aumentare significativamente il prezzo del greggio tagliandone la produzione. A causa di ciò l'industria automobilistica iniziò ad occuparsi degli aspetti aerodinamici dei veicoli in modo da migliorarne l'efficienza. Oltre a ridurre i consumi, il miglioramento del comportamento aerodinamico permise di aumentare le prestazioni dinamiche delle automobili.

Le moderne vetture adottano generalmente la configurazione a tre volumi ed hanno il motore disposto in posizione anteriore. Ciò ne influenza notevolmente gli ingombri esterni. A causa di tale forma il flusso che si genera attorno dall'auto in movimento assume caratteristiche particolarmente negative per la resistenza aerodinamica (Barnard, 1998 [14]) distaccandosi e riattaccandosi più volte sulla superficie dell'auto e più precisamente in corrispondenza:

- della parte superiore della griglia del radiatore riattaccandosi sul cofano;
- della parte più bassa del parabrezza riattaccandosi nella parte alta;
- della parte alta del parabrezza riattaccandosi sul tetto;
- della fine del tetto riattaccandosi al termine del lunotto posteriore; in questo caso il riattacco del flusso dipende da diversi fattori quali la lunghezza e l'angolo di inclinazione del lunotto. Se il flusso si riattacca un nuovo distacco avviene al termine del baule.

L'esistenza di molti punti di distacco e riattacco del flusso (Figura 2.1), comporta la nascita di elevati coefficienti di drag. E' ora chiaro perché l'aerodinamica giochi un ruolo così importante nella progettazione delle moderne automobili e perché si debba cercare di ridurre il più possibile gli effetti negativi indotti dalla geometria sul coefficiente di resistenza aerodinamica.

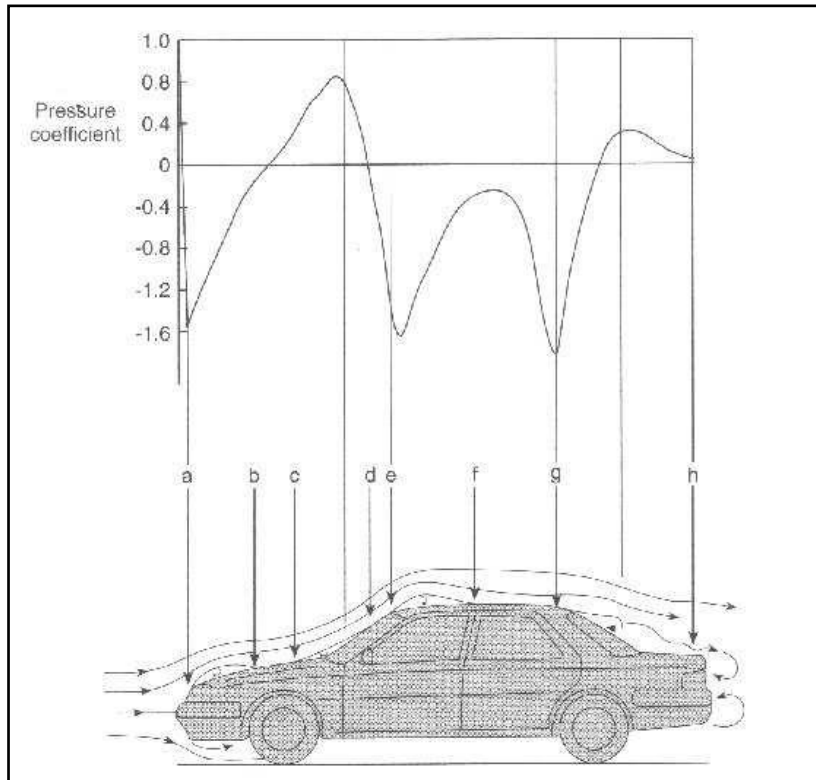


Figura 2.1 Caratteristiche del flusso di un veicolo passeggeri a tre volumi, Barnard (1998)

2.2 La resistenza aerodinamica

Il Drag è il fattore aerodinamico che ha la maggiore influenza su parametri quali il consumo di carburante e la velocità in rettilineo. Da esso dipende la forza in direzione assiale che deve essere vinta da un veicolo in moto all'interno di un fluido. Tale forza, espressa dalla relazione, $F_D = 1/2 \cdot C_D \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A$, (in cui C_D prende il nome di coefficiente di drag e deve essere determinato sperimentalmente) aumenta con il quadrato della velocità. L'influenza del drag sul consumo di carburante è stata evidenziata da Hucho (1998) [15] che ha dimostrato come la resistenza al moto di un'auto di medie dimensioni alla velocità di 100 km/h, sia dovuta per il 75-80% alla forza di resistenza aerodinamica.

La forza di drag è costituita da tre componenti principali:

- surface friction drag;
- pressure drag;
- vortex-induced drag.

2.3 Surface friction drag

La superficie di una automobile in moto all'interno di un fluido a differente velocità è sottoposto all'azione di sforzi tangenziali (τ). Tali sforzi sono generati dal fatto che la velocità del flusso a parete è diverso dalla velocità del flusso indisturbato e prendono il nome di *surface friction drag*. Una descrizione dettagliata del meccanismo fisico alla base del *surface friction drag* è stata effettuata da Schlichting (1960) [16], che nei suoi studi ha preso in considerazione il tetto di un'auto. Dagli esperimenti emerse che la velocità dell'aria era funzione della distanza dalla superficie ed era compresa fra zero (in corrispondenza della superficie) e quella del flusso indisturbato; a tale zona venne assegnato il nome di *strato limite*. Lo strato limite al di sopra del tetto presentava un piccolo spessore e da ciò si dedusse come il gradiente di velocità dovesse essere particolarmente elevato. La presenza di un forte gradiente di velocità porta alla formazione di uno sforzo, la cui componente tangenziale è causa del *surface friction drag*.

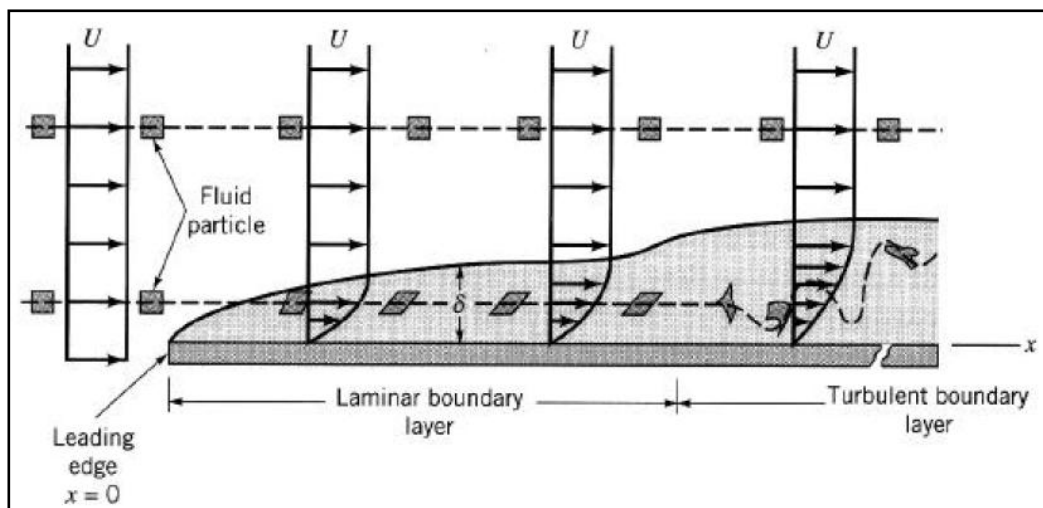


Figura 2.2 Sviluppo dello strato limite e separazione

La Figura 2.2 mette in evidenza come lo strato limite sia caratterizzato da tre regioni:

- regione a flusso laminare;
- regione di transizione;
- regione a flusso turbolento.

Nella regione a flusso laminare lo spessore dello strato limite è di piccole dimensioni e aumenta gradualmente

Si può trovare poi una regione di transizione tra il flusso laminare e quello turbolento in cui i rimescolamenti del flusso di aria incrementano notevolmente lo spessore dello strato limite.

Nella regione di strato limite turbolento gli sforzi di taglio sono maggiori e lo spessore aumenta rapidamente.

2.3.1 Pressure drag

Come visto in precedenza, quando il flusso raggiunge la parte terminale del tetto si separa dalla superficie causando la formazione di una scia. Il principale effetto del distacco è la formazione di una zona a pressione minore di quella presente nella regione frontale dell'auto e ciò genera una forza in verso opposto al moto. Tale forza prende il nome di *pressure drag* (Hucho, 1998) [15] rappresenta la componente maggiore della forza di drag ed è il motivo per cui è così importante ridurre la scia (Hucho, 1998) [14].

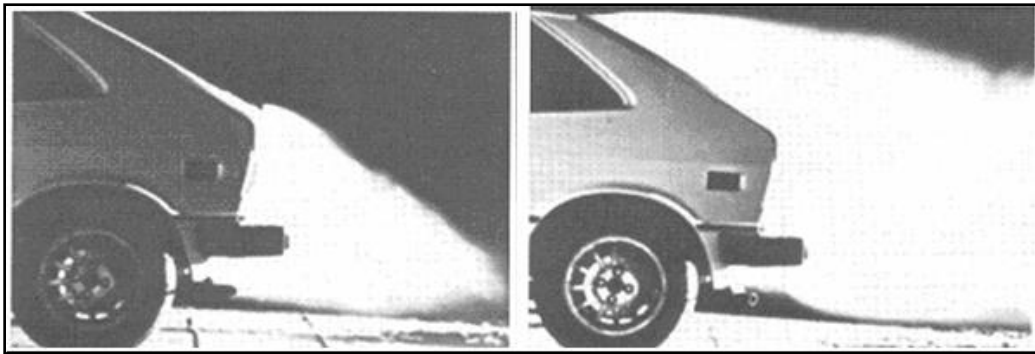


Figura 2.3 Profilo della scia posteriore senza (sinistra) e con deflettore (destra), W.H.Hucho (1998)

La Figura 2.3 mostra le scie tipiche di un'automobile comune, a destra la regione interessata dalla scia è particolarmente ampia e il distacco è indotto da un deflettore posto nella parte finale del tetto. A sinistra il deflettore non è presente e ciò causa la formazione di vortici che generano una caduta di pressione in grado di attirare il flusso verso il lunotto posteriore e di ritardarne il distacco. E' importante sottolineare che una scia di minori dimensioni non comporta sempre una riduzione delle forze di drag, a causa del terzo meccanismo che concorre alla loro formazione chiamato *vortex induced drag*.

2.3.2 Vortex-Induced drag

Le automobili comuni sono considerate dei corpi tozzi (un corpo viene definito tozzo quando presenta una superficie frontale ampia e pressoché piatta) che generano alti livelli di pressure drag. Il distacco che si verifica al termine della parte posteriore è spesso accompagnato da vortici in direzione longitudinale denominati *C-pillar* (chiamati così perché generati dal montante posteriore dell'automobile che appunto è chiamato C_Pillar). I vortici C-pillar:

- hanno una forma fortemente tridimensionale;
- posseggono una elevata energia cinetica;
- provocano un forte abbassamento di pressione attirando il flusso sul lunotto posteriore e ritardandone il distacco.

Le modalità di distacco del flusso dalla parte posteriore del veicolo sono pesantemente condizionate dall'angolo di inclinazione della superficie posteriore ed influiscono significativamente sull'entità dei vortici C-pillar. La componente della forza di drag dovuta ai vortici è meglio conosciuta come *lift-induced drag*.

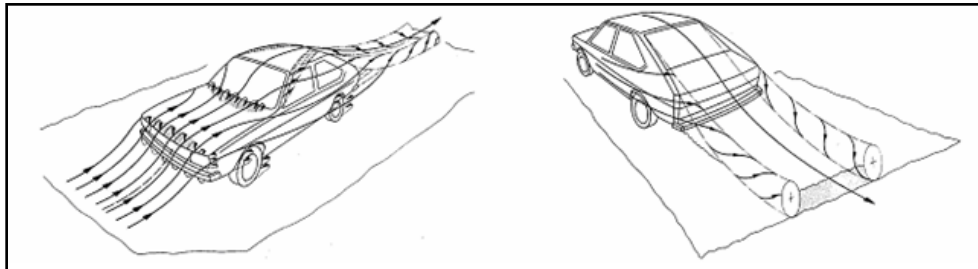


Figura 2.4 Generazione dei vortici intorno alla vettura, W.H.Hucho (1998)

2.4 Configurazione assunta dal flusso intorno all'automobile

Come dimostrato da Le Good e da Garry (2004) [17], l'uso di modelli a geometria semplificata permette di determinare gli aspetti fondamentali del flusso associato alla geometria reale del veicolo. Fra le varie geometrie testate negli anni, la più famosa è sicuramente il modello di Ahmed (1984)[8]. Questo modello presenta:

- una superficie frontale con spigolo superiore raccordato;
- una parte centrale sufficientemente lunga da ridurre gli effetti sulla scia dovuti alla zona frontale;
- una parte posteriore, il cui angolo di inclinazione (α) può essere variato fra 0 e 40°.

2.4.1 Flusso mediato nel tempo

L'influenza dell'angolo della superficie posteriore sul coefficiente di drag è stata studiata per la prima volta da Morel (1978) [18]. Per i suoi esperimenti, Morel, utilizzò un modello a geometria semplificata con parte posteriore ad inclinazione variabile, ed osservò che la variazione dell'angolo posteriore tra 0° a 60° produceva un incremento del coefficiente di drag. Tale aumento diventava particolarmente evidente superati di poco i 60° (vi era quasi un raddoppio del valore) per poi subire una drastica riduzione e ritornare vicino ai valori iniziali.

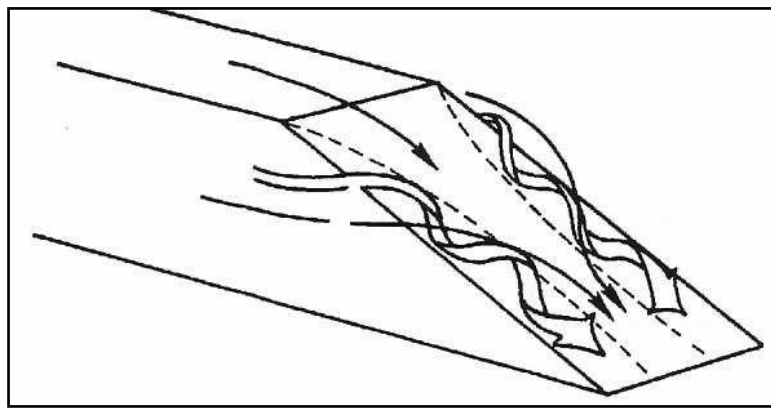


Figura 2.5 Vortici tridimensionali lungo la superficie obliqua

Una volta analizzato il fenomeno, venne scoperta la presenza di due distinti regimi di flusso. Il primo si instaurava per angoli inferiori a 60° e poteva essere comparato a quello ottenuto per modelli con parte posteriore dritta o con una piccola inclinazione (dato che la regione interessata dalla scia era particolarmente ampia). Il secondo era una combinazione del primo e di una

serie di vortici di forma tridimensionale (vedi Figura 2.5) sviluppati lungo la superficie obliqua.

Sulla scia di Morel, Ahmed (1984) [8] continuò ad investigare l'influenza dell'angolo di inclinazione posteriore sul coefficiente di drag. Anche Ahmed utilizzò un modello di veicolo a geometria semplificata, di fatto molto simile a quello di Morel, ma con minori possibilità di configurazione.

Le prove condotte da Ahmed rivelarono che la zona frontale contribuiva in minima parte alla pressure drag, la cui entità era quasi totalmente determinata dall'inclinazione della superficie posteriore. Il cambiamento dell'angolo α fra 0° e 40° provocava variazioni considerevoli nel coefficiente di drag il cui andamento è mostrato in Figura 2.6.

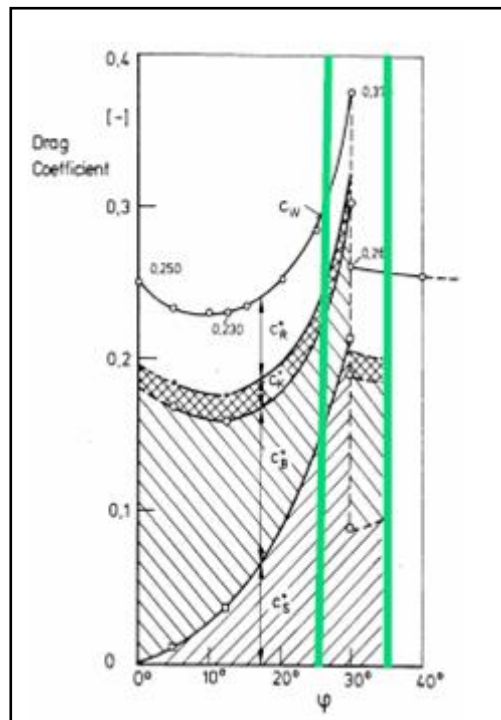


Figura 2.6 Dipendenza dei coefficienti di resistenza aerodinamica al variare dell'angolo di inclinazione posteriore per il corpo di Ahmed, Ahmed et.al (1984)

Ahmed notò che il coefficiente di drag raggiungeva un massimo quando l'angolo della superficie posteriore era di 30° ; una volta oltrepassato tale angolo il coefficiente di drag diminuiva significativamente assumendo un valore stabile. Per comprendere i motivi dell'influenza dell'angolo posteriore sul coefficiente di drag, Ahmed cercò di visualizzare il percorso seguito dal flusso (Figura 2.7). Venne osservato che per inclinazioni inferiori o uguali a 30° il flusso:

- si attorcigliava dando origine ai vortici C-pillar;
- formava un bolla sulla superficie inclinata (dovuta al distacco del flusso in corrispondenza dello spigolo superiore ed al suo riattacco appena prima dello spigolo inferiore);
- creava due zone di ricircolo (indicate in figura 7 con A e B) posizionate una sopra l'altra e circolanti in senso opposto. A tali zone venne dato il nome di *vortici bidimensionali quasi statici*.

Ahmed (1984) [8] scoprì che i vortici C-pillar e il vortice bidimensionale superiore "A" erano fortemente influenzati dall'angolo di inclinazione posteriore, mentre il vortice bidimensionale inferiore "B" dipendeva dal flusso proveniente da sotto il modello ed in particolare dall'altezza libera dal suolo.

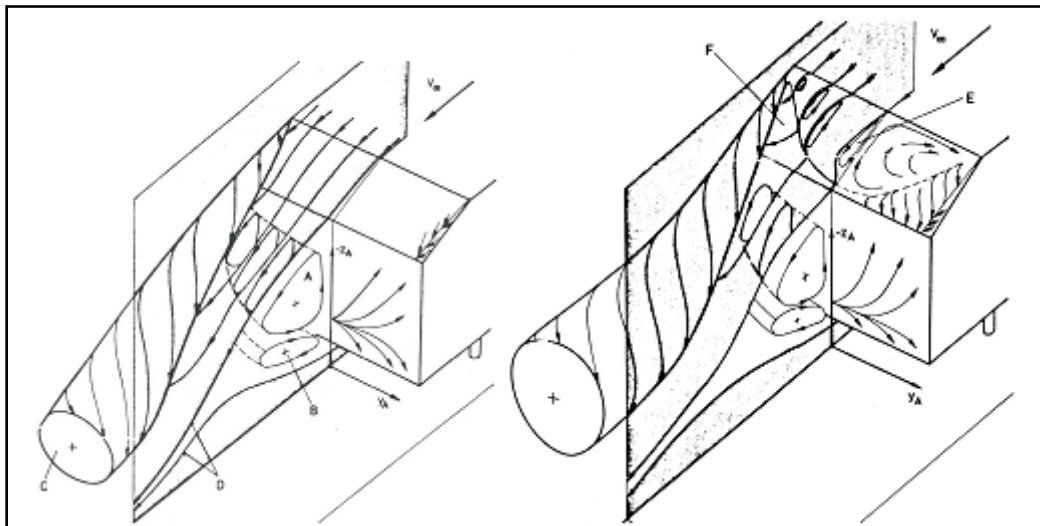


Figura 2.7 Alte e basso coefficiente di drag per angolo posteriore pari a 30°, Ahmed et al (1984)

In corrispondenza dell'angolo di 30°, la bolla "E":

- raggiungeva la dimensione massima formando un vortice a forma di ferro di cavallo sulla superficie inclinata;
- favoriva il riattacco del flusso prima della sua definitiva separazione;
- incrementava l'intensità dei vortici C-pillar;
- presentava una zona di inversione del flusso, che diminuendo la pressione sulla superficie inclinata aumentava il valore di pressure drag esercitato sul modello.

Per angoli della superficie inclinata superiori ai 30°, il flusso che si separava in corrispondenza della spigolo superiore non si riattaccava in corrispondenza di quello inferiore. In tal modo la bolla sulla superficie inclinata si rompeva

provocando una perdita di intensità dei vortici "C-pillar" ed una riduzione della pressione drag e dei coefficienti di drag.

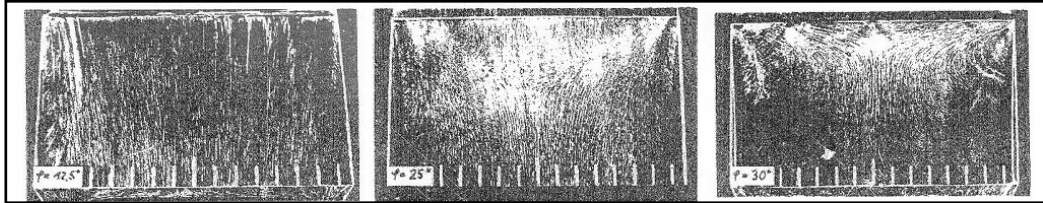


Figura 2.8 Skin friction patterns per diversi angoli di inclinazione posteriore, Ahmed et.al. (1984)

Gli *Skin friction pattern* (Figura 2.8) ottenuti con il modello di Ahmed per 12.5°, 25° e 30° permisero di confermare:

- la presenza dei vortici C-pillar;
- la presenza dei vortici a ferro di cavallo;
- che il distacco del flusso in corrispondenza del vertice alto della superficie inclinata si verifica anche per angoli inferiori ai 30°.

Lienhart (1999) [19] realizzò degli esperimenti su angoli di inclinazione pre-critici (25°) e post-critici (35°) della superficie posteriore del modello di Ahmed (vedi Figura 2.9). Per le prove utilizzò una galleria del vento a bassa velocità (LSTM) ed un anemometro laser doppler (LDA). Le tecniche di visualizzazione del flusso, misero in evidenza la sua configurazione fortemente tridimensionale mentre gli skin friction pattern rivelarono la presenza dell'inversione di flusso per angoli di inclinazione di 25° e il suo distacco per angoli di 35°. I risultati vennero verificati per entrambe le configurazioni tramite misure di velocità nel piano di mezzeria. Le velocità vennero riportate in grafici vettoriali che per la configurazione a 25° indicarono:

- la presenza di una piccola bolla sulla superficie inclinata;
- il riattacco del flusso prima del distacco dallo spigolo inferiore della superficie inclinata;
- la formazione di una scia di grandi dimensioni.

Mentre per quella a 35° indicarono lo sviluppo di una singola aerea di ricircolo dovuta al distacco del flusso dallo spigolo superiore della superficie inclinata.

I risultati ottenuti da Lienhart erano molto simili a quelli di Ahmed e confermavano la criticità dell'angolo di inclinazione di 30°. Lienhart riuscì anche ad osservare chiaramente la presenza dei due vortici controrotanti deducendo che fossero i responsabili del fatto che il flusso rimaneva aderente alla superficie inclinata per angoli fino a 30°. Per angoli superiori, infatti, i vortici collasavano causando il distacco del flusso (configurazione a 35°).

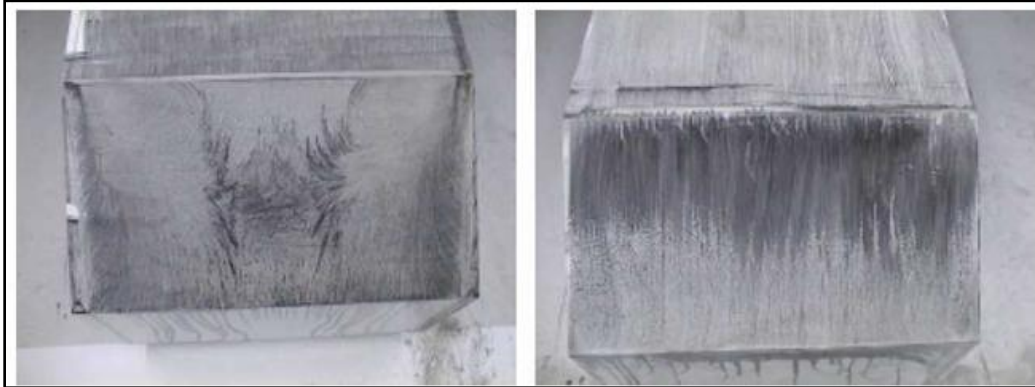


Figura 2.9 Pre e post casi critici del modello di Ahmed, Lienheart et.al. (1999)

Sims-Williams (2001) [20] condusse studi sulla configurazione critica $\alpha = 30^\circ$ del modello di Ahmed dimostrando che il flusso poteva essere commutato manualmente fra configurazioni ad alto e basso livello di drag tramite l'utilizzo di un piano in grado di deflettere il flusso (Figura 2.10). Le prove furono eseguite ad alti ($> 5,9 \cdot 10^5$) e bassi numeri di Reynolds ($4,7 \cdot 10^5$). Tramite le tecniche di visualizzazione di flusso venne osservato che per Reynolds elevato la configurazione a basso livello di drag era stabile solo per un breve periodo di tempo oltre il quale il flusso tornava nella configurazione ad alto livello di drag. Per Reynolds basso invece la configurazione a basso livello di drag era stabile per un lungo periodo di tempo. I risultati ottenuti da Sims-Williams concordavano con quelli di Ahmed (1984) [8].

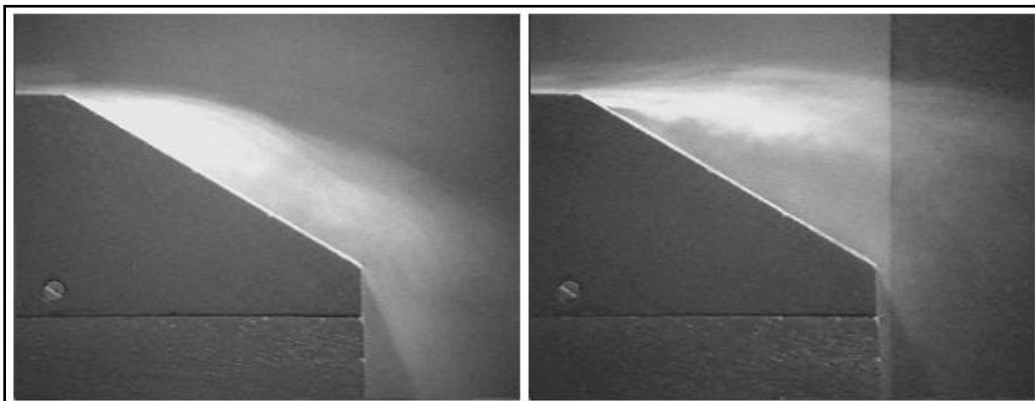


Figura 2.10 Strutture di flusso per l'inclinazione posteriore a bassa (sinistra) e alta resistenza (destra)

Spohn e Gillieron (2002) [21] condussero esperimenti per analizzare la scia prodotta dal modello di Ahmed con angolo di inclinazione posteriore di 25° in un "water tunnel" a bassa velocità. Essi analizzarono:

- le separazioni del flusso nella zona anteriore e posteriore del modello;

- le separazioni del flusso lungo il corpo del modello;
- la generazione delle strutture vorticosi nella zona iniziale della scia.

La sperimentazione mise in evidenza:

- *zona anteriore*: l'esistenza di linee di separazione che terminavano lateralmente in due punti su ogni lato. Da tali punti avevano origine quattro vortici controrotanti (Figura 2.11 sinistra).
- *zona posteriore*: l'esistenza di una bolla sulla superficie inclinata e di una coppia di vortici C-pillar controrotanti (Figura 2.11 destra).

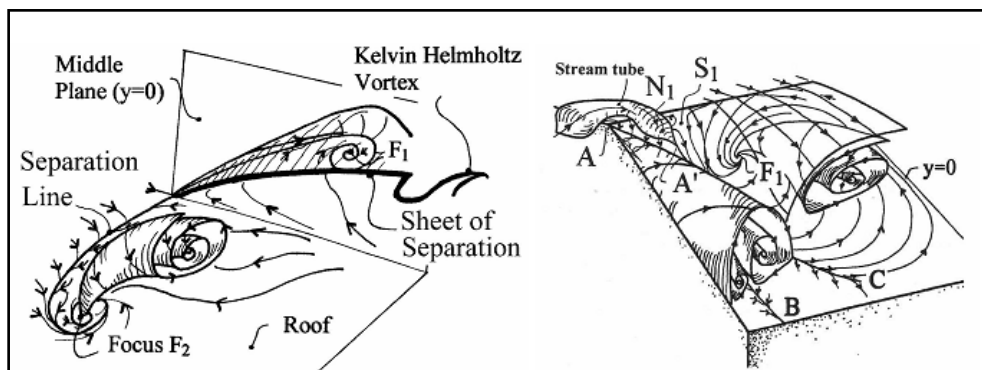


Figura 2.11 Separazione del flusso nella parte anteriore e posteriore della geometria del Ahmed Body, Spohn e Gilliéron (2002)

La posizione di tali vortici implicava l'esistenza di una o più linee di attacco; in particolare vennero individuate:

- la linea AB raffigurante l'attacco dei vortici C-pillar;
- la linea A'C raffigurante l'attacco del vortice principale.

La loro visualizzazione permise di spiegare la forma degli Skin friction pattern ottenuti da Ahmed (1984).

Anche Vio (2004) [22] ha esaminato la configurazione critica del modello di Ahmed ottenendo risultati del tutto simili a quelli di Sims-Williams (2001)[20] e a quelli di Ahmed (1984)[8]. Il grafico vettoriale delle velocità, mise in evidenza:

- la presenza di due vortici bidimensionali controrotanti dietro la zona posteriore del modello;
- che la parte superiore dei vortici bidimensionali era alimentata dal fluido distaccato dallo spigolo superiore della superficie inclinata.

Tale circostanza rappresentava una significativa differenza rispetto ai risultati ottenuti da Ahmed in cui il flusso dopo il distacco dallo spigolo superiore si

riattaccava alla superficie inclinata in corrispondenza dello spigolo inferiore. La configurazione del flusso determinata da Vino è rappresentata in Figura 2.12.

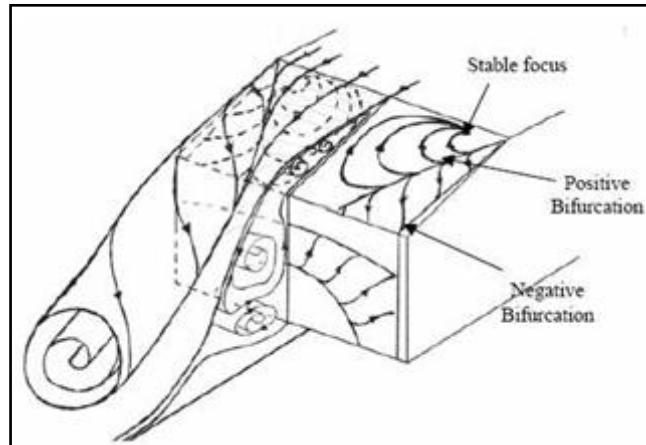


Figura 2.12 Struttura del flusso per l'angolo d'inclinazione posteriore critico dell'Ahmed Body, **Vino et.al (2004)**

Nouzawa (1990) [23] ha condotto esperimenti su modelli a geometria semplificata con baule sporgente scoprendo che la sua presenza complicava le caratteristiche del flusso ora dipendenti da tre parametri:

- l'altezza del baule;
- la posizione in cui finiva il tetto;
- l'angolo di inclinazione del lunotto posteriore.

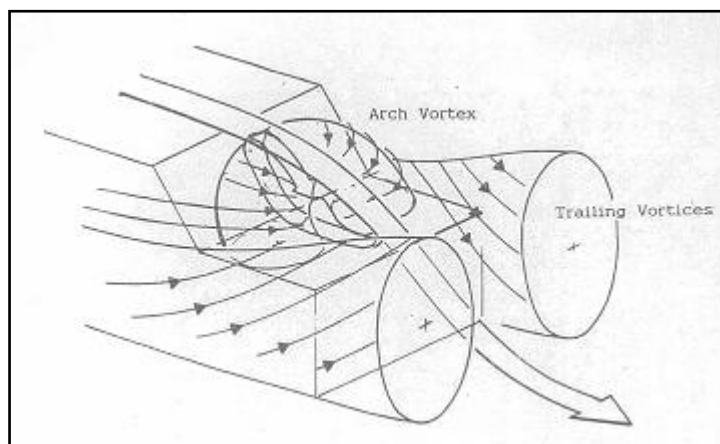


Figura 2.13 Struttura del flusso per geometria con baule sporgente, **Nouzawa et.al. (1990)**

Nouzawa osservò che il coefficiente di drag assumeva il valore più alto quando l'angolo del lunotto posteriore era di 25° . Tale configurazione venne chiamata *geometria quasi critica* e venne raccomandato di evitarla per le applicazioni a

basso drag. Nouzawa raffigurò le linee di pressione, i vettori di velocità e i contorni dei vortici ottenuti dalle prove.

Le linee di pressione misero in mostra la presenza di vortici in direzione longitudinale e di vortici dietro il lunotto posteriore (dato che in tali regioni venivano registrate basse pressioni), mentre i vettori di velocità ed i contorni dei vortici evidenziarono:

- il distacco del flusso dal lunotto posteriore che favoriva la formazione dei vortici longitudinali;
- una regione dietro il baule caratterizzata da un vortice rotante in senso orario;
- una regione dietro il lunotto caratterizzata da un vortice rotante in senso antiorario (Figura 2.13).

Nouzawa osservò anche la presenza di un vortice a forma di arco (figura 13) nella zona compresa fra il lunotto posteriore e il baule. Tale vortice, generato in corrispondenza del quasi critical state era la principale fonte di incremento del coefficiente di drag e non era mai stato rilevato nei modelli di veicolo a coda tronca.

2.4.2 Flussi non stazionari

Gli studi menzionati nel paragrafo precedente sono basati su sperimentazioni mediate nel tempo. Ciò dà l'impressione che il flusso sia regolare anche se in realtà è fortemente variabile.

Vino (2004) [22] ha analizzato le caratteristiche dipendenti dal tempo del flusso generato dal modello di Ahmed con angolo posteriore di 30° . Alcune prese di pressione sono state attaccate sulla superficie inclinata e su quella verticale della zona posteriore del modello. Le prese a loro volta sono state connesse al DPMS (Direct Pressure Measurement System) in modo da registrare le fluttuazioni di pressione all'interno della scia. I risultati ottenuti hanno messo in evidenza un moto oscillatorio caratterizzato da una singola frequenza di oscillazione corrispondente ad un numero di Strouhal di $0.36 \div 0.39$.

Sims-Williams (2001) [20] analizzò il comportamento non stazionario del flusso generato dal modello di Ahmed individuando alti livelli di variabilità all'interno della scia, localizzati in particolare nei pressi della periferia dei vortici C-pillar. Le regioni ad elevata instabilità erano caratterizzate da una precisa frequenza di oscillazione avente numero di Strouhal di 0.35.

Nouzawa (1992) [24] estese le sperimentazioni dipendenti dal tempo ai modelli provvisti di baule sporgente. L'analisi evidenziò le caratteristiche di instabilità del vortice a forma di arco ottenuto in corrispondenza della *quasi critical geometry* (25°). Le misure, effettuate tramite anemometri a filo caldo e prese di pressione, indicarono chiaramente che i vortici ad arco oscillavano con una frequenza compresa fra 20 e 30 Hz. Tale circostanza permise di capire che la fluttuazione del coefficiente di drag osservata era dovuta all'influenza che il vortice ad arco esercitava su di esso.

3 Analisi Fluidodinamica Computazionale (CFD)

3.1 Introduzione

La fluidodinamica computazionale (CFD) è uno degli strumenti più potenti per calcolare l'interazione fluido/struttura. L'emergere della CFD ha permesso di utilizzare la galleria del vento solo durante la fase di validazione iniziale e finale del progetto del veicolo. Una volta validato il codice CFD, tramite i dati sperimentali, le ulteriori analisi possono essere svolte attraverso il calcolo computazionale. In questo modo il tempo necessario in ogni fase per creare il modello, montarlo e collaudarlo può essere risparmiato utilizzando un approccio computazionale. Qualsiasi modifica della geometria richiesto può essere effettuata con software CAD e analizzato nuovamente con lo strumento CFD a disposizione. La ripetizione di tale ciclo consente di giungere a un design ottimizzato riducendo i costi di progettazione.

Nel presente studio si utilizza lo strumento CFD per analizzare l'effetto della distanza tra i veicoli in platoon e l'influenza della geometria posteriore dei modelli sul coefficiente aerodinamico. Lo studio è diviso in quattro fasi, inizialmente i modelli da analizzare sono stati modellati usando un programma di modellazione solida, Inventor 9, e salvati col formato *.IGS. Tali modelli vengono poi importati in Gambit dove si effettua il *pre-processing*, ovvero viene creato il dominio entro il quale si effettua l'analisi CFD. Il dominio viene meshato e vengono definite le condizioni al contorno. In fine il tutto viene salvato nel formato *.MSH. Il file *.MSH viene importato in Fluent per eseguire l'analisi CFD e calcolare il comportamento aerodinamico dei modelli (*fase di solving*). Successivamente a valle del calcolo si passa alla fase di *post-processing* ovvero all'analisi dei dati.

Il processo viene eseguito sia per diverse geometrie posteriori dell'Ahmed body che per diverse spaziature tra i veicoli in tandem.

L'analisi CFD si basa sul **metodo numerico dei volumi finiti** che è un metodo di integrazione di equazioni differenziali alle derivate parziali. Tali equazioni vengono integrate in un volume sui cui confini sono imposte le condizioni al contorno.

Tale dominio viene quindi suddiviso in tanti volumi elementari (*mesh o griglia*), quindi tramite la forma integrale delle equazioni del problema considerato vengono scritte le relazioni che intercorrono tra i vari volumetti confinanti così da poter essere risolte per via numerica con l'ausilio del calcolatore.

L'approssimazione risiede nel fatto che tali volumetti hanno dimensione finita e non infinitesima.

La divisione del volume originale (dominio di calcolo) in tanti volumetti si chiama discretizzazione del dominio di calcolo. Tanto maggiore sarà il numero di elementi in cui è ripartito il dominio di calcolo tanto più “preciso” sarà il risultato del calcolo. Il problema diventa però il tempo e l'hardware a disposizione in quanto il numero di equazioni da risolvere è proporzionale al numero delle celle della griglia.

Il capitolo corrente si occuperà della generazione delle mesh col software Gambit e dell'analisi CFD attraverso l'utilizzo di Fluent 6.3.26.

3.2 Scelta della griglia

In Fluent è possibile utilizzare mesh che comprendono celle triangolari o quadrangolari (o una combinazione delle due) nei modelli bidimensionali e tetraedriche, esaedriche, prismatiche e poliedriche (o una combinazione di queste) in quelli tridimensionali. Per la scelta del tipo di mesh da applicare è necessario considerare le seguenti questioni:

- Tempo di realizzazione della mesh (*fase di pre-processing*)
- Costi computazionali (*fase di solving*)
- Precisione dei dati

Questi problemi sono analizzati in dettaglio per chiarire i compromessi insiti nella scelta del tipo di maglia.

3.2.1 Size Function

E' possibile realizzare delle griglie con spaziatura non uniforme in quanto è importante descrivere, le zone dove ci si aspettano maggiori gradienti di pressione/velocità, con maggiore dettaglio mentre avere una mesh meno fitta per descrivere le zone dove non ci si aspetta gradienti importanti.

Lo strumento che permette di controllare le dimensioni dei lati della griglia è la Size Function.

La Size Function ci permette di controllare:

- la lunghezza minima e massima degli elementi della mesh lungo una linea.
- Il fattore di disinfittimento della griglia.

La Size Function permette di controllare le dimensioni delle celle nelle regioni che circondano uno specifico oggetto. In particolare può essere utilizzata per limitare le dimensioni degli intervalli della mesh su qualsiasi bordo o le dimensioni degli elementi della mesh su qualsiasi faccia o volume.

Un effetto della Size Function è illustrata nella Figura 3.1 e nella Figura 3.2

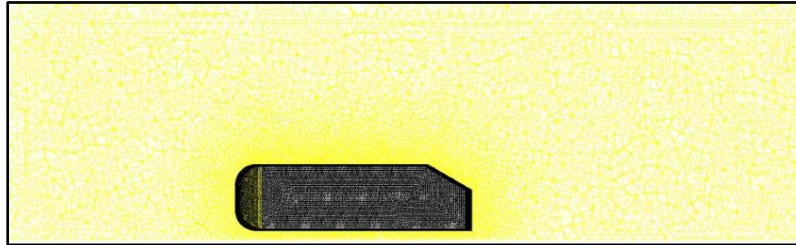


Figura 3.1 Celle fini che circondano il modello.

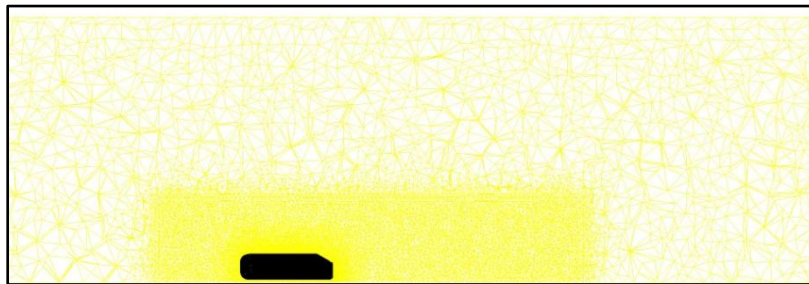


Figura 3.2 Celle più grandi lontano dal modello.

In questo esempio la Size Function è stata assegnata al volume e definita a partire dalle superfici dell'Ahmed Body. Il volume è meshato con elementi tetraedrici e la Size Function è utilizzata per aumentare la dimensione delle celle a partire dall'Ahmed Body fino a raggiungere una dimensione massima fissata.

3.2.2 Specifiche della size functio

Per creare una Size Function, devono essere definite diverse specifiche per utilizzare diversi algoritmi e parametri di disinfittimento.

La specifica *Tipo* determina il tipo di algoritmo utilizzato dalla Size Function per controllare la dimensione degli elementi della mesh. In questo studio si è utilizzato il tipo Fixed per il modello bidimensionale e il tipo Meshed per quello tridimensionale.

La specifica Entità determina le entità geometriche usate come punto di partenza per la Size Function. In questo studio le fonti di attacco sono le superfici dei veicoli e il dominio/sottodomini che circondano i veicoli

La specifica Parametri definisce le caratteristiche esatte della Size Function. Per il modello bidimensionale si sono impostati i seguenti valori calcolati in percentuale rispetto la lunghezza del modello (L=1,044 m):

- Start size = 0,0024%
- Grow rate = 105%
- Max.size =14%

Per il modello tridimensionale all'interno del sottodominio:

- Grow rate =0,1%
- Max.Size =5%

All'esterno:

- Grow rate =0,5%
- Max.Size =29%

3.3 Generazione delle griglie con Gambit

Questa sezione presenta l'uso del generatore di mesh, Gambit, per creare la griglia sia nel caso bidimensionale che in quello tridimensionale. Gambit è lo strumento utilizzato per preparare le griglie. Può importare i file IGS CAD che contengono le informazioni sui vertici e sulle superfici. Permette di pulire e modificare la geometria ai fini di generare la griglia. Che può essere tetraedrica, esaedrica, prismatica o piramidale, strutturata o non strutturata e di assegnare le condizioni al contorno.

Per l'attuale studio si sono utilizzate celle triangolari nel caso dei modelli bidimensionali e tetraedriche per i modelli tridimensionali.

3.3.1 Modello 2D

3.3.1.1 Modello isolato

In Figura 3.3 è riportato il modello dell'Ahmed Body bidimensionale analizzato al variare delle sua geometria posteriore:

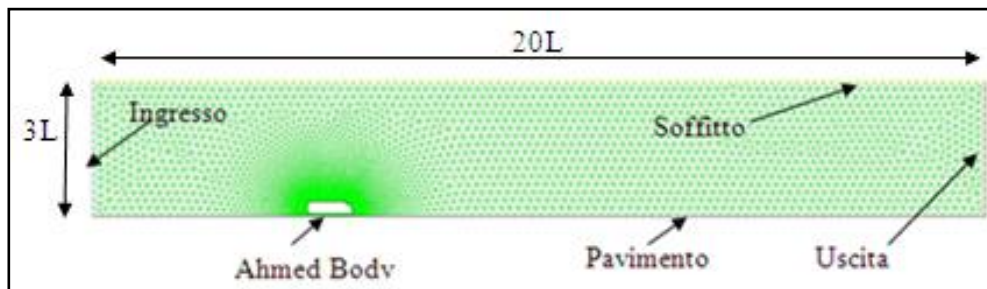


Figura 3.3 Dominio 2D per l'Ahmed Body.

La Figura 3.3 mostra il dominio 2D per un modello isolati dell'Ahmed Body. Il contorno è formato da:

- un *ingresso* a cui è imposta una velocità $V=30$ m/s
- un *terreno* a cui è imposto una velocità $V=0$ m/s
- un *soffitto*. a cui è imposto una velocità normale $V_N=0$ m/s
- un *uscita* a cui è imposta una pressione statica pari a 0 Pascal
- dall'*Ahmed Body* a cui è imposta una velocità $V=0$ m/s

Per meshare l'interno del dominio si è utilizzata la Size Functio in modo tale da avere una mesh più raffinata nelle zone dove ci sono maggiori variazioni del flusso e diradandola dove non vi sono variazioni senza così perdere l'accuratezza nella soluzione.

Come mostrato dalla Figura 3.4, l'Ahmed Body è circondato da una griglia molto fitta poiché tale area è estremamente importante per individuare la posizione della separazione del flusso nella parte posteriore del veicolo. Le celle triangolari sono state applicate all'intero dominio.

Il veicolo è stato posto rispettivamente a $5L$ dall'ingresso e $14L$ dall'uscita in modo tale che il flusso si stabilizzi completamente prima di raggiungerlo e che il flusso di scia sia completamente sviluppato una volta lasciato il modello. L'Ahmed Body è posizionato a $0,05$ m dal terreno, valore standard per tutte le prove.

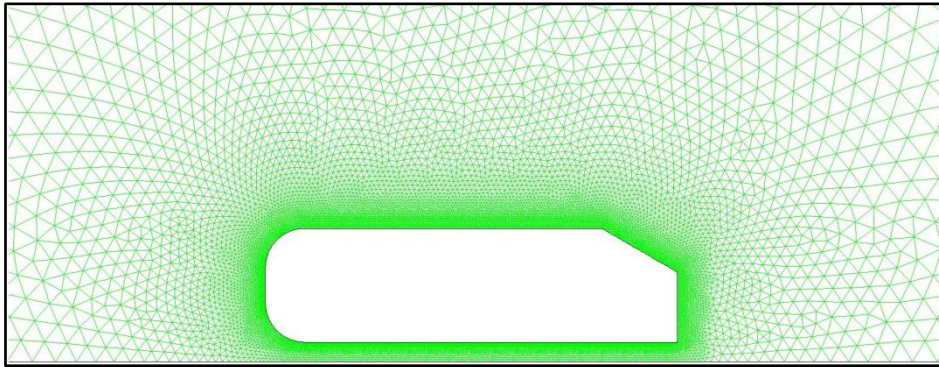


Figura 3.4 Griglia generata intorno all'Ahmed Body con la Size Function.

Prima di procedere con l'analisi è stato necessario verificare l'indipendenza dei risultati dalla griglia.

La Figura 3.5 mostra che una mesh formata da 25000 celle fornisce una sufficiente precisione e risoluzione che può essere adottata come standard per tutte le successive analisi del modello isolato.

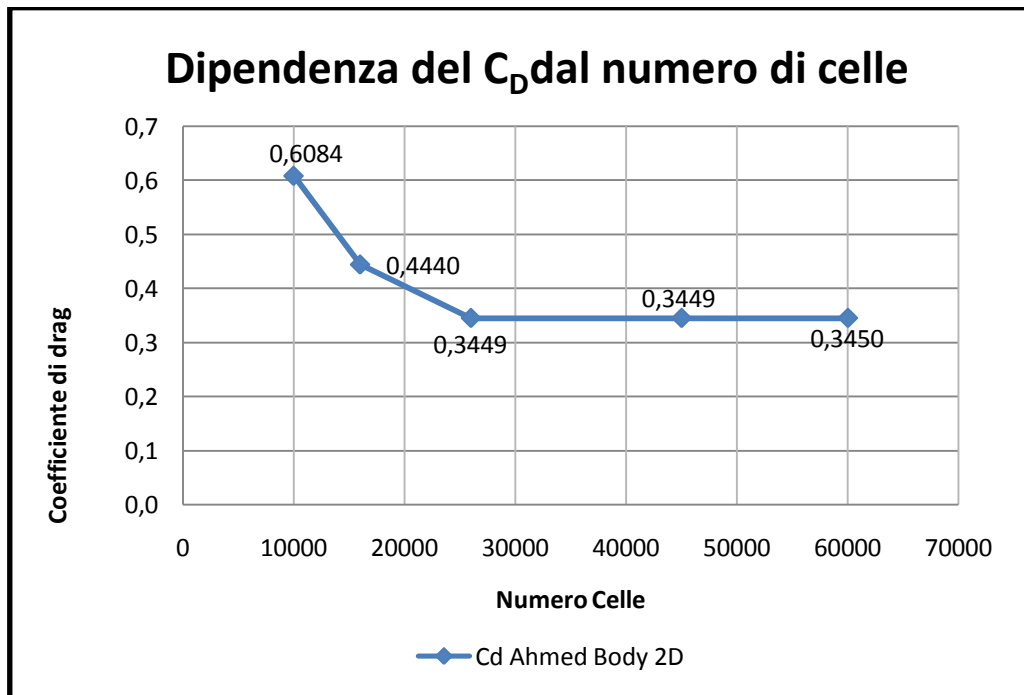


Figura 3.5 Dipendenza del C_D , nel modello di Ahmed con angolo posteriore di 30° , al variare del numero di celle.

3.3.1.2 Due modelli in tandem

La stessa procedura utilizzata precedentemente è stata impiegata per analizzare la variazione del coefficiente di resistenza aerodinamica (C_D) al variare della spaziatura tra due Ahmed Body posti in tandem. Lo studio prosegue analizzando due identici modelli posti in tandem con un angolo posteriore di 30° dove l'unica variabile è lo spazio tra i due veicoli (x/L) che varia tra $0.25L$ e $5L$, dove L è la lunghezza dell'Ahmed Body ($L=1.044$ m).

La Figura 3.6 mostra la mesh generata nel caso di due Ahmed Body posti in tandem. La mesh generata, intorno ai due modelli, è stata realizzata in maniera analoga a quanto fatto nel caso del modello isolato.

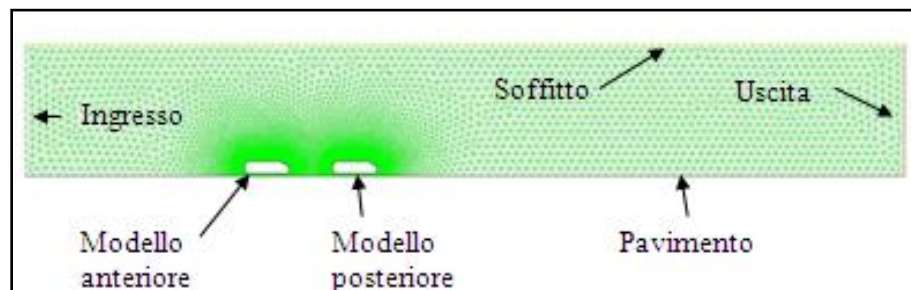


Figura 3.6 Dominio per due modelli in tandem.

Come per il modello isolato si è svolto un test per verificare l'indipendenza dei risultati dalla griglia. Da tale analisi è emerso che una griglia formata da circa 50000 celle fornisce dei risultati sufficientemente accurati anche per svolgere ulteriori analisi, in due dimensioni, con differenti Ahmed Body in tandem.

Nella Figura 3.7 sono riportati i risultati del test al variare del numero di celle con una spaziatura tra i due veicoli di $x/L=1$.

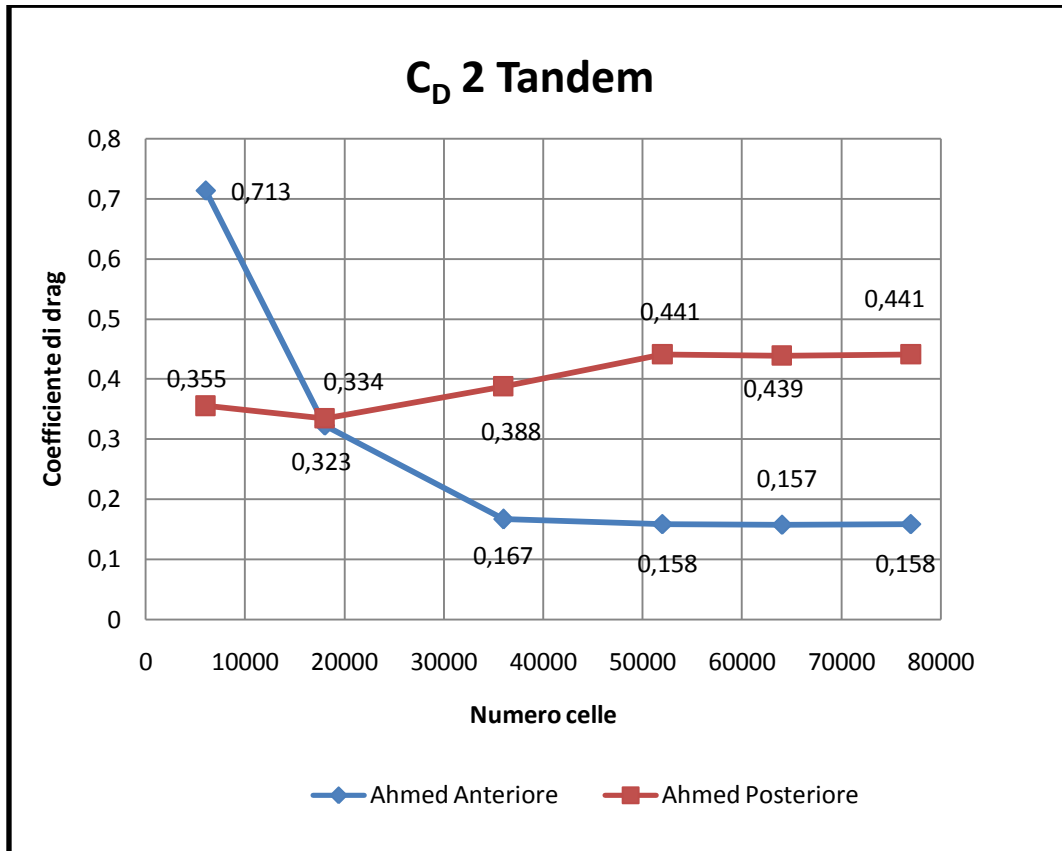


Figura 3.7 Andamento del C_D al variare del numero di celle per due Ahmed Body (30°) in tandem a distanza di x/L=1.

3.3.2 Modello 3D

3.3.2.1 Ahmed Body isolato

L'Ahmed Body isolato è stato analizzato al variare dell'inclinazione del suo angolo posteriore ($0^\circ < \alpha < 40^\circ$). Il modello tridimensionale è mostrato in Figura 3.8.

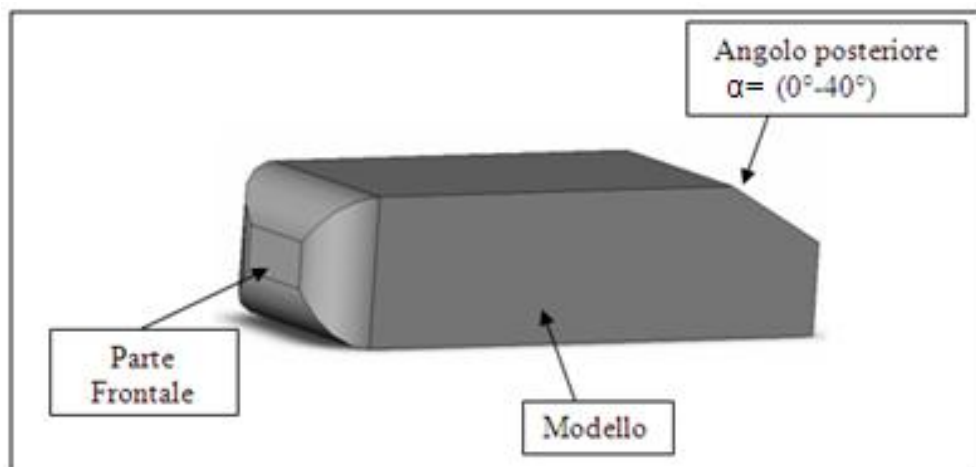


Figura 3.8 Ahmed Body, 3D, al variare della geometria posteriore

Di seguito viene riportato il metodo utilizzato per la generazione della mesh nel caso del modello isolato.

Inizialmente è stato creato un sottodominio che circonda l'Ahmed body in modo tale da avere una mesh molto fitta nella parte di interesse come mostrato in Figura 3.9 per riprodurre la separazione del flusso nella parte posteriore

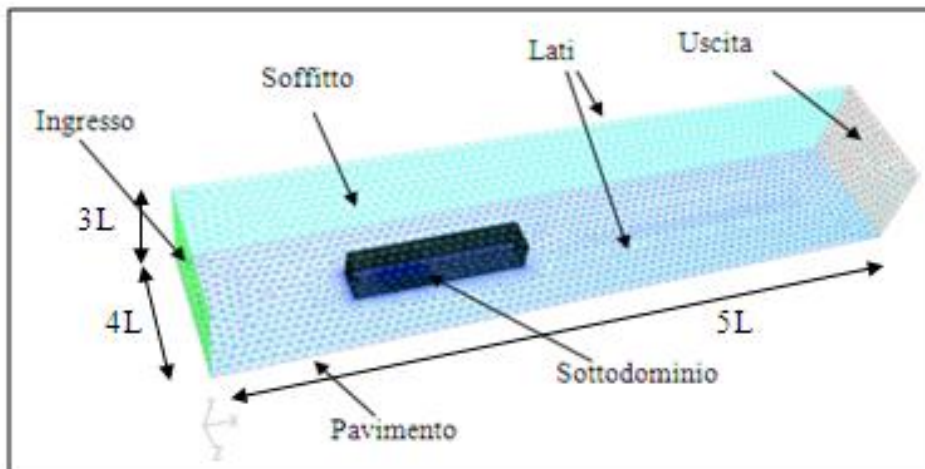


Figura 3.9 Dominio 3D Ahmed Body isolato

Il sottodominio ha le dimensioni di $5L \times 1L \times 1L$, mentre quelle del dominio esterno sono $20L \times 4L \times 3L$ ($L=1.044$ m). Il modello è stato posizionato a $5L$ dall'ingresso e a $14L$ ($L=1,044$ m) dall'uscita in modo tale che sia il flusso in ingresso che il flusso della scia siano completamente sviluppati e a 0.05 m dal terreno (valore standard) . La mesh all'interno del sottodominio è formata da circa 1,4 milioni di celle tetraedriche mentre nel dominio esterno è formato da circa 212 mila celle.

3.3.2.2 Modelli in tandem

L'analisi in tandem è sviluppata per due Ahmed Body uguali con angolo di inclinazione della faccia posteriore pari 30° .

La distanza tra i due veicoli varia da $0.25L$ a $5L$ dove L è la lunghezza del modello pari a 1.044 m.

Anche in questo caso i lati del dominio sono posizionati a circa due volte la lunghezza del modello, in modo tale che le pareti non influenzino il flusso attorno ai modelli. Il soffitto è stato posizionato a circa $3L$, per la stessa ragione. Il veicolo anteriore è stato posto sempre a una distanza di $5L$ dall'ingresso. Entrambi gli Ahmed Body sono posizionati a una distanza da terra pari a 0.05 m (altezza standard raccomandata).

La lunghezza del sottodominio varia in base alla distanza tra i due modelli, perché deve contenerli entrambi, mentre la larghezza e l'altezza sono sempre uguali a $1L$.

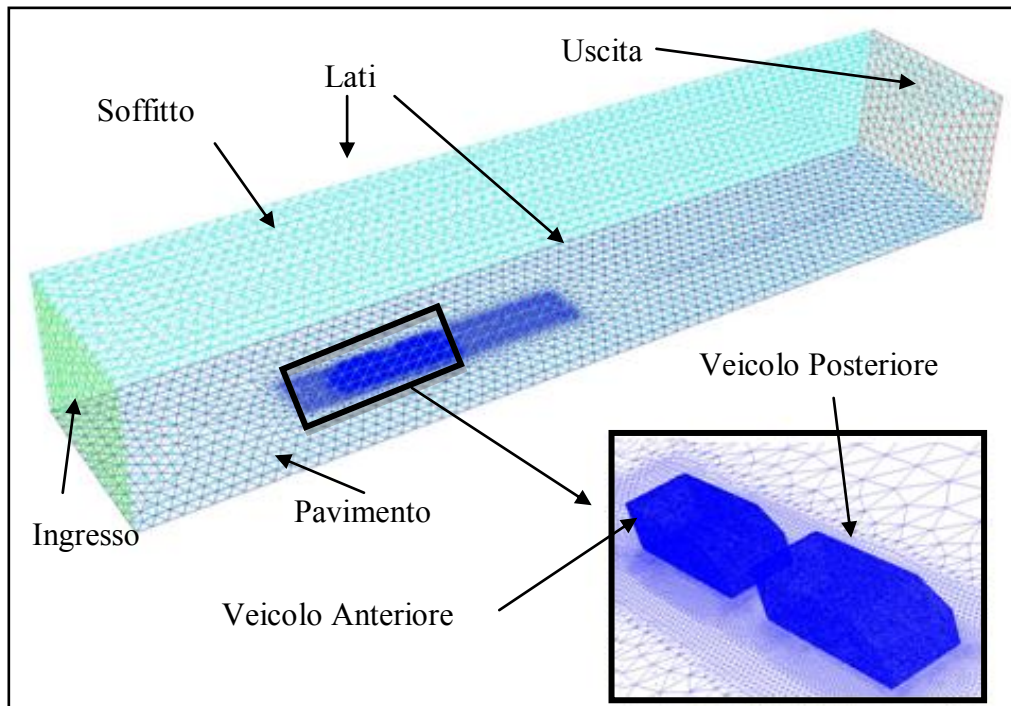


Figura 3.10 Dominio per due Ahmed Body in tandem

Per la generazione delle mesh si è utilizzata la stessa tecnica usata per il modello isolato, cioè mesh dettagliate all'interno del sottodominio per poi disinfittirle andando verso i contorni del dominio. Le facce dei due Ahmed Body sono state utilizzate come origine della Size Function, in modo tale da avere una mesh dettagliata nelle vicinanze dei due veicoli. All'interno del sottodominio si hanno circa 2.5 milioni di celle, mentre all'esterno circa 220 mila.

Un'ulteriore analisi si è svolta su più Ahmed Body in tandem per comprendere gli effetti del platooning sul coefficiente di resistenza aerodinamica (C_D).

Per tale studio si sono utilizzati modelli tutti uguali con inclinazione della faccia posteriore di 0° e 30° . La spaziatura inter-veicolare (x/L) varia da $0.25L$ a $6L$.

Per rendere i calcoli più veloci si è considerato solo mezzo modello, ciò è possibile perché i veicoli hanno una forma simmetrica.

Anche in questo caso, come per quello di due veicoli in tandem, si è creato un dominio esterno e al suo interno un sottodominio, con una mesh più fine, che circonda tutti i corpi come mostrato Figura 3.11:

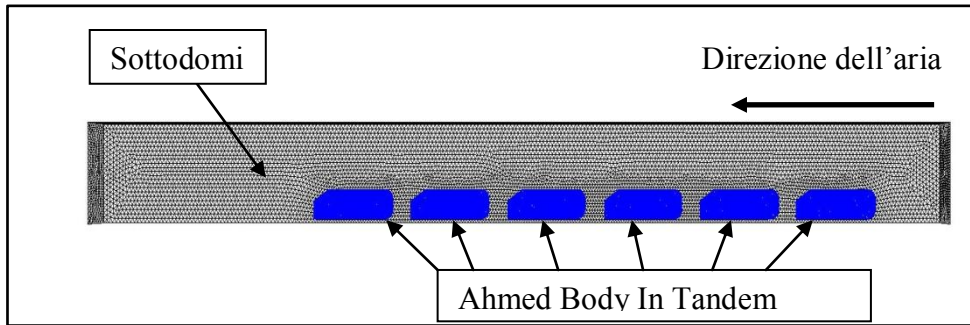


Figura 3.11 Sottodominio 6 Ahmed Body in Fila

Per tale analisi si è utilizzato un dominio lungo $50L$ per garantire, quando la distanza tra i veicoli è pari a $x/L=6$, una distanza tra l'ultimo Ahmed Body e l'uscita sufficientemente grande affinché la scia sia completamente sviluppata.

3.3.3 Veicoli 3D

Un ulteriore studio è stato svolto su modellini semplificati di veicolo. Come per gli Ahmed Body tali veicoli sono stati creati con Inventor 9, salvati nel formato *IGES e poi importati in Gambit dove sono state generate le mesh.

Per tale studio si sono considerati quattro tipi di veicoli in scala 1:4:

- Un camion autoarticolato ($L = 4,074$ m)
- Un'utilitaria ($L = 0,959$ m)
- Un furgoncino ($L = 1,012$ m)
- Una berlina. ($L = 1,199$ m)

Come mostrato in Figura 3.12

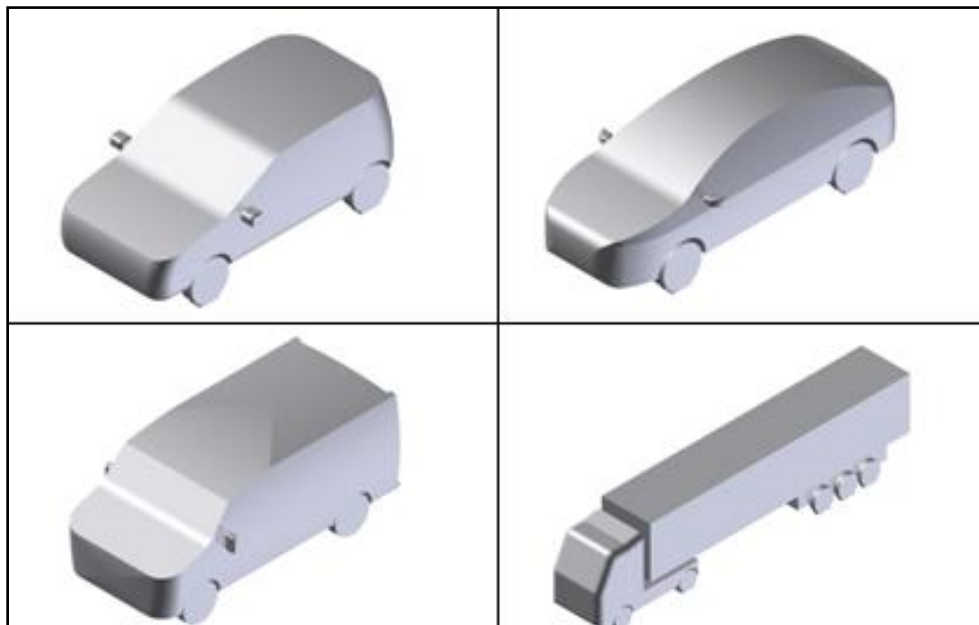


Figura 3.12 Modellini dei veicoli, 3D

Su tali modelli è stata svolta un'analisi sia sul veicolo isolato che su veicoli diversi posti in tandem al variare della spaziatura tra essi. Per velocizzare i calcoli si è considerato solo mezzo veicolo poiché le loro forme sono simmetriche.

3.3.3.1 Veicolo isolato e in tandem

Per generare la mesh nel modello isolato si è creato un dominio lungo $20L$ alto $3L$ largo $2L$ dove L è la lunghezza del veicolo considerato. All'interno del dominio, intorno al veicolo, è stato generato un sottodominio all'interno del quale sono racchiuse mesh molto fini per avere una precisione di calcolo maggiore nella zona d'interesse come mostrato in Figura 3.13

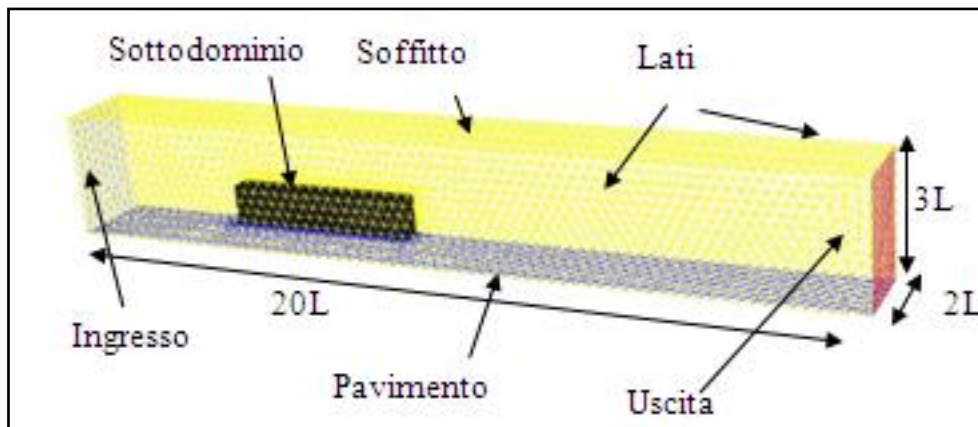


Figura 3.13 Dominio veicolo isolato

Le mesh all'interno del sottodominio come quelle all'esterno sono state generate utilizzando delle size function per controllare il disinfittimento della griglia. Per quella all'interno, come origine delle mesh sono state utilizzate le facce del veicolo mentre per quella esterna si sono utilizzate le facce del sottodominio.

Per i veicoli in tandem si è svolta la stessa procedura del veicolo isolato. Si è utilizzato un dominio che fosse abbastanza lungo da garantire lo sviluppo della scia, mentre la lunghezza del sottodominio e del dominio totale varia in base al numero dei veicoli posti in fila.

3.4 La fluidodinamica computazionale

3.4.1 Equazioni di base

Per tutti i flussi, FLUENT risolve le equazioni di conservazione della massa e quantità di moto. Equazioni supplementari di trasporto sono inoltre risolte quando vengono risolte le equazioni RANS in quanto bisogna risolvere le equazioni addizionali per la chiusura risolvendo il trasporto ad esempio di k ed ε .

L'equazione di conservazione della massa, o equazione di continuità, può essere scritta come segue:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.1)$$

L'equazione (3.1) rappresenta la conservazione della massa valida sia per flussi incomprimibili che per quelli comprimibili. ρ , t e u rappresentano rispettivamente la densità del flusso, il tempo e la velocità. L'equazione per la conservazione della quantità di moto può essere scritta come segue:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\Gamma) + \vec{F} \quad (3.2)$$

Dove: p è la pressione statica, Γ è il tensore degli sforzi e \vec{F} rappresenta sia la forza gravitazionale del corpo che le forze esterne che agiscono sul corpo. \vec{F} contiene in oltre altri termini dipendenti dal modello come la porosità media e le condizioni definite dall'utente.

Il tensore degli sforzi è definito come:

$$\Gamma = \mu \left[(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{u} I \right] \quad (3.3)$$

Dove μ è la viscosità molecolare, I è il tensore unitario e il secondo termine a destra dell'uguale è l'effetto della dilatazione del volume.

3.4.2 Modello di turbolenza

Nel caso di veicoli in platoon il flusso è considerato turbolento a causa sia della sua elevata portata massica che della complessità. Le equazioni di base definite in precedenza sono adatte solo a descrivere flussi laminari.

La turbolenza può essere definita come tridimensionale, tempo dipendente, caotica, dissipativa e flusso casuale.

In un flusso turbolento, esiste una cascata di energia corrispondente a una vasta gamma di scale di lunghezza dai vortici più grandi (scale di lunghezza integrale anisotropica) a quelli più piccoli (scale di lunghezza Kolmogorov isotropa).

I flussi turbolenti sono caratterizzati da campi di velocità turbolenti.

3.4.2.1 Il modello k-ε standard

Il modello a due equazioni k-ε è basato sulla scelta dell'energia cinetica turbolenta per unità di massa (k) e sul suo tasso di dissipazione (ε) come grandezze caratterizzanti la turbolenza. In sostanza k caratterizza l'intensità delle fluttuazioni turbolente ed ε caratterizza la loro scala spaziale.

L'energia cinetica turbolenta, k, e il suo tasso di dissipazione, ε, sono ricavate dalle seguenti equazioni di trasporto:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho k u_i = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon + S_k \quad (3.4)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (3.5)$$

In queste equazioni, G_k rappresenta la generazione di energia cinetica della turbolenza a causa della gradienti di velocità medio. C_1 , C_2 e C_3 sono costanti. σ_k e σ_ε sono i numeri di Prandtl rispettivamente per k e ε. S_k e S_ε sono termini di sorgente definiti dall'utente.

La viscosità turbolenta, μ_t , è calcolata combinando k ed ε come segue:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.6)$$

Dove C_μ è una costante.

Le costanti del modello C_1 , C_2 , C_μ , σ_k e σ_ε hanno di default i seguenti valori:

Tabella 3.1 Valori di default per le costanti del modello k-ε standard

Costanti del modello	Valori di default
$C_{1\varepsilon}$	1.44
$C_{2\varepsilon}$	1.92
C_μ	0.09
σ_k	1.0
σ_ε	1.3

Tali valori delle costanti sono stati ottenuti con una giudiziosa miscela di considerazioni asintotiche e confronti con risultati sperimentali o con soluzioni esatte per un vasto insieme di problemi.

Le condizioni al contorno per risolvere le equazioni del modello di tipo k-ε sono riportate nel paragrafo 3.5

3.4.2.2 Il modello k-ε realizable

Uno degli sviluppi più recente è il modello k-ε realizable.. Questo modello contiene una nuova equazione di trasporto per il tasso di dissipazione turbolenta. Inoltre, un coefficiente di criticità del modello, è espresso in funzione della portata media e dalle proprietà di turbolenza, piuttosto che presumere di essere costante come nel modello standard. Questo permette al modello di soddisfare certi vincoli matematiche su sollecitazioni normali, coerenti con la fisica della turbolenza .

Il modello di k-ε realizable è notevolmente migliore rispetto al modello k-ε standard per molte applicazioni, e può generalmente essere utilizzato per dare risposte che siano almeno altrettanto accurate.

Tale modello unisce il rapporto Boussinesq e la definizione di eddy viscosity al fine di ottenere la seguente espressione per lo sforzo normale di Reynolds in un flusso incomprimibile.

$$\overline{u^2} = \frac{2}{3}k - 2\nu_t \frac{\partial U}{\partial x} \quad (3.7)$$

Con l'equazione (3.7) per $\nu_t = \mu_t/\rho$ si ottiene il risultato che lo sforzo normale $\overline{u^2}$, che per definizione è una quantità positiva, diventa negativa, vale a dire, "non-realizable" quando lo sforzo è grande abbastanza per soddisfare:

$$\frac{k}{\varepsilon} \frac{\partial U}{\partial x} > \frac{1}{3C_\mu} \approx 3.7 \quad (3.8)$$

Allo stesso modo, si può anche dimostrare che la disuguaglianza di Schwarz per sforzi di taglio ($\overline{u_\alpha u_\beta}^2 \leq \overline{u_\alpha^2} \overline{u_\beta^2}$) può essere violata quando la velocità di deformazione media è di grandi dimensioni. Il modo più semplice per garantire la realizzabilità (positività di sforzi normali e di disuguaglianza Schwarz per sforzi di taglio) è quello di rendere C_μ variabile sensibilizzandolo al flusso medio (deformazione media) e alla turbolenza (k, ε).

La nozione di C_μ variabile è suggerita da diversi modellisti tra cui Reynolds, ed è ben suffragata da evidenze sperimentali.

Ad esempio, C_μ si trova a circa 0,09 nel livello inerziale sotto degli strati limite di equilibrio, e a 0,05 in un forte flusso di taglio omogeneo.

Il modello k-ε realizable per affrontare le carenze dei tradizionali modelli k-ε adotta:

- Una nuova formula per l' eddy-viscosity che coinvolge una variabile C_μ originariamente proposta da Reynolds

- Un nuovo modello di equazione per la dissipazione (ε) basato sull'equazione dinamica della media quadratica della fluttuazione vorticoso

Le equazioni di trasporti di k e ε per il modello k - ε realizable sono:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k \quad (3.9)$$

E

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\mu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\delta} G_b S_\varepsilon \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\mu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\delta} G_b S_\varepsilon \quad (3.11)$$

Dove

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (3.12)$$

E

$$\eta = \mathbf{S} \frac{\mathbf{k}}{\varepsilon} \quad (3.13)$$

In queste equazioni, G_k rappresenta la generazione di energia cinetica della turbolenza causata dal gradiente di velocità media. G_b è la generazione di energia cinetica della turbolenza causata dalla galleggiabilità. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, e $C_{3\varepsilon}$ sono costanti. σ_k e σ_ε sono i numeri di Prandtl turbolento rispettivamente per k e ε . S_k e S_ε sono termini definiti dall'utente.

Si noti che l'equazione di k è la stessa del modello k - ε standard fatta eccezione per le costanti del modello

Tuttavia la forma dell'equazione di ε è molto diversa da quelle standard. Una delle caratteristiche degne di nota è che il termine di produzione nell'equazione della ε (Il secondo termine sul lato destro della equazione (3.10) non contiene lo stesso termine G_k come nel modello standar. Si ritiene che il presente modulo rappresenti meglio il trasferimento spettrale di energia. Un'altra caratteristica desiderabile è che il termine di distruzione (il termine penultimo sul lato destro della equazione (3.10) non ha alcuna singolarità, cioè, il suo denominatore non si annulla mai anche se k svanisce o diventa minore di zero. Questa caratteristica

è in contrasto con i tradizionali modelli k-ε, che hanno una singolarità a causa del k al denominatore.

Questo modello è stato ampiamente convalidato per una vasta gamma di flussi. Come in altri modelli k-ε, la eddy-viscosity viene calcolato come segue:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.14)$$

La differenza tra il modello k-ε realizable e quello standard è che C_μ non è più costante ma è definito dall'equazione seguente:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (3.15)$$

Dove

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (3.16)$$

E

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (3.17)$$

$$\Omega_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (3.18)$$

dove, $\overline{\Omega_{ij}}$ è velocità media di rotazione del tensore visto in una cornice di riferimento che ruota con velocità angolare ω_k . Le costanti A_0 e A_s sono date da:

$$A_0 = 4.044, \quad A_s = \sqrt{6} \cos \varnothing$$

Dove

$$\varnothing = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W), \quad W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}}, \quad \tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

Si può notare che la C_μ è funzione: della tensione media dei tassi di rotazione, della velocità angolare di rotazione del sistema e dei i campi di turbolenza (k e ε).

Le costanti del modello C_2 , σ_k e σ_ε sono state istituite per garantire che il modello funzioni bene per determinati flussi canonici. Le costanti del modello sono elencate nella Tabella 3.2

Tabella 3.2 Valori di default delle costanti per il modello k-ε realizable

Costanti del modello	Valori di default
$C_{1\epsilon}$	1.44
C_2	1.9
σ_k	1.0
σ_ϵ	1.2

Il modello K-ε realizable è scelto per svolgere il seguente studio grazie alla sua capacità di prevedere la separazione del flusso.

3.5 Condizioni al contorno

3.5.1 Velocity Inlet

La condizione al contorno Velocity Inlet viene utilizzata per definire la velocità del flusso in ingresso e viene applicata all'ingresso (vedere Figura 3.13).

I valori delle condizioni della Velocity Inlet sono riportati nella Tabella 3.3:

Tabella 3.3 Condizioni al contorno Velocity Inlet

Properties	Default values	
Velocity Specification Method	Magnitude, Normal to Boundary	
Reference Frame	Absolute	
Velocity Magnitude (m/s)	30	Constant
Turbulence Specification Method	K and Epsilon	
Turb. Kinetic Energy (m ² /s ²)	1	Constant
Turb. Dissipation Rate	1	Constant

Una volta assegnata la condizione di Velocity Inlet è necessari controllare che il modello non sia posizionato troppo vicino all'ingresso perché ciò potrebbe causare la non uniformità del flusso. Quindi per questo studio il modello è stato posizionato ben lontano dall'ingresso in modo tale che il flusso sia completamente sviluppato prima di raggiungerlo.

La velocità è stata impostata a 30 m/s per tutti i casi analizzati di seguito.

3.5.2 Pressure Outlet

La condizione di Pressure Outlet, assegnata all'uscita (vedere Figura 3.13), impone una pressione statica costante all'uscita. Le condizioni della Pressure Outlet sono specificati nella Tabella 3.4:

Tabella 3.4 Condizioni al contorno Pressure Outlet

Properties	Default values	
Gauge Pressure (pascal)	0	Constant
Back Flow Direction Specification Method	Normal to Bounda	
Turbulence Specification Method	K and Epsilon	
Backflow Turb. Kinetic Energy (m2 /s2)	1	Constant
Backflow Turb. Dissipation Rate (m2 /s2)	1	Constant

I valori riportati nella tabella sopra sono quelli utilizzati per l'attuale studio. L'uscita è posizionata abbastanza lontano dal modello in modo tale che la scia posteriore sia completamente sviluppata e non si verifichino condizioni di ritorno del flusso.

3.5.3 Symmetry

La condizione Symmetry è assegnata alle pareti del dominio e impone una velocità normale $\vec{V}_N = 0$ m/s. Tale condizione si utilizza perché l'effetto parete deve essere evitato per avere un'analisi aerodinamica più realistica possibile. Tale condizione è assegnata ai lati e al soffitto del dominio (vedere Figura 3.13). Anche per le condizioni di Symmetry, i lati devono essere posizionati a una certa distanza dal modello per non influenzare i risultati, cioè permettendo al flusso laterale che contribuisce a formare i vortici C-pillar, nella parte posteriore dell'Ahmed Body, di svilupparsi correttamente.

3.5.4 Wall

Al veicolo e al terreno è assegnata la condizione di Wall no-slip (vedere Figura 3.13), che assegna velocità nulla del fluido sulle pareti. Tale condizione è utilizzata per limitare regioni solide. Nella scelta del modello viscoso la condizione di no-slip viene assegnata di default. Tale condizione è utilizzata anche per lo studio attuale.

3.5.5 Material

Il fluido che scorre all'interno del dominio è aria. Le sue proprietà sono prese a temperatura ambiente. A tale temperatura si hanno i seguenti valori, considerati costanti,:

- Viscosità = $1.7894e^{-05}$ Kg/ms
- Densità = $1,225$ kg/m³

4 Risultati CFD e Discussione

Anche se il flusso è tridimensionale, sulla scia di un Ahmed Body, l'analisi 2D è svolta per comprendere inizialmente, nel caso di un corpo isolato, come variano le forze al variare della geometria posteriore del modello Ahmed. L'angolo posteriore viene fatto variare da 0 a 40° con un passo di 5°.

In seguito è stata svolta un'analisi con due Ahmed Body, con angolo d'inclinazione pari a 30°, posti in tandem, per studiare gli effetti sul coefficiente aerodinamico ($C_D = F_D / (\frac{1}{2} \rho V^2 A)$) dei due corpi variando lo spazio tra i due veicoli (x/L).

L'analisi 2D è seguita poi da una in 3 dimensioni, per analizzare una struttura del flusso più realistica. Come per l'analisi a due dimensioni in quella a 3 dimensioni si è studiato prima l'Ahmed Body isolato, variando l'angolo della geometria posteriore da 0 a 40° con passo di 5°. I risultati ottenuti dall'Analisi CFD sono poi confrontati con quelli sperimentali di Ahmed et.al. (1984) [8].

Successivamente viene studiato il caso di due Ahmed Body, con angolo posteriore pari a 30°, posti in tandem per analizzare gli effetti sul coefficiente aerodinamico dei due corpi al variare dello spazio inter-veicolare.

Un ulteriore studio è svolto su più Ahmed Body posti in tandem (con $\alpha = 0^\circ$ e 30°) considerando sei corpi in fila (per rappresentare gli effetti osservati in un plotone infinitamente lungo) per osservare l'influenza di tali configurazione sul coefficiente di resistenza aerodinamica.

Un ultimo studio è stato svolto considerando quattro diverse geometrie semplificate di veicolo. In questo caso si è prima studiato il modello isolato e poi sono state generate diverse composizioni di platoon per valutare l'influenza delle varie configurazioni sul coefficiente del drag dei vari veicoli.

4.1 Flusso e forze di drag sull'Ahmed Body

Il modello di turbolenza scelto per svolgere l'analisi è il k-ε realizable. Le condizioni d'ingresso e uscita sono rispettivamente la velocity all'ingresso e la pressione all'uscita, ai lati e al soffitto è assegnata la condizione di symmetry, mentre all'Ahmed Body e al terreno viene assegnata quella di velocità nulla.

I comportamenti del flusso, ottenuto dalla simulazione numerica sia bidimensionale che in quella tridimensionali, sono presentati nella sezione sottostante.

4.1.1 Modello a due dimensioni

4.1.1.1 Un Ahmed Body

L'analisi 2D, inizialmente, è svolta su un Ahmed Body isolato, anche se la struttura del flusso è fortemente tridimensionale. Tale studio preliminare è svolto per comprendere l'influenza dell'inclinazione della geometria posteriore sulla scia e come questa influenzi il coefficiente di resistenza aerodinamica.

Lo studio procede facendo variare l'angolo posteriore tra 0 e 40° con passo di 5°, permettendo così di individuare gli angoli critici cioè quelli che generano cambiamenti significativi nella struttura del flusso della scia e quindi variazioni del coefficiente di resistenza aerodinamica (C_D).

Gli effetti dell'angolo d'inclinazione della geometria posteriore sul coefficiente di resistenza sono mostrati in Figura 4.1:

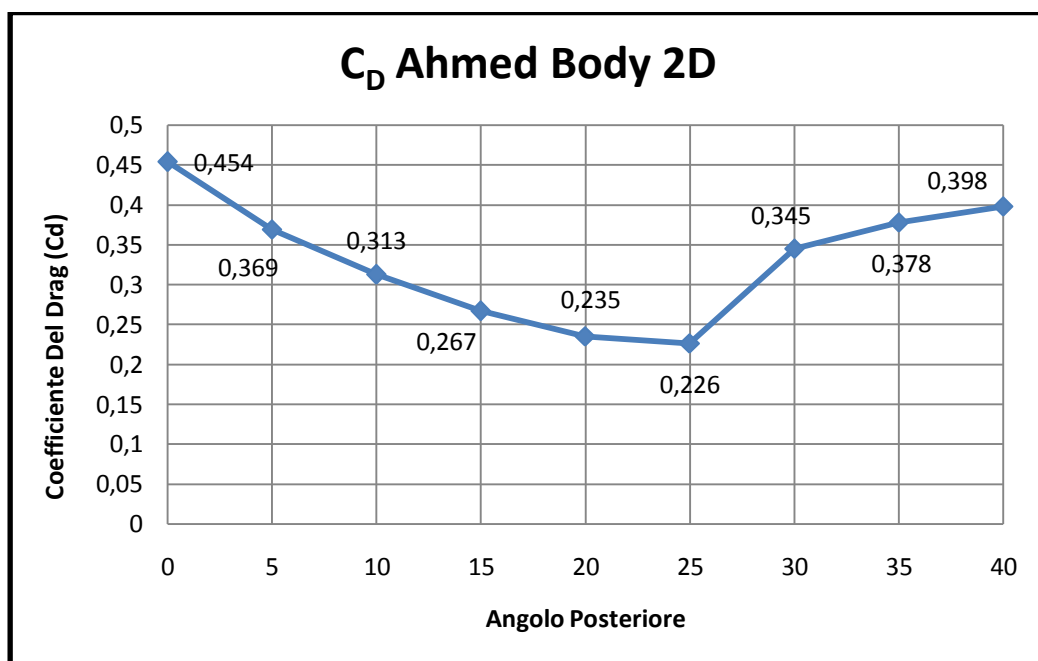


Figura 4.1 Effetto dell'angolo posteriore sul C_D per Ahmed Body 2D

Da tale analisi emerge che il C_D più elevato, pari a 0,45, si ottiene in corrispondenza di un angolo posteriore di 0°. Il coefficiente di resistenza ha poi un andamento decrescente fino a 25°, pari a 0,226, punto in cui la curva inizia un andamento crescente raggiungendo il valore di 0,398 per un angolo d'inclinazione posteriore pari a 40°.

La configurazione dell'Ahmed Body a 0° è mostrata in Figura 4.2. Da tale immagine è possibile osservare come il flusso dopo aver raggiunto la parte anteriore, rimani attaccato al corpo e separi alla fine del tagliente posteriore, formando una grande area di ricircolo. Ciò comporta una diminuzione delle pressione di base, come mostrato in Figura 4.3, che costituisce la principale causa dell'elevato coefficiente di drag.

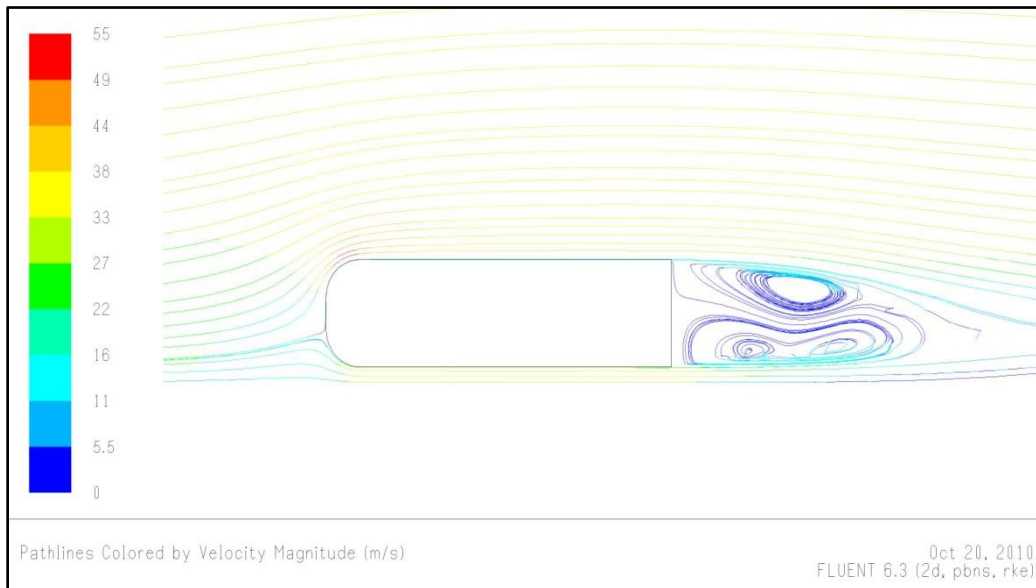


Figura 4.2 Linee di velocità dell'Ahmed Body con $\alpha = 0^\circ$



Figura 4.3 Contorno di pressione dell'Ahmed Body con $\alpha = 0^\circ$

Le configurazioni con angolo posteriore di 5° e 10° hanno un andamento del flusso simile a quello di 0° ad eccezione del fatto che si verifica una riduzione

del coefficiente di drag. Ciò è dovuto al fatto che nella parte posteriore la regione di ricircolo è più piccola come mostrato in Figura 4.4.

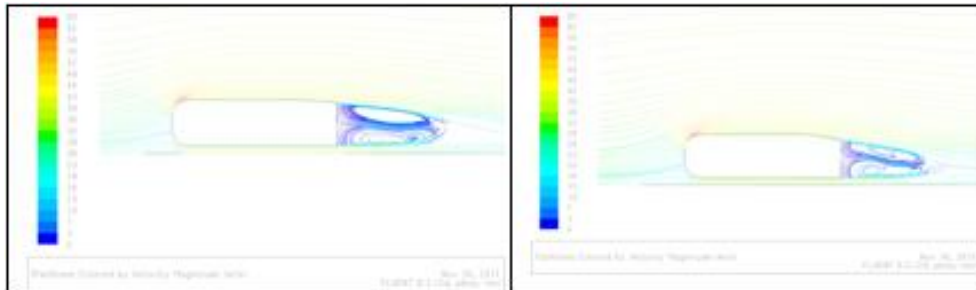


Figura 4.4 Linee di velocità dell'Ahmed Body con α uguale a 5 e 10°

Le configurazioni con angolo posteriore di 15 e 20° mostrano una notevole riduzione della regione di ricircolo ciò comporta un migliore recupero della pressione di base e quindi una riduzione del coefficiente di resistenza.

La configurazione dell'Ahmed Body con angolo d'inclinazione posteriore pari a 25° è quella con coefficiente aerodinamico minore tra le varie configurazioni 2D. Con tale angolo posteriore la regione di ricircolo è fortemente ridotta come mostrato in Figura 4.5

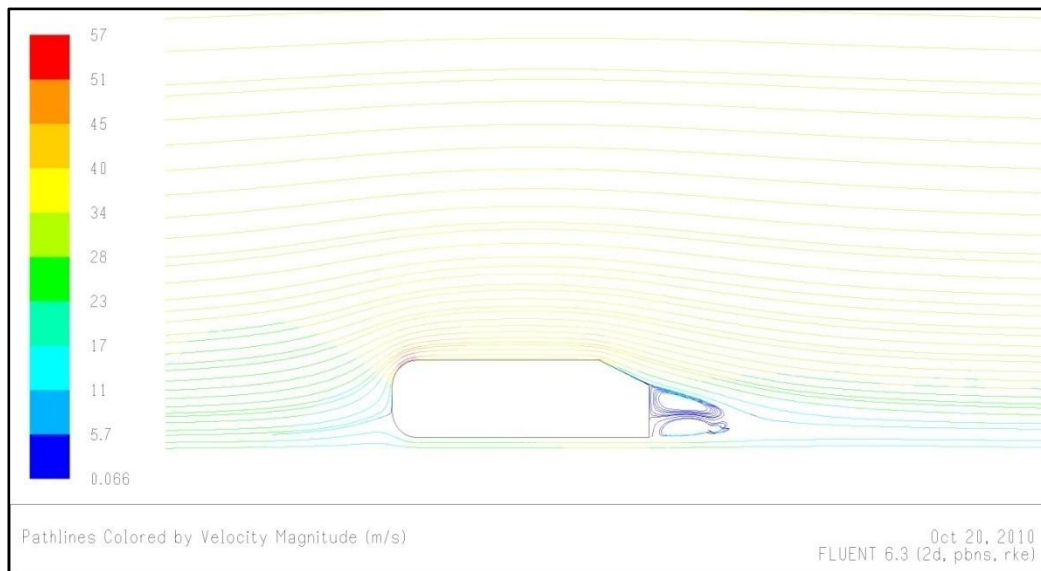


Figura 4.5 Linee di velocità dell'Ahmed Body con $\alpha = 25^\circ$

La riduzione della regione di ricircolo contribuisce a migliorare il recupero di pressione riducendo il coefficiente di resistenza, come mostrato in Figura 4.6.

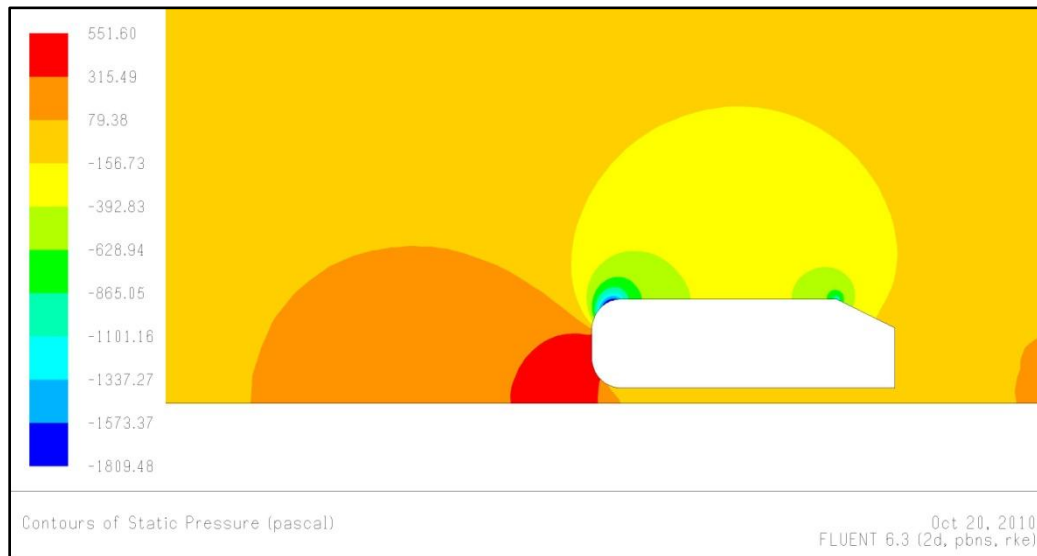


Figura 4.6 Contorno di pressione dell'Ahmed Body con $\alpha = 25^\circ$

In oltre tra tutte le configurazioni 2D analizzate, in questo studio, quella a 25° risulta essere quella con il recupero di pressione più elevato.

Il coefficiente di resistenza incomincia ad aumentare immediatamente se dalla configurazione critica, con angolo posteriore pari a 25° , si incrementa o decrementa l'inclinazione di 5° .

Un aumento dell'angolo posteriore contribuisce ad un aumento del coefficiente di resistenza come osservato per le configurazioni di 30° , 35° e 40° .

Nella configurazione con angolo posteriore di 30° si verifica un forte aumento del coefficiente aerodinamico poiché si ha il distacco del fluido all'inizio del tagliente posteriore come mostrato in Figura 4.7. Ciò comporta un aumento della regione di ricircolo che causa una perdita di pressione come mostrato in Figura 4.8.

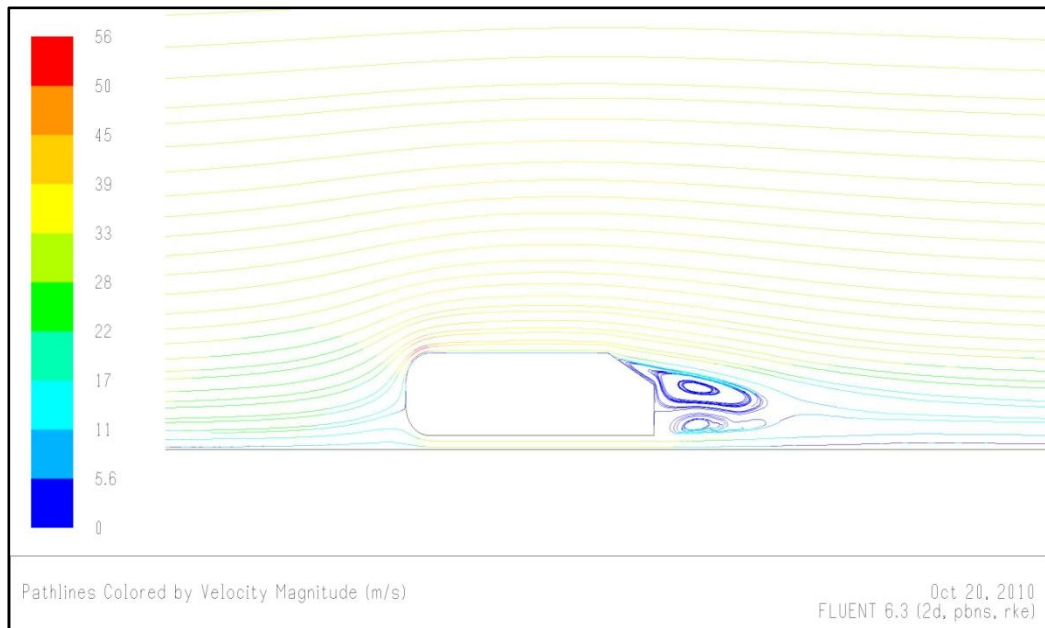


Figura 4.7 Figura 2.4 Linee di velocità dell'Ahmed Body con $\alpha = 30^\circ$

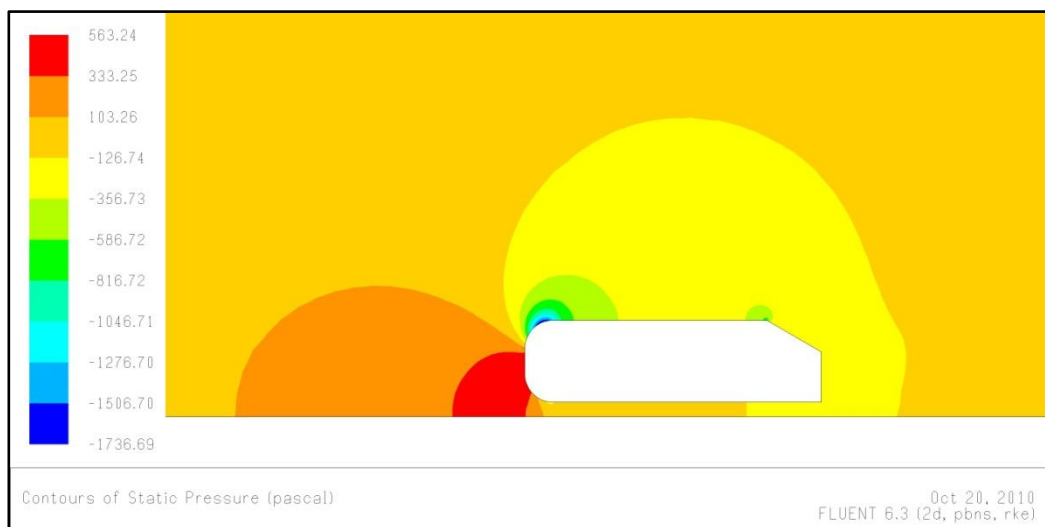


Figura 4.8 Contorno di pressione dell'Ahmed Body con $\alpha = 30^\circ$

Gli effetti dovuti a una inclinazione di 40° sono mostrati nella Figura 4.9 e nella Figura 4.10. La struttura del flusso incomincia a comportarsi come per quelle osservate per angoli d'inclinazione posteriore compresi tra 0 e 15° . Il flusso che nella configurazione con angolo posteriore pari a 25° rimane attaccato quasi lungo tutto il tagliente posteriore in quella con angolo pari a 40° inizia a staccarsi all'inizio del bordo posteriore (simile alla configurazione con angolo posteriore pari a 30°).

Dopo l'angolo di 25° il vortice superiore inizia ad estendersi causando un aumento della regione di ricircolo che a sua volta comporta un aumento della caduta di pressione. Tutto ciò ha come effetto finale l'aumento del coefficiente di resistenza aerodinamica.

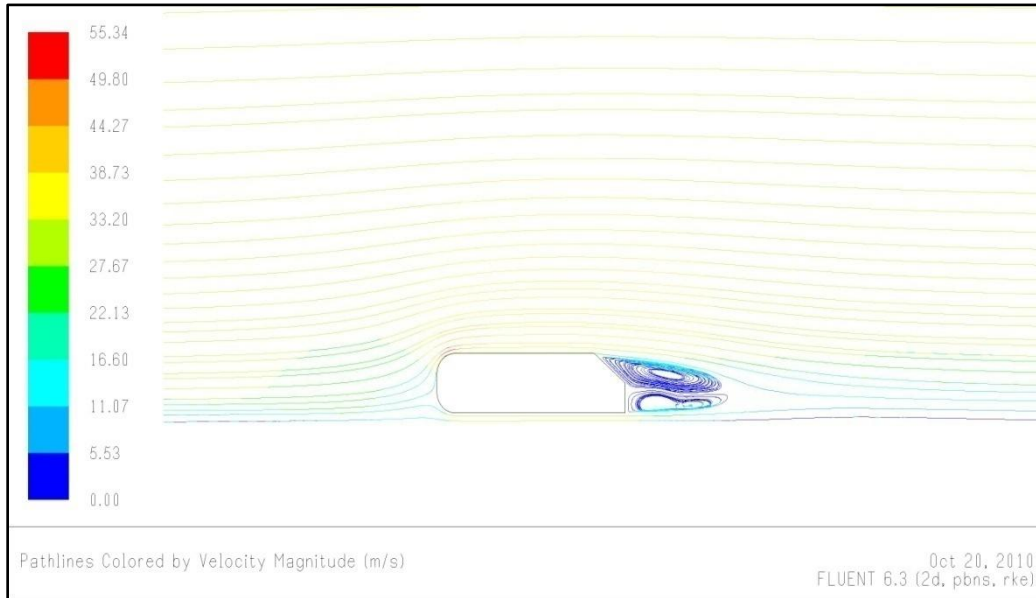


Figura 4.9 Linee di velocità dell'Ahmed Body con $\alpha = 40^\circ$

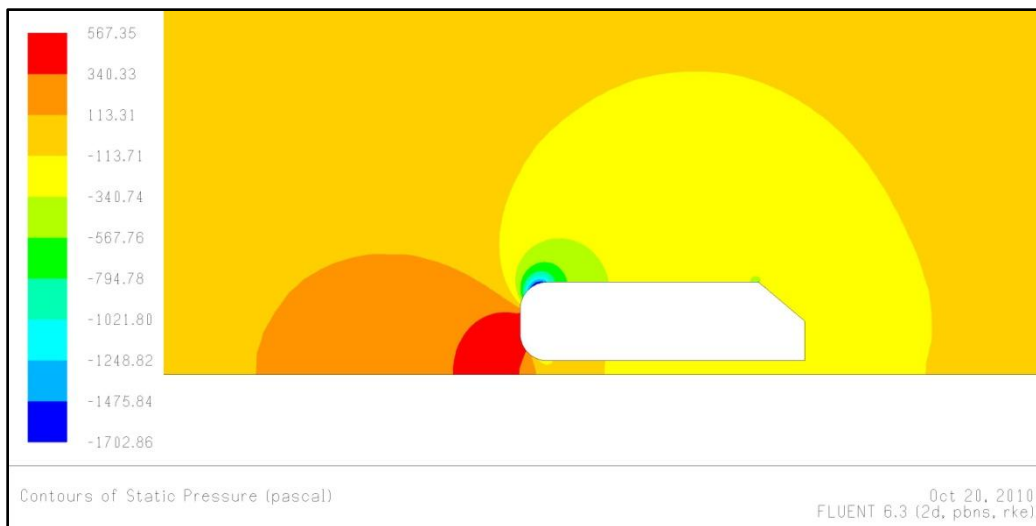


Figura 4.10 Contorno di pressione dell'Ahmed Body con $\alpha = 40^\circ$

4.1.1.2 Due Ahmed Body in tandem

L'analisi 2D viene utilizzata anche per analizzare configurazioni in tandem, in modo tale da avere una visione iniziale sul comportamento della struttura del flusso e gli effetti della spaziatura inter-veicolare sul coefficiente di resistenza aerodinamica. La configurazione con angolo posteriore di 30° è quella considerata per tale analisi. Due modellini uguali sono stati posti in tandem uno dietro l'altro. La spaziatura inter-veicolare viene fatta variare rispetto la lunghezza dell'Ahmed Body, paria 1,044 m. Per tale studio lo spazio tra i due corpi viene fatto variare tra $x/L=0,25$ fino a $x/L=5$.

I risultati ottenuti sono riportati nella Figura 4.11

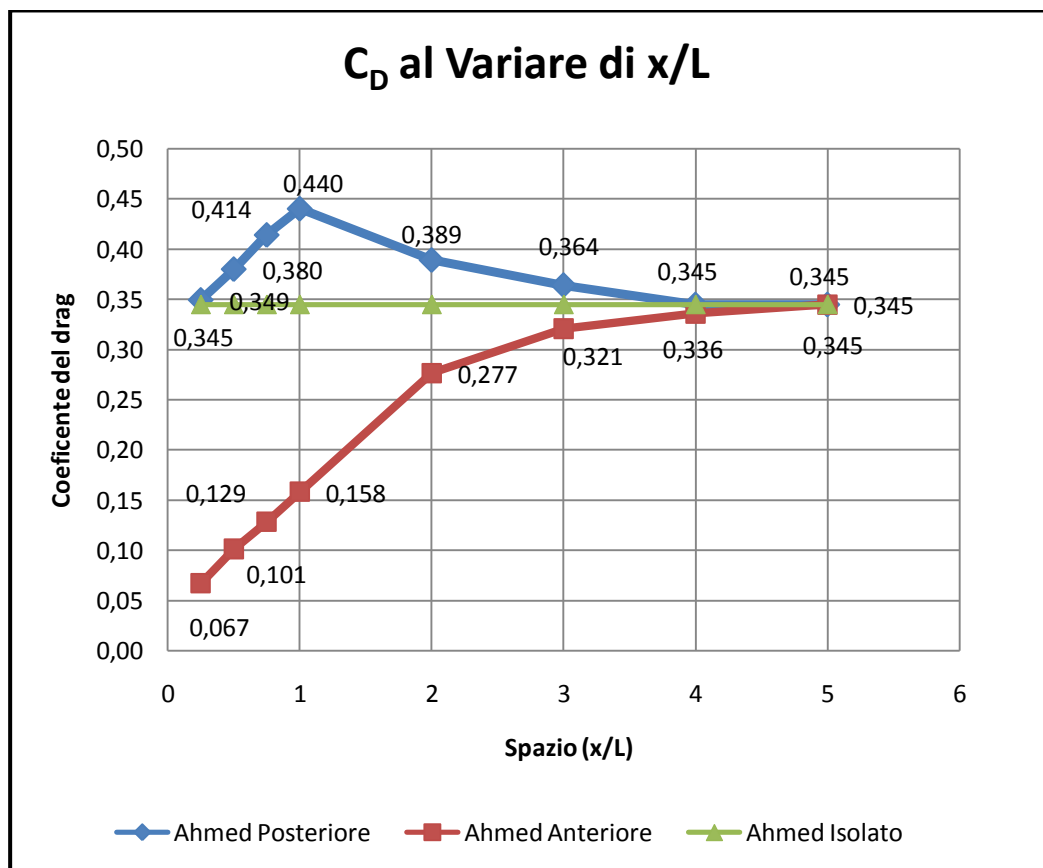


Figura 4.11 Effetti dello spazio inter-veicolare sul C_D

La Figura 4.11 mostra che per spazi inter-veicolari molto ridotti il coefficiente di resistenza aerodinamica del veicolo anteriore si riduce notevolmente ed è molto più piccolo rispetto a quello del veicolo posteriore.

Tale effetto è dovuto alla presenza di un altro veicolo nella sua scia che aumenta la pressione di base del veicolo guida riducendone il suo coefficiente di resistenza aerodinamica.

Il flusso che si separa dal bordo posteriore del veicolo guida genera un flusso di urto sulla parte anteriore del veicolo che lo precede, come mostrato in Figura 4.12. Tale fenomeno genera un aumento del coefficiente aerodinamico sull'Ahmed Body posteriore.

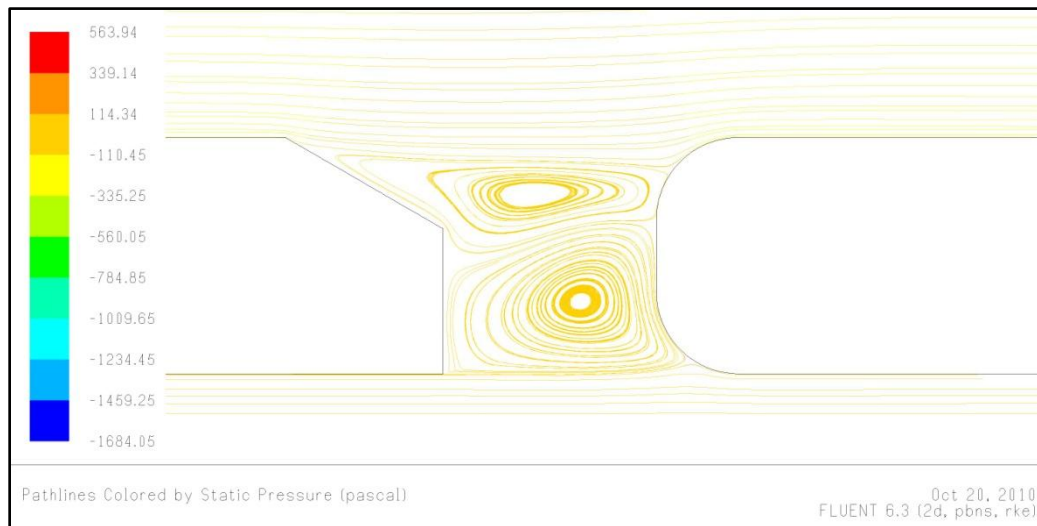


Figura 4.12 Linee di velocità colorate per pressione per una distanza $x/L = 0,25$

Il modello di guida mantiene un coefficiente di resistenza aerodinamica inferiore al veicolo isolato fino a $x/L=5$ mentre quello posteriore mantiene valori superiori a quello isolato fino a $x/L=4$. Il motivo di tale fenomeno potrebbe essere che il recupero di pressione è maggiore per il veicolo anteriore rispetto a quello posteriore.

A una distanza $x/L = 1$ il coefficiente di resistenza aerodinamica (C_D) del veicolo posteriore raggiunge il valore massimo.

Il veicolo guida ha registrato, da $x/L=0,25$, un andamento del C_D crescente mentre quello dell'Ahmed Body posteriore segue un andamento diverso: aumenta fino a una distanza $x/L=1$ dopo di che inizia un a decrescere fino ad assestarsi sul valore del veicolo isolato.

Con $x/L= 2$ i due Ahmed Body iniziano a comportarsi come due veicoli isolati (Figura 4.13 spaziatura $x/L=5$) La scia mostrata nella è molto simile a quella del veicolo isolato.

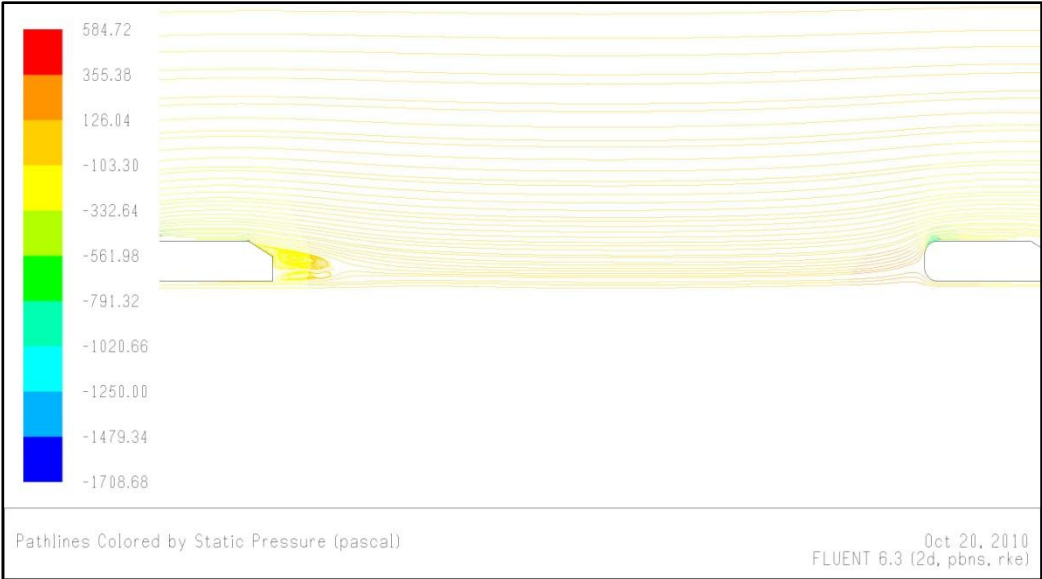


Figura 4.13 Linee velocità colorate per pressione a una distanza $x/L = 5$

4.1.2 Analisi tridimensionale

4.1.2.1 Ahmed Body isolato

L'analisi tridimensionale sull'Ahmed Body isolato è svolta per comprendere l'influenza dell'angolo della geometria posteriore (α) sul coefficiente di resistenza aerodinamica. Dopo le prove di Ahmed et.al (1984) [8] e Johnson et.al. (2004)[26] il modello di Ahmed è stato classificato in tre diversi regimi a seconda della struttura del flusso della scia generata dalla geometria posteriore. I tre differenti regimi sono:

- Regime attaccato a bassa resistenza
- Regime ad alta resistenza
- Regime separato a bassa resistenza.

Nel regime “Attaccato”, il flusso rimane collegato al corpo lungo tutta l'inclinazione posteriore dell'Ahmed Body. In tale regime il coefficiente di resistenza aerodinamica rimane pressoché costante.

Tale regime esiste per α che va da 0° a $12,5^\circ$, dove il flusso rimane attaccato al tagliente posteriore senza permettere di distinguere la formazioni dei vortici C-pillar come mostrato nella Figura 4.14:

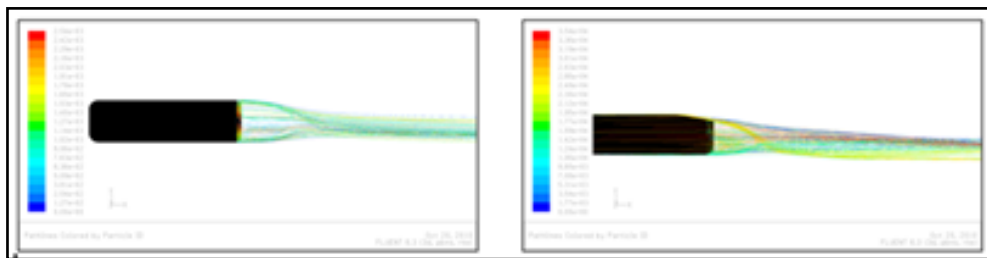


Figura 4.14 Struttura del flusso di scia $\alpha = 0^\circ$ e 10° (vista laterale)

Nel regime alta resistenza, vi è un forte aumento del coefficiente di resistenza aerodinamica dovuto principalmente alla presenza dei vortici controrotanti C-pillar, ricchi di energia cinetica come mostrato nella Figura 4.15 per $\alpha=30^\circ$.

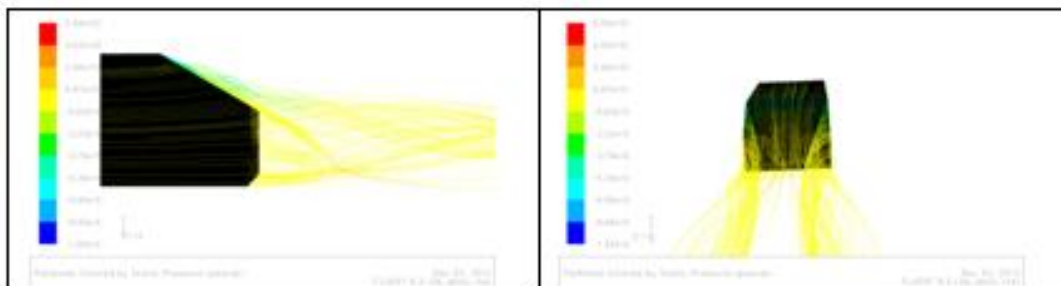


Figura 4.15 Configurazione con elevato coefficiente del drag - Angolo critico 30° (linee di flusso colorate per pressione)

Questi vortici riducono la pressione di base aumentando la resistenza del corpo dovuta alla pressione e quindi il coefficiente di resistenza aerodinamica. Tale regime si caratterizza anche per la presenza di una bolla di separazione sul tagliente posteriore. La dimensione di tale bolla cresce di dimensioni da $\alpha=12,5^\circ$ a 30° dopodiché si rompe ed il flusso è completamente separato.

L'angolo d'inclinazione posteriore pari a 30° è considerato come il più critico per l'Ahmed Body poiché sia un aumento che una diminuzione dell'inclinazione comportano una forte riduzione del coefficiente di drag. Anche la bolla di separazione raggiunge la sua dimensione massima per $\alpha=30^\circ$ che è una delle ragioni principali dell'elevato coefficiente di resistenza aerodinamica.

Infine nel regime separato, a bassa resistenza, la bolla di separazione nella zona posteriore non esiste più e il flusso si separa direttamente all'inizio dal bordo del tagliente facendo sì che i vortici C-pillar abbiano una potenza molto ridotta. Ciò genera una diminuzione del coefficiente di resistenza aerodinamica. Tale regime esiste per angoli d'inclinazione maggiori di 30° .

L'effetto dell'angolo d'inclinazione sul coefficiente di resistenza aerodinamica è mostrato in Figura 4.16 dove sono riportati sia i dati sperimentali (Ahmed et.al. (1984)) che quelli ottenuti dall'analisi CFD

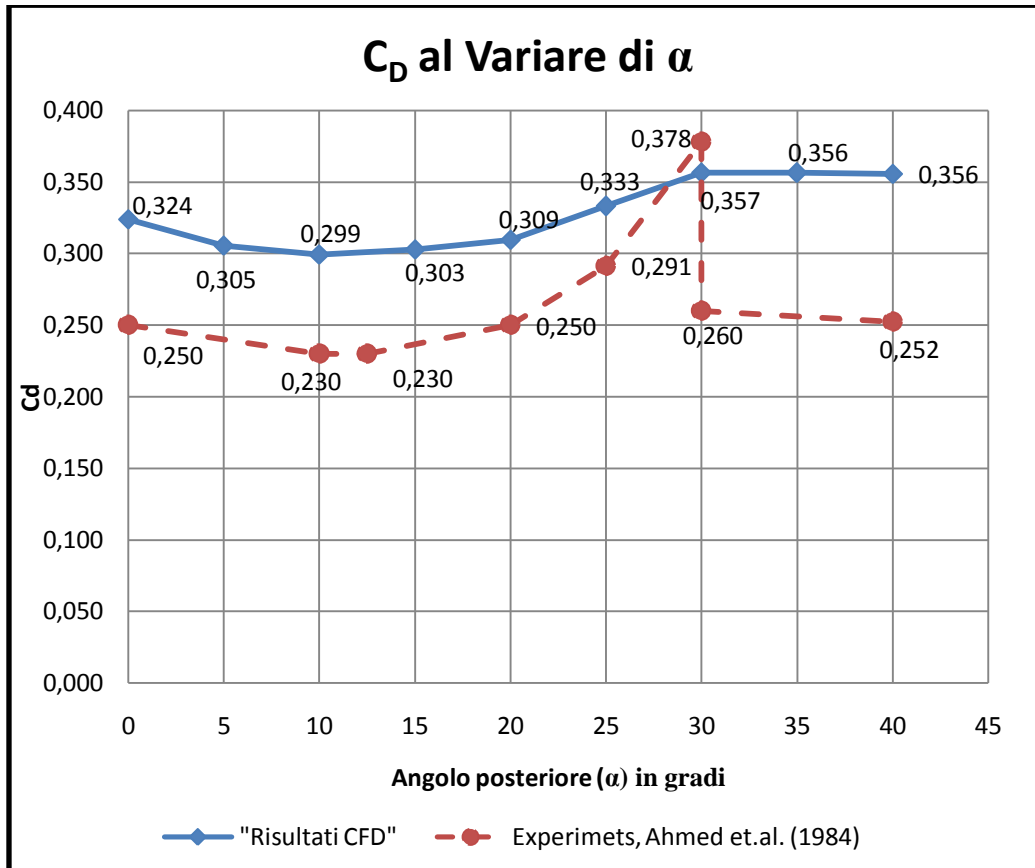


Figura 4.16 Effetto dell'angolo α sul coefficiente di resistenza aerodinamica (Ahmed Body 3D).

La Figura 4.16 mostra la variazione del coefficiente di drag al variare di α . In tale immagine si nota; l'andamento discendente per $0^\circ \leq \alpha \leq 12,5^\circ$ (regime attaccato a bassa resistenza), l'andamento crescente per $12,5 \leq \alpha < 30^\circ$ (regime ad alta resistenza) e l'andamento decrescente per $30 \leq \alpha < 40$ (regime separato a bassa resistenza).

I risultati ottenuti dall'analisi CFD sono superiori rispetto a quelli sperimentali ma una tendenza simile è stata individuata anche negli studi svolti da Gilliéron e Chometon (1999) [2]. Per l'angolo critico di 30° la previsione del coefficiente di resistenza aerodinamica è più accurato rispetto a quella sugli altri angoli di inclinazione. Dall'analisi CFD si ottiene un coefficiente di drag pari a 0,357 contro lo 0,378 ottenuto sperimentalmente quindi un errore del 5,5%. Tuttavia, quando i risultati CFD sono confrontati con il valore inferiore, dell'angolo di 30° ; pari a 0,260, vi è una differenza significativa, che potrebbe essere dovuto alla bidimensionalità del modello di turbolenza k- ϵ .

Il divario che si genera, nel caso di $\alpha > 30^\circ$, tra prove sperimentali e quelle numeriche, è dovuto al fatto che in quelle numeriche la bolla di separazione

nella parte posteriore non scompare definitivamente come nel caso sperimentale in quanto il flusso non si separa completamente

4.1.2.2 Due Modelli in tandem

In questa parte dello studio si sono considerati due Ahmed Body, con la geometria posteriore inclinata di 30° , posti in fila. Lo scopo di tale studio è analizzare l'influenza della spaziatura inter-veicolare (x/L) sul coefficiente di resistenza aerodinamica dei due corpi. La spaziatura inter-veicolare è variata rispetto la lunghezza dell'Ahmed Body ($L=1,004\text{m}$) e varia tra 0,25 e 5 volte la lunghezze del modello.

I risultati ottenuti dall'analisi CFD sono mostrati nella Figura 4.17.

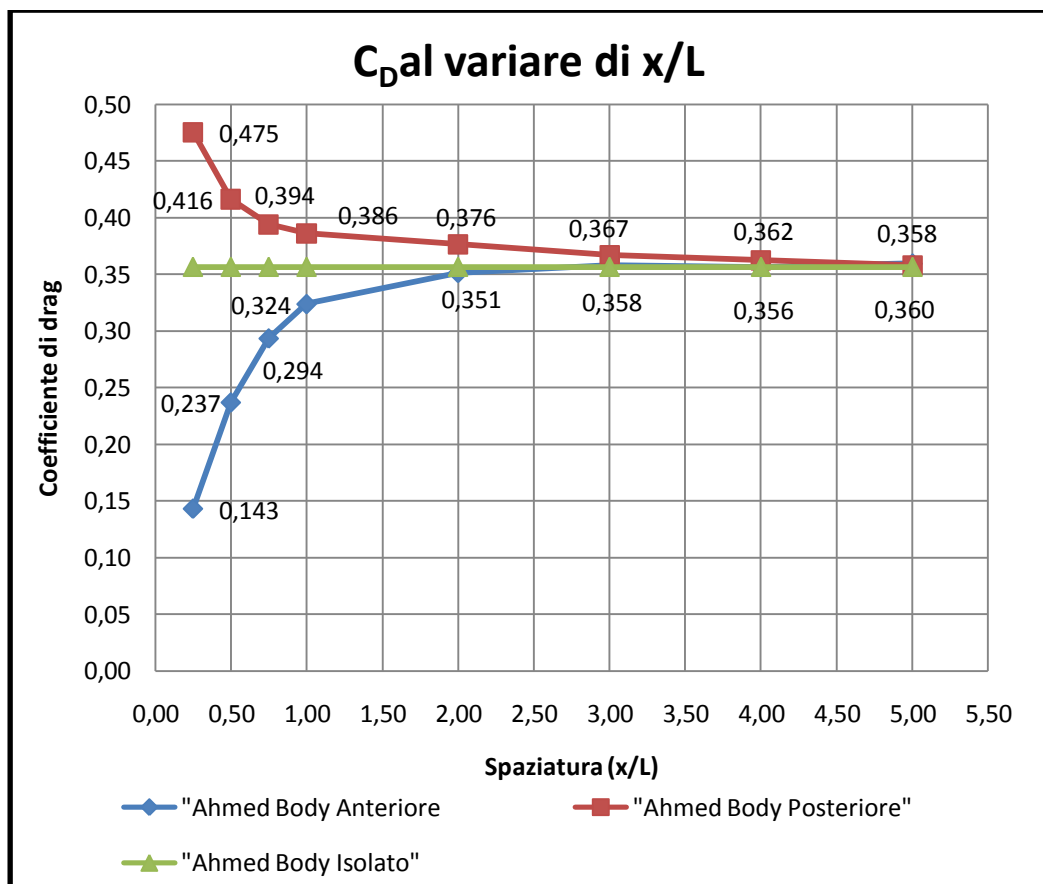


Figura 4.17 Andamento del coefficiente di resistenza aerodinamica al variare della spaziatura inter-veicolare per due Ahmed Body con $\alpha=30^\circ$

A distanza ravvicinata, $0,25 \leq x/L \leq 1$, la spaziatura è incrementata di $0,25L$ mentre per distanze maggiori viene incrementata di $1L$ fino a una distanza di $5L$.

Veicolo Anteriore:

Dall'analisi CFD, per $x/L=0,25$, si ha un riduzione del coefficiente di resistenza aerodinamica del veicolo guida del 60% rispetto al modello isolato. Il motivo principale di tale riduzione del C_D nel modello guida è dovuta al fatto che a tale distanza i vortici C-pillar non esistono per la presenza del veicolo posteriore nella sua scia. L'Ahmed Body posteriore rompe questi vortici, ricchi di energia cinetica, aumentando la pressione di base del modello guida.

La riduzione del coefficiente di drag sul veicolo guida si manifesta fino a una spaziatura inter-veicolare di $x/L=2$, cioè finché sente l'influenza del veicolo posteriore nelle vicinanze della sua scia. Il principale motivo è dovuta al fatto che il veicolo posto dietro genera un incremento di pressione nella parte posteriore del veicolo guida che lo spinge nella direzione di marcia riducendo così la forza di resistenza aerodinamica.

Veicolo Posteriore:

Lo studio evidenzia come l'andamento delle forze sul veicolo posteriore sia contrario a quello del veicolo guida perché il suo coefficiente di resistenza aerodinamica è superiore a quello di un modello isolato. La ragione di tale aumento è dovuta alla formazione dai vortici controrotanti generata dall'inclinazione posteriore del veicolo guida, come mostrato in Figura 4.18 e Figura 4.19 che impattano sulla superficie frontale del secondo veicolo.

Il lavoro di Azim e Gawad (2000) [9] suggerisce che nella regione di spazio, $0,25 \leq x/L \leq 1$, si genera un flusso denominato "vortice d'impigement". Tale flusso ha una forte energia cinetica che si scarica sulla parte frontale del veicolo posteriore incrementandone il suo coefficiente di resistenza aerodinamica.

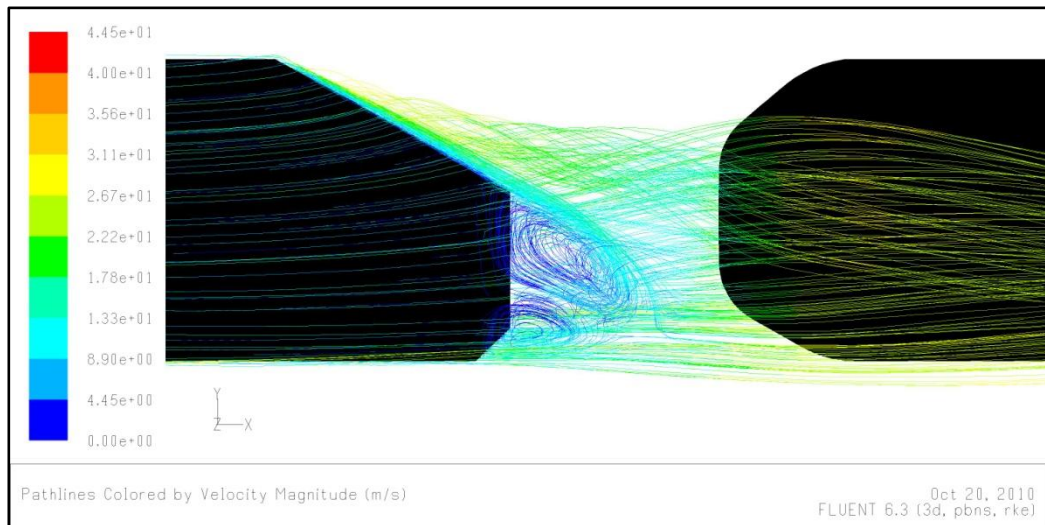


Figura 4.18 Linee di flusso del veicolo guida colorate per velocità a una distanza $x/L = 0,25$.

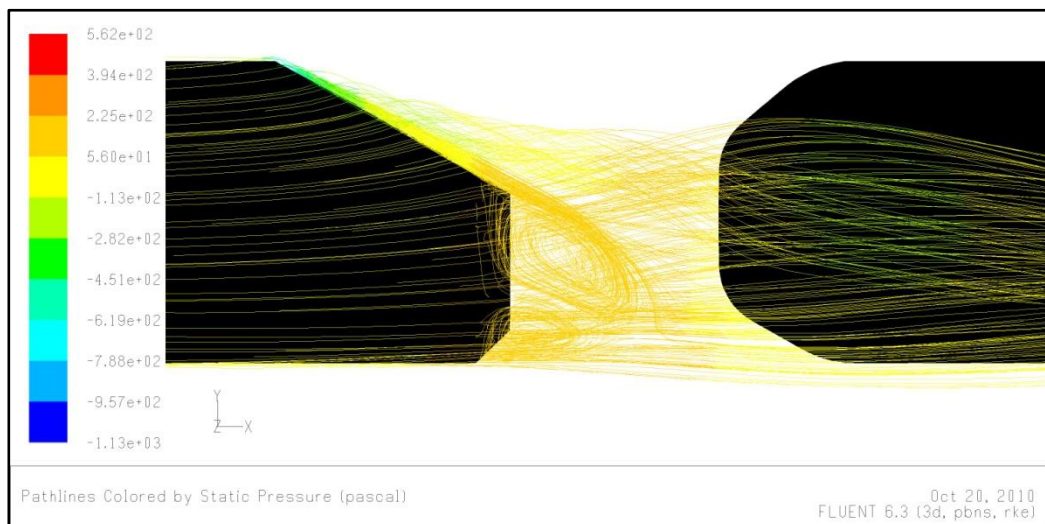


Figura 4.19 Linee di flusso del veicolo guida colorate per pressione a una distanza $x/L = 0,25$.

Per distanze piccole, $x/L = 0,25$, il coefficiente del drag è pari a 0,475. Dall'analisi inoltre emerge che, anche aumentando la distanza tra i veicoli, il coefficiente di resistenza aerodinamica del veicolo posteriore rimane sempre maggiore di quello isolato fino a una spaziatura di $x/L = 4$

4.1.2.3 Sei modelli in tandem

Lo studio prosegue analizzando sei Ahmed Body in Tandem. Dopo aver analizzato fino a 7 Ahmed Body (con $\alpha=30^\circ$) posti a $x/L = 0.25$ è emerso che considerando sei modelli in tandem è possibile simulare gli effetti su un plotone di veicoli infinitamente lungo.

Il coefficiente di drag viene misurato su tutti i veicoli.

L'effetto del numero di veicoli posti in tandem sul coefficiente del drag è illustrato nella Figura 4.20. Da tale immagine si può notare come sia nel caso di 5, 6 e 7 modelli in tandem i coefficienti di resistenza aerodinamica dei penultimi veicoli siano praticamente identici. Tali risultati hanno portato a scegliere la configurazione con 6 veicoli in fila per simulare gli effetti sul coefficiente di resistenza aerodinamica di una fila infinitamente lunga di veicoli.

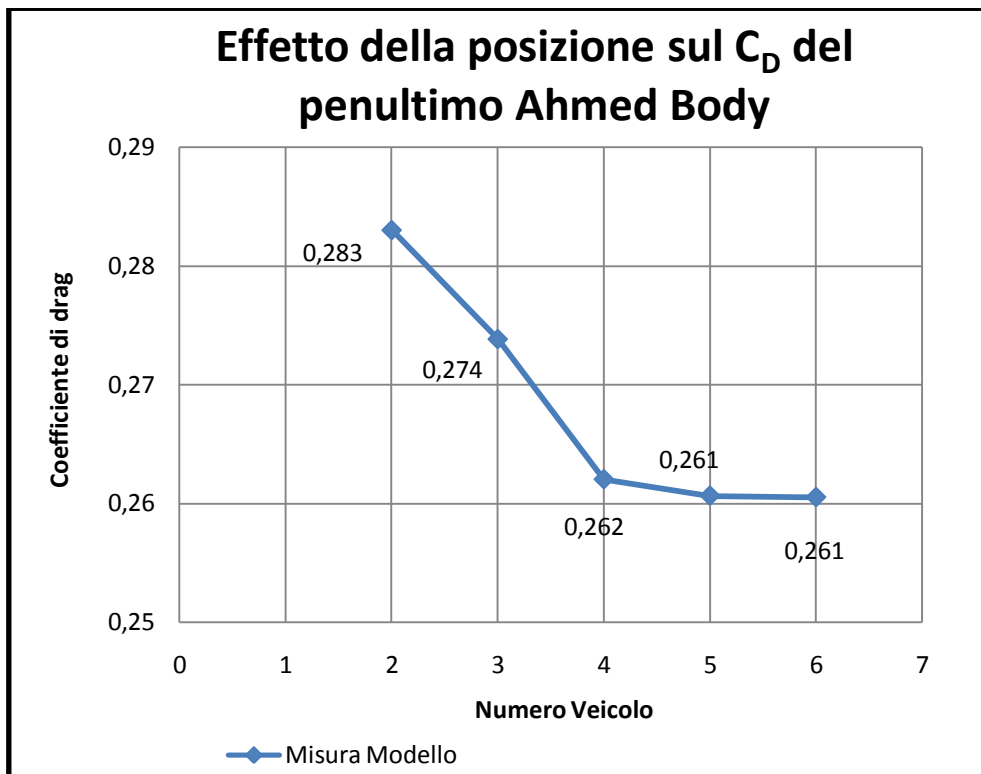


Figura 4.20 Coefficiente di resistenza aerodinamica del penultimo veicolo al variare del numero di Ahmed Body posti in Tandem ($x/L = 0,25$ e $\alpha=30^\circ$)

La velocità di prova è di 30 m/s e la spaziatura inter-veicolare varia tra $0,25L$ e $6L$.

Le prove sono state effettuate per due inclinazioni della geometria posteriore: 0° e 30° . Si sono scelte tali configurazioni per studiare gli effetti della spaziatura

sul coefficiente di resistenza aerodinamica nel caso di una configurazione non critica (senza vortici longitudinali controrotanti) e una critica (con vortici longitudinali controrotanti)

La posizione degli Ahmed Body in platoon è mostrata nella Figura 4.21

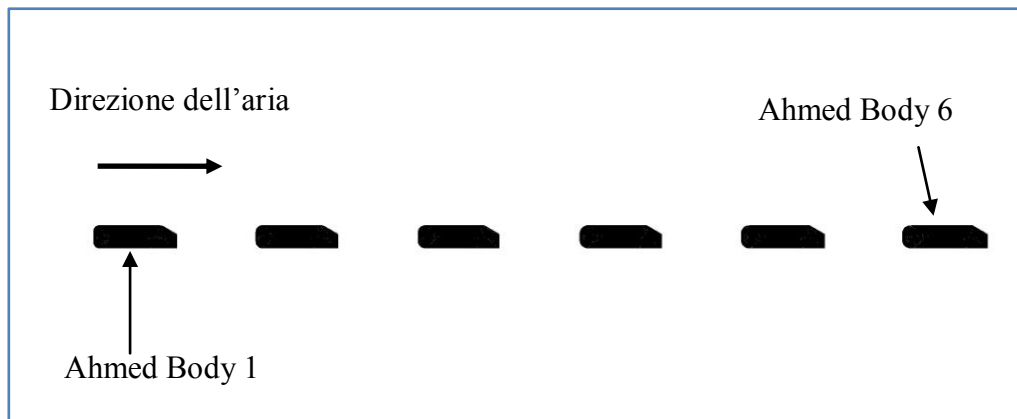


Figura 4.21 Sei Ahmed Body in platoon.

Nella Figura 4.22 è riportato l'andamento del coefficiente di resistenza aerodinamica dei sei Ahmed Body con $\alpha=0^\circ$ al variare della spaziatura inter-veicolare. L'immagine mostra che aumentando la distanza aumenta il C_D di tutti i modelli.

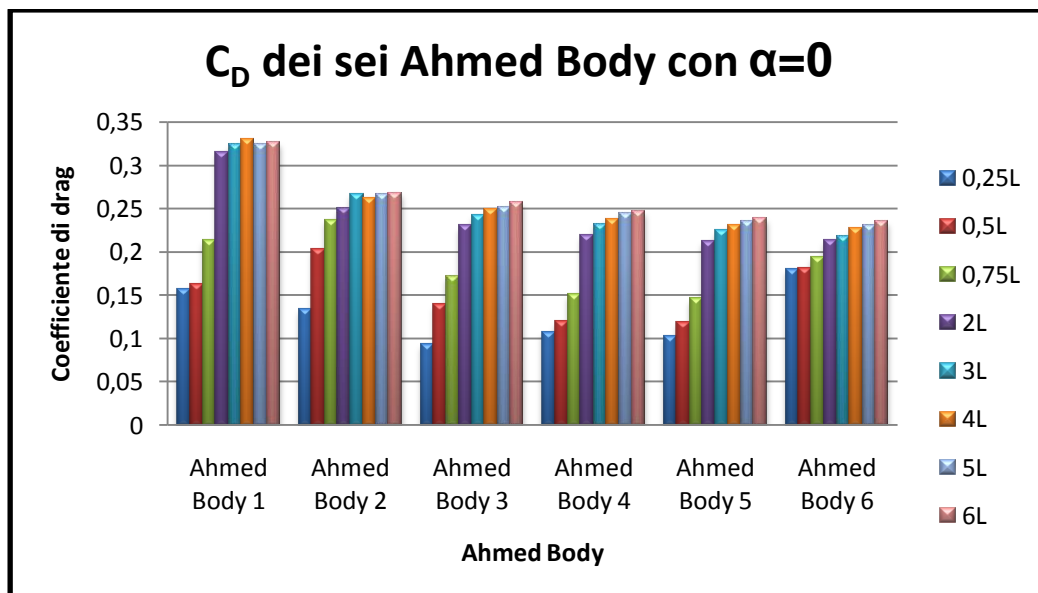


Figura 4.22 Andamento del C_D per sei Ahmed Body con $\alpha=0^\circ$

Nella Figura 4.23 sono riportati i valori del coefficiente di resistenza aerodinamica medio al variare della spaziatura per sei Ahmed Body con inclinazione posteriore pari a 0° .

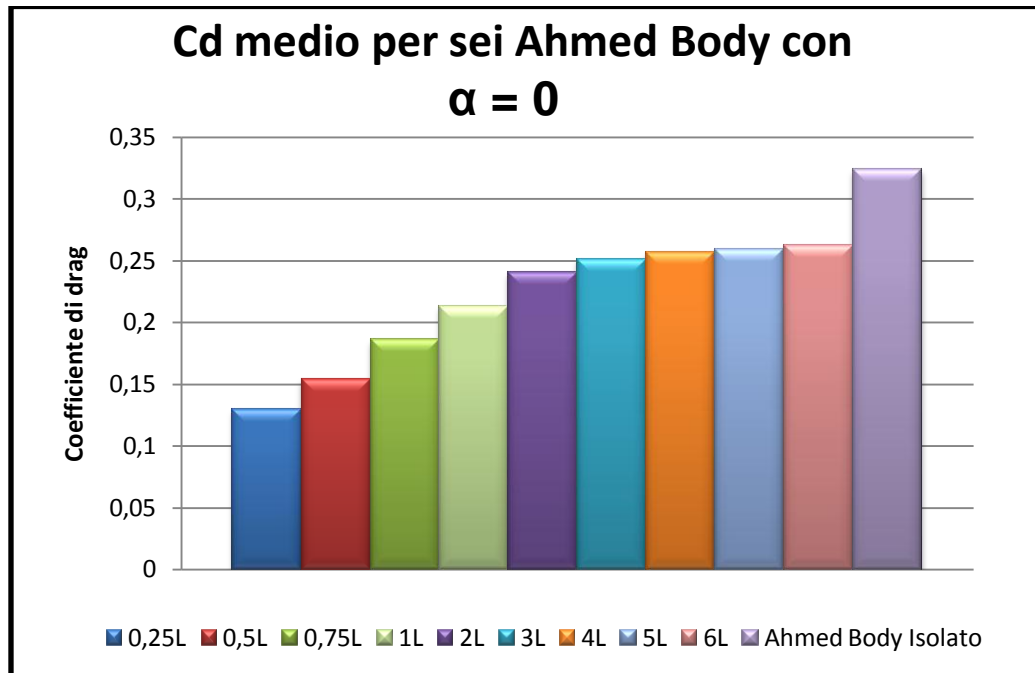


Figura 4.23 Coefficiente di resistenza medio per sei Ahmed Body con $\alpha = 0^\circ$ al variare della spaziatura inter-veicolare.

L'immagine evidenzia che il coefficiente medio di resistenza aerodinamica è sempre minore di quello del veicolo isolato per tutte le spaziature inter-veicolari analizzate. Questo si verifica perché la configurazione dell'Ahmed Body con angolo posteriore pari a 0° non genera i vortici longitudinali controrotanti, il flusso si separa dalla parte posteriore senza riattaccarsi generando un'ampia scia. Il coefficiente medio di resistenza aerodinamica scende fino a un valore di 0,13 per una spaziatura inter-veicolare pari a 0,25L e raggiunge un valore massimo pari a 0,26, rimanendo sempre al di sotto di quello isolato, per una distanza di 6L.

Nella Figura 4.24 è riportato l'andamento del coefficiente di resistenza aerodinamica dei sei Ahmed Body con $\alpha=30^\circ$ al variare della spaziatura inter-veicolare.

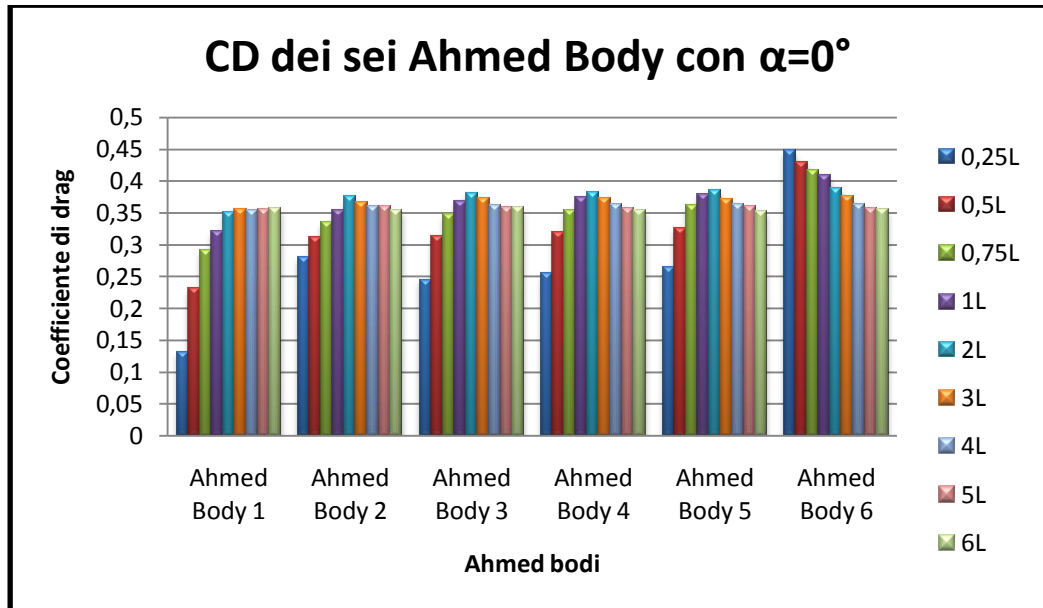


Figura 4.24 Andamento del CD per sei Ahmed Body con $\alpha=30^\circ$

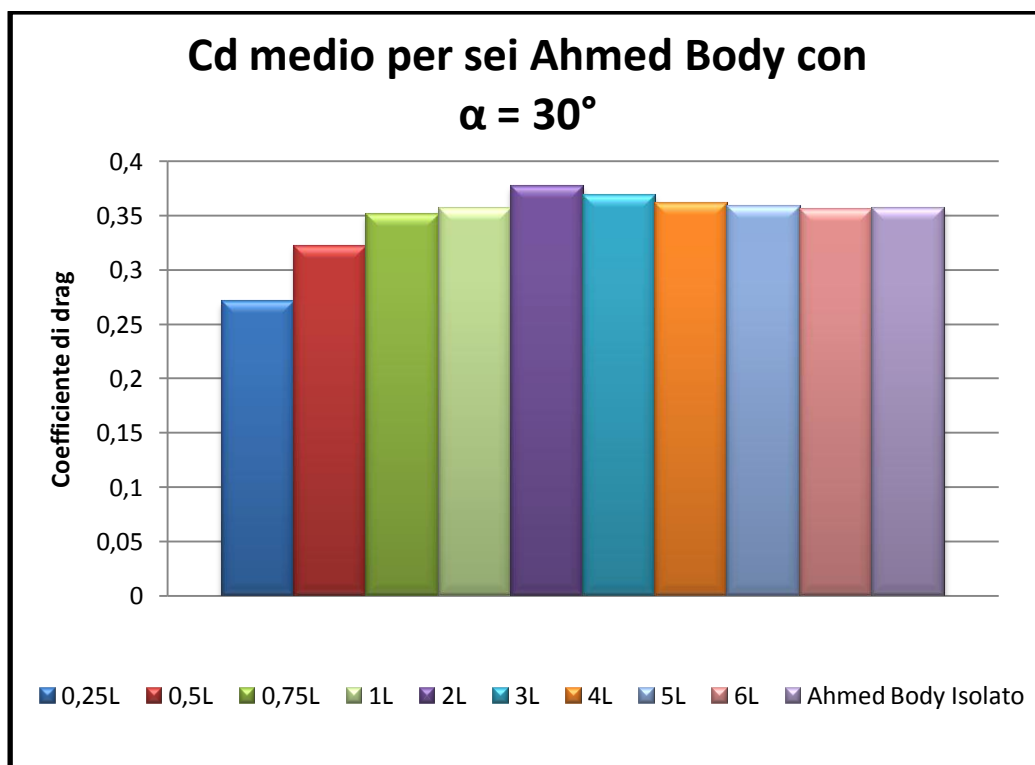


Figura 4.25 Coefficiente di resistenza medio per sei Ahmed Body con $\alpha = 30^\circ$ al variare della spaziatura inter-veicolare.

La Figura 4.25 mostra che per spaziatore minori di $1L$ il coefficiente di resistenza aerodinamica medio è minore di quello del veicolo isolato.

Per $2L < x/L < 4L$ invece il C_D medio supera quello isolato. Questo perché, come mostrato precedentemente per due veicoli in tandem, il veicolo anteriore a una distanza $2L$ non riceve nessuna influenza dal veicolo posteriore mentre quest'ultimo risente ancora del flusso generato da quello anteriore che gli causa un aumento del coefficiente di resistenza aerodinamica.

Per distanze superiori a $4L$ il valore del coefficiente di resistenza medio è pari a quello del veicolo isolati.

Questo comportamento è dovuto alla formazione dei vortici controrotanti nella parte posteriore del veicolo che finendo sulla superficie anteriore del modello posto dietro ne incrementano la forza di resistenza aerodinamica.

4.2 Dettagli delle forze di resistenza aerodinamica dei veicoli

4.2.1 Modello veicolo isolato

Lo studio prosegue analizzando il coefficiente di resistenza aerodinamica di quattro modelli semplificati di veicoli in scala 1:4. L'analisi è svolta direttamente nel caso tridimensionale perché, come mostra lo studio precedente sull'Ahmed Body, è quello che simula in maniera più corretta il flusso reale.

Le geometrie dei veicoli considerati sono:

- Un camion autoarticolato ($L = 4,074$ m)
- Un'utilitaria ($L = 0,959$ m)
- Un furgoncino ($L = 1,012$ m)
- Una berlina. ($L = 1,199$ m)

I risultati, del coefficiente di resistenza aerodinamica di ogni veicolo, sono mostrati in Figura.4.26:

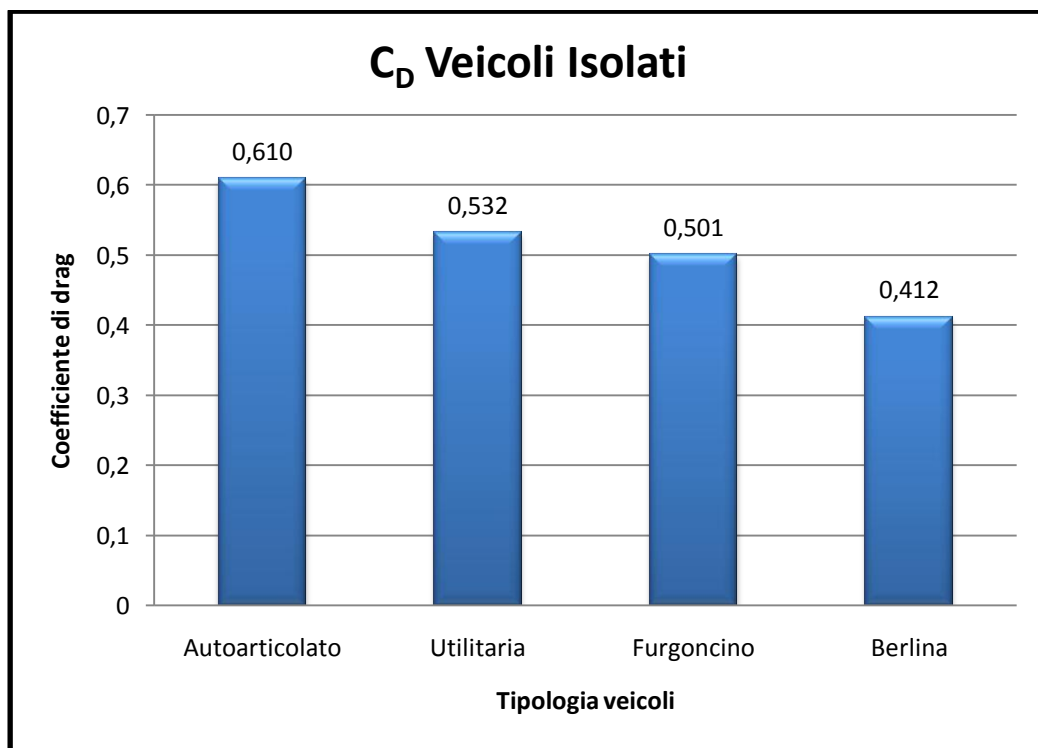


Figura.4.26 Coefficiente di resistenza aerodinamica dei veicoli

La Figura.4.26 mostra che il coefficiente di resistenza più elevato, pari a 0,610, appartiene all'autoarticolato mentre quello più basso, pari a 0,412, corrisponde alla berlina.

Questa differenza è dovuta al fatto che la berlina ha una forma più affusolata e quindi più aerodinamica rispetto al camion e agli altri veicoli.
Nella Figura 4.27 seguente sono riportate le linee di flusso della velocità dei singoli veicoli .

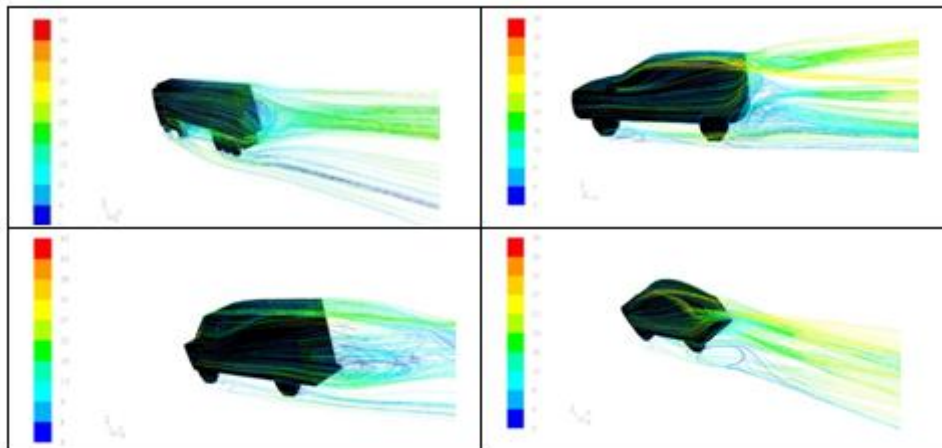


Figura 4.27 Flusso della scia dei veicoli

L'immagine evidenzia che il flusso d'aria nella berlina rimane attaccato ad essa fino alla fine del baule. Questo genera una scia inferiore rispetto al caso del furgoncino e del camion, dove il flusso si stacca alla fine della parte superiore. La generazione di una scia più grande permette ai veicoli posti dietro di ricevere una riduzione maggiore della forza di resistenza aerodinamica come mostrato per l'Ahmed Body a 0° .

Dalla figura si può notare, per l'utilitaria, la formazione di un vortice controrotante nella parete superiore all'inizio del baule.

4.2.2 Da due a sei furgoncini in tandem

L'analisi prosegue studiando come varia il coefficiente di resistenza aerodinamica al variare del numero di furgoncini in tandem e variando la spaziatura inter-veicolare. Il numero di veicoli posti in fila varia da 2 a 6 e lo spazio tra i veicoli varia da $0,5L$ a $1L$ con uno passo di $0,25L$ ($L = \text{lunghezza del furgoncino} = 1012,5$).

La Figura 4.28 riporta la disposizione dei furgoncini:

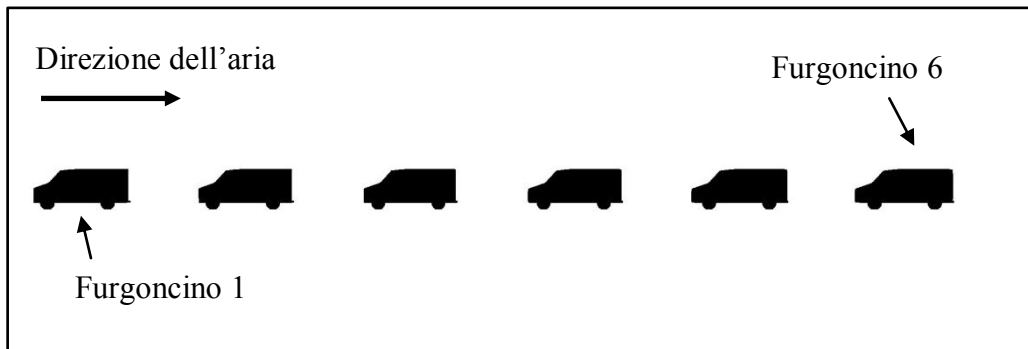


Figura 4.28 Sei furgoncini in fila

Nella Figura 4.29 sono riportati i risultati del coefficiente di resistenza aerodinamica variando i numeri di veicoli posti in fila ma mantenendo la distanza costante pari a $1L$.

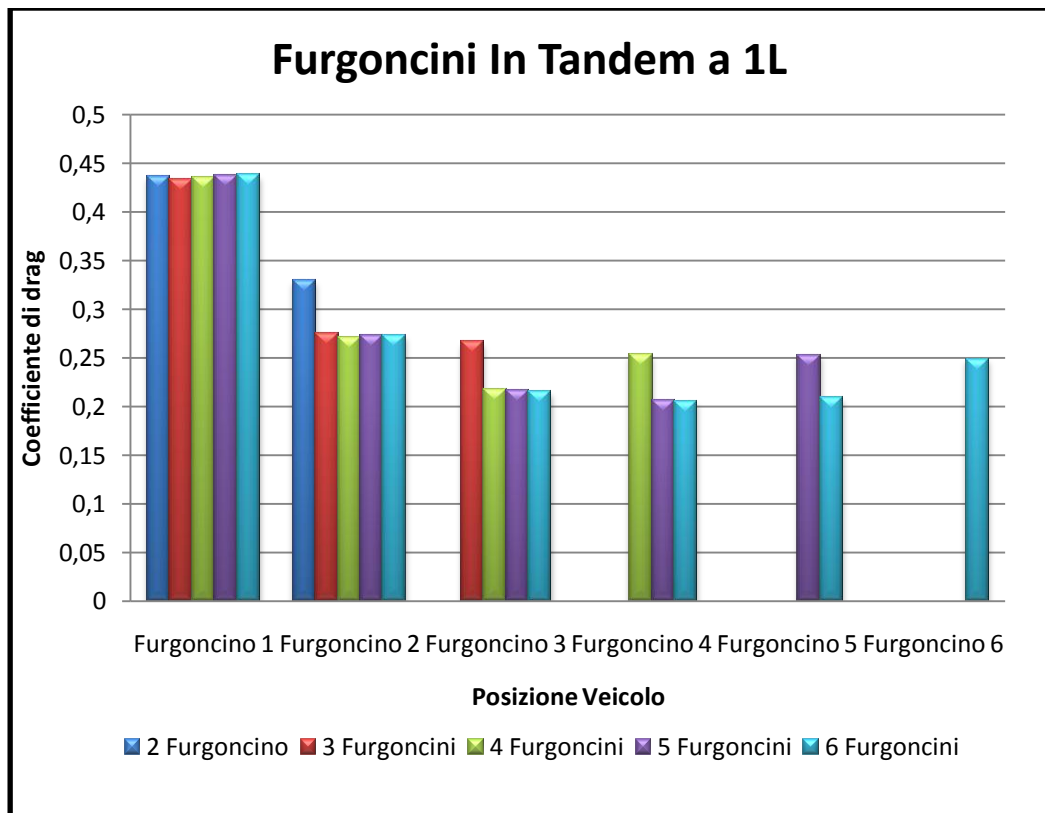


Figura 4.29 Andamento del coefficiente di drag dei furgoncini posti a $1L$ di distanza variando il numero di veicoli

Il grafico evidenzia come aumentando il numero di veicoli in tandem il valore del coefficiente di resistenza aerodinamica dei singoli veicoli diminuisce raggiungendo un valore minimo di circa 0,2 per i furgoncini 3, 4, 5. Anche il C_D

medio si riduce passando da 0,38 nel caso di due veicoli in tandem a quello di 0,265 nel caso di 6.

La riduzione del coefficiente di resistenza aerodinamica, nel caso di due furgoncini in tandem, è dovuta al fatto che quando si pongono due veicoli in fila quello guida subisce una riduzione della caduta di pressione nella parte posteriore mentre quello posteriore vede una riduzione dell'aumento di pressione nella parte anteriore, come mostrato in Figura 4.30, rispetto al caso del veicolo isolato.

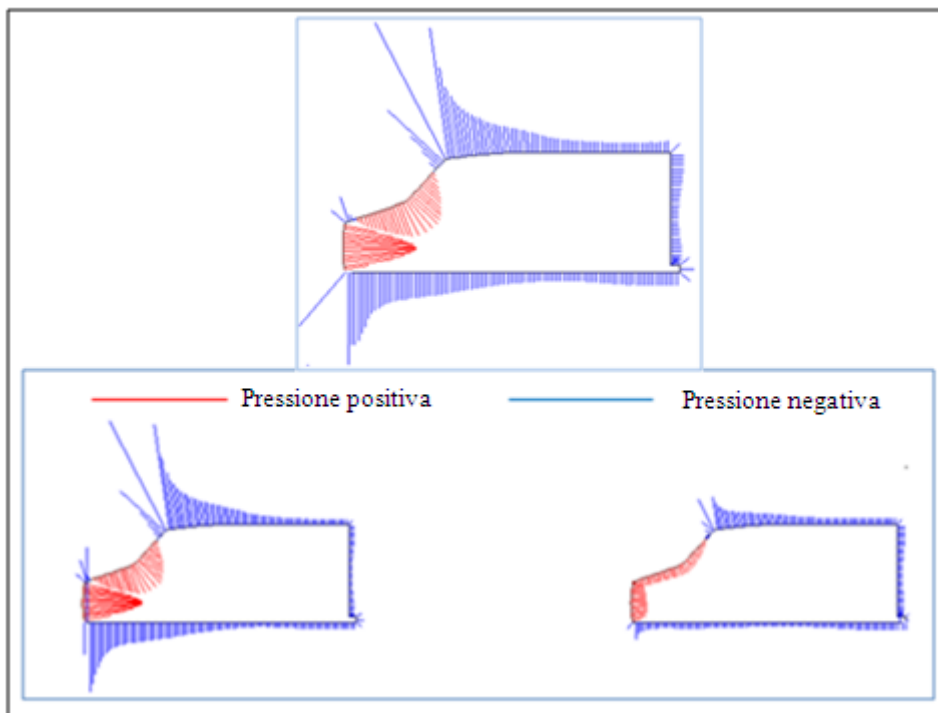


Figura 4.30 Profilo di pressione del furgoncino isolato (sopra) e due furgoncini in tandem(in basso) a $x/L=1$ (veicolo guida a sinistra secondo veicolo a destra)

Se aumentiamo il numero di veicoli il coefficiente di resistenza aerodinamica medio diminuisce perché tutti i veicoli posti dietro a quello guida vedono una riduzione dell'aumento di pressione nella parte anteriore e inoltre tutti tranne l'ultimo vedono anche una diminuzione della caduta di pressione nella parte posteriore

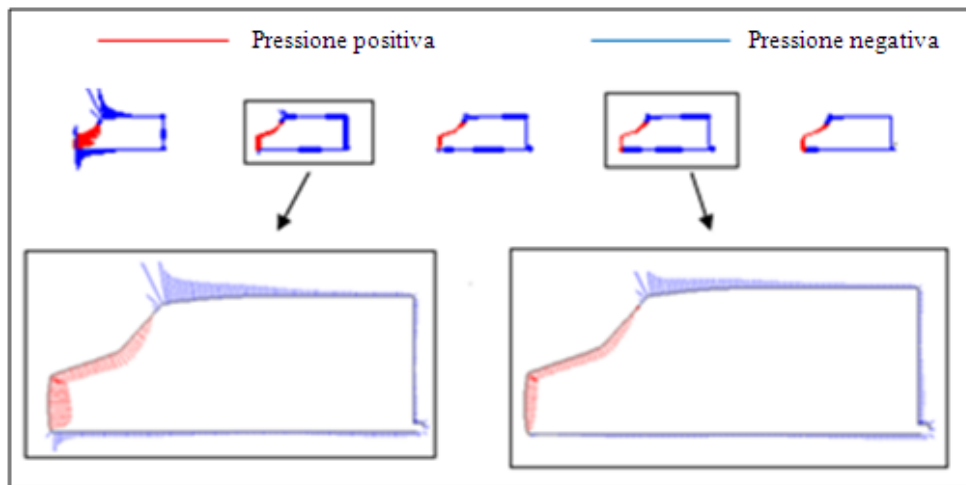


Figura 4.31 Profilo di pressione 5 furgoncini in tandem $x/L=1$

La Figura 4.31 evidenzia che vi è una riduzione dell'aumento di pressione sulla parte anteriore del quarto veicolo rispetto al secondo e che vi è anche una diminuzione della caduta di pressione. Questo fa sì che il furgoncino due ha un coefficiente di resistenza aerodinamica maggiore rispetto al veicolo 4.

I risultati ottenuti ponendo i veicoli a una distanza di $0.75L$ sono riportati nella Figura 4.32

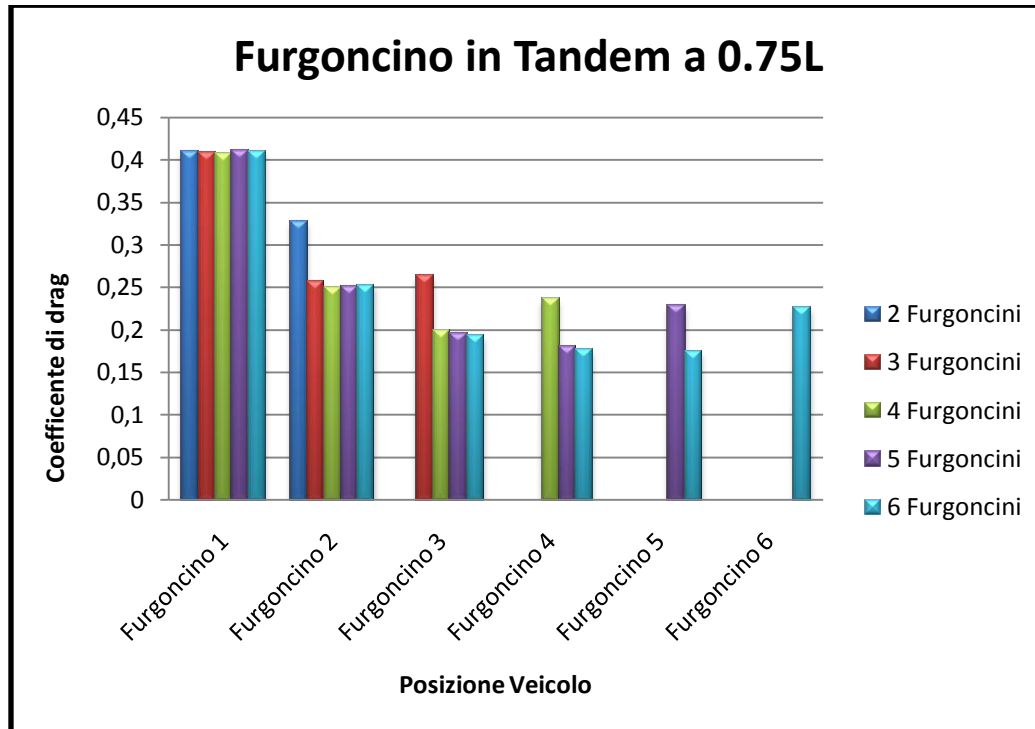


Figura 4.32 Andamento del coefficiente di drag dei furgoncini posti a 0.75L di distanza variando il numero di veicoli

Diminuendo la distanza inter-veicolare anche il coefficiente di resistenza aerodinamica dei sei singoli veicoli subisce una riduzione raggiungendo un valore minimo di 0,18 per i furgoncini 4 e 5. Questo comporta anche una riduzione del C_D medio che nel caso di due veicoli in tandem diminuisce passando da 0,383, nel caso di distanza pari a 1L, a 0,369. Lo stesso effetto si ottiene anche nel caso di 6 veicoli in tandem per il quale si passa da 0,265 a 0,239 con distanza pari a 0.75L (anche per tutte le altre configurazioni intermedie).

Tale comportamento si verifica perchè più i veicoli sono posti ravvicinati più questi assomigliano ad un unico convoglio che si muove.

Se ora si diminuisce ancora la distanza tra i furgoncini si ottiene un'ulteriore diminuzione del coefficiente di resistenza aerodinamica dei singoli veicoli come mostrato nella Figura 4.33:

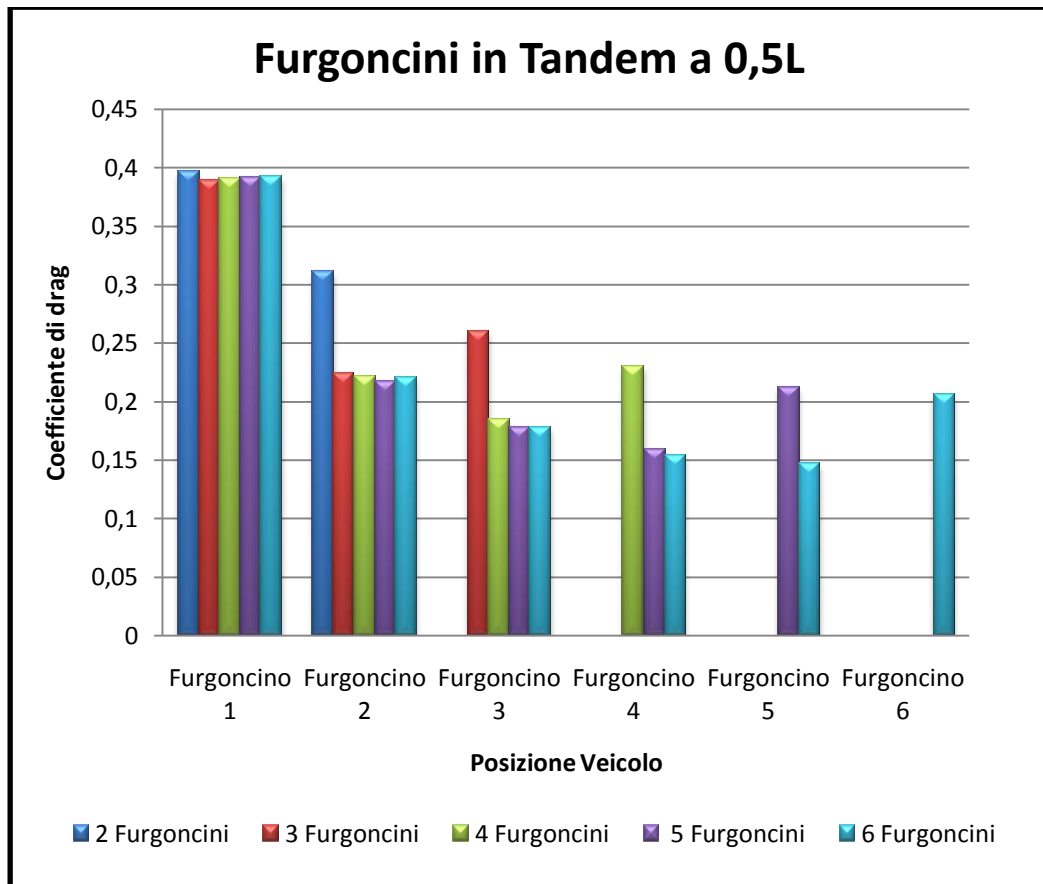


Figura 4.33 Andamento del coefficiente di drag dei furgoncini posti a 0.5L di distanza variando il numero di veicoli.

L'influenza della distanza sul coefficiente di drag è meglio evidenziata nella Figura 4.34 dove sono riportati i risultati del coefficiente di resistenza aerodinamica a diverse distanze nella configurazione con 5 furgoncini:

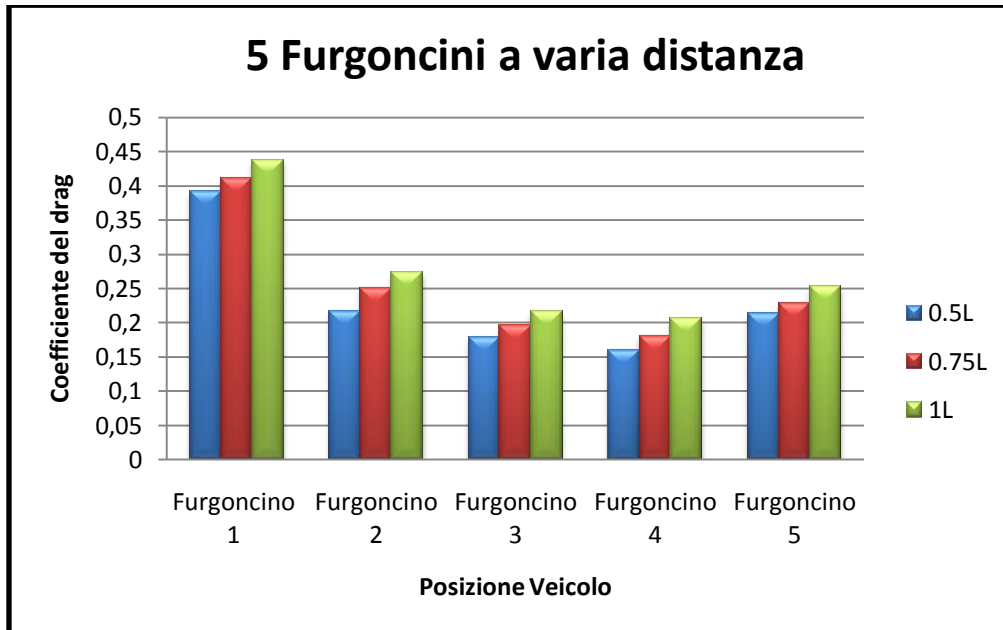


Figura 4.34 Configurazione 5 furgoncini a varie distanze

La Figura 4.34 mostra che aumentando la distanza inter-veicolare il coefficiente di resistenza aerodinamica di tutti i veicoli si incrementa causando un aumento del coefficiente medio di resistenza. Si consideri il furgoncino 3 come esempi, il suo coefficiente aerodinamico passa da :

- 0,178 per $x/L = 0,5$:
- a 0,196 per $x/L = 0,75$:
- a 0,217 per $x/L = 1$

La Figura 4.35 mostra come varia il profilo di pressione sul furgoncino 3 in una spaziatura inter-veicolare di 0,5L a una di 1L

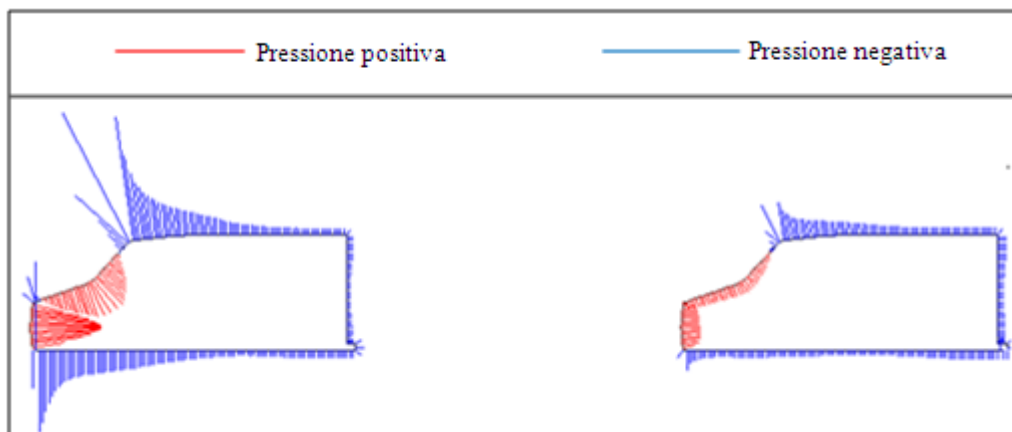


Figura 4.35 Profilo di pressione sul terzo furgoncino nella configurazione a 5 furgoncini in tandem a una distanza 0,5L e a 1L

Dall'immagine è possibile notare che il furgoncino 3 a una distanza di $1L$ vede un incremento di pressione sulla parte frontale e un aumento di caduta di pressione sulla parte posteriore rispetto al veicolo 3 con spaziatura inter-veicolare di $0,5L$.

La Figura 4.36 mostra, come esposto precedentemente, che, pur mantenendo la spaziatura inter-veicolare costante (in questo caso pari a $1L$) il valore medio del coefficiente di resistenza aerodinamica diminuisce all'aumentare del numero di veicoli

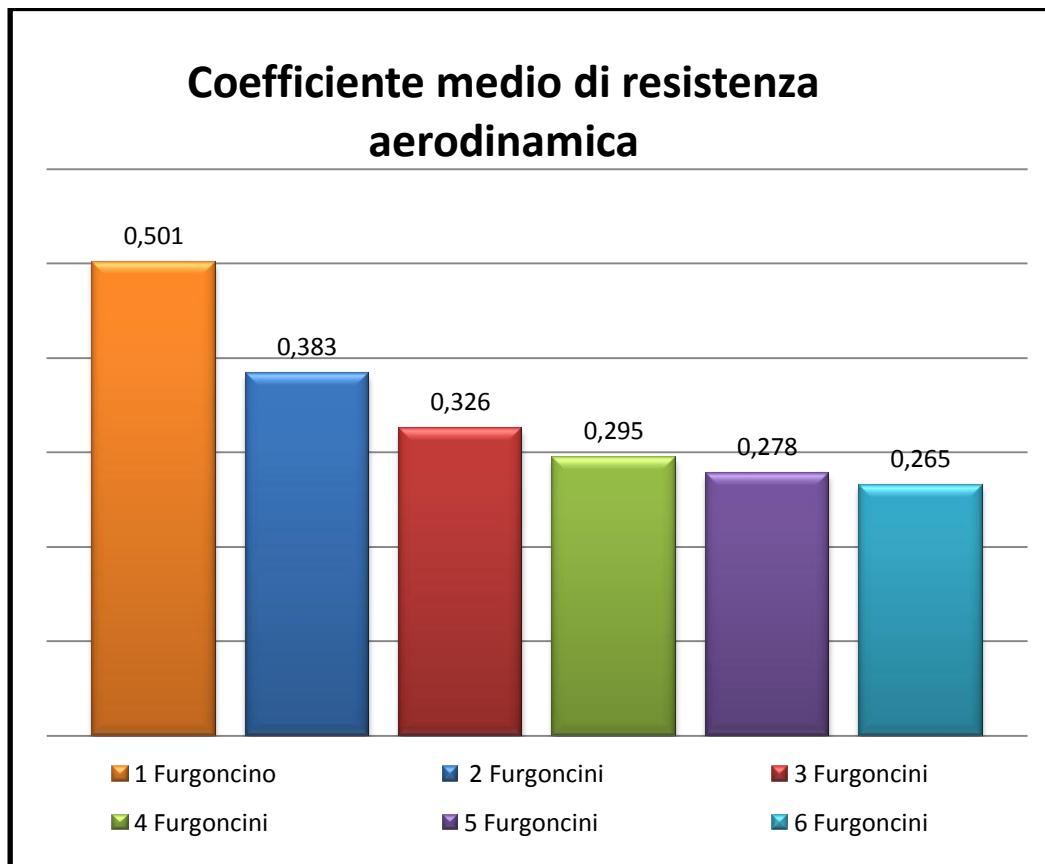


Figura 4.36 Coefficiente medi di resistenza aerodinamica, per $x/L = 1$, al variare del numero di furgoncini

L'immagine evidenzia che già ponendo due furgoncini in fila questi vedono una diminuzione del coefficiente medio di resistenza aerodinamica, rispetto al veicolo isolato, pari al 23,6%. Ponendone invece sei in tandem si ottiene una riduzione del coefficiente pari al 47%.

4.2.3 Tre veicoli in tandem

L'analisi prosegue studiando l'influenza della disposizione dei veicoli all'interno di un platoon sul coefficiente di resistenza aerodinamica.

Lo studio è svolto su tre tipi di configurazioni con tre veicoli posti in fila.

Tali configurazioni sono:

- Camion – Utilitaria – Berlina (configurazione 1)
- Furgoncino – Utilitaria – Berlina (configurazione 2)
- Berlina – Utilitaria – Furgoncino (configurazione 3)

Di seguito sono discussi i risultati ottenuti per le tre configurazioni. In questo caso lo spazio inter-veicolare varia da 0,5 metri a 3 metri e si analizza in particolare la forza di resistenza aerodinamica del secondo veicolo.

Configurazione 1:

La Figura 4.37 mostra la disposizione dei veicoli per la configurazione 1:

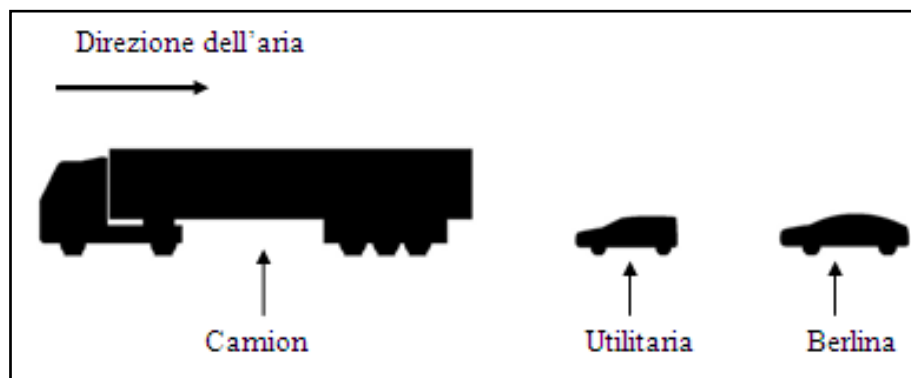


Figura 4.37 Disposizione dei veicoli per la configurazione 1

I risultati ottenuti da questa disposizione dei veicoli sono riportati nella Figura 4.38:

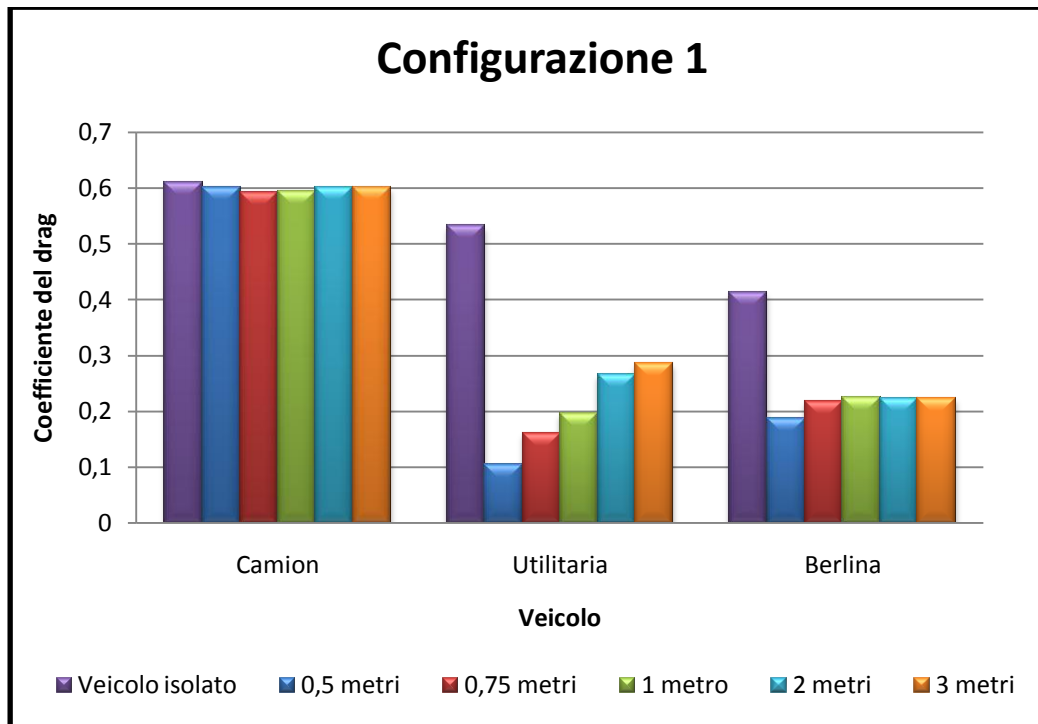


Figura 4.38 Coefficiente di resistenza aerodinamica dei veicoli nella configurazione 1 al variare della spaziatura inter-veicolare.

Dal grafico qui sopra riportato si può notare che sia l'utilitaria che la berlina vedono una forte riduzione del coefficiente di drag. Il C_D dell'utilitaria subisce una riduzione dell'78,5% e quello della berlina del 50%, per una spaziatura inter-veicolare di 0,5 metri. L'utilitaria ha una riduzione maggiore rispetto a quella della berlina perché è posta tra due veicoli quindi riceve un beneficio sia dal veicolo guida che da quello posto dietro. Se aumentiamo la distanza il coefficiente di resistenza aerodinamica aumenta per entrambi i veicoli posti dietro il camion rimanendo comunque sempre inferiore a quello del veicolo isolato. Se si considera una distanza inter-veicolare pari a 1 metro la riduzione percentuale dell'utilitaria e della berlina sono rispettivamente pari a 63,2% e 45,6%. Il coefficiente di resistenza aerodinamica dell'utilitaria continua ad aumentare (rimanendo comunque sempre al di sotto del caso isolato) all'aumentare della distanza mentre quello della berlina, per spaziature inter-veicolari maggiori di 1 m, rimane costante.

In tutti e tre i casi considerati il coefficiente di resistenza aerodinamica del camion non subisce importanti variazioni.

La Figura 4.39 mostra il profilo di pressione sull'utilitaria per una distanza di 0,5 metri e 3 metri.

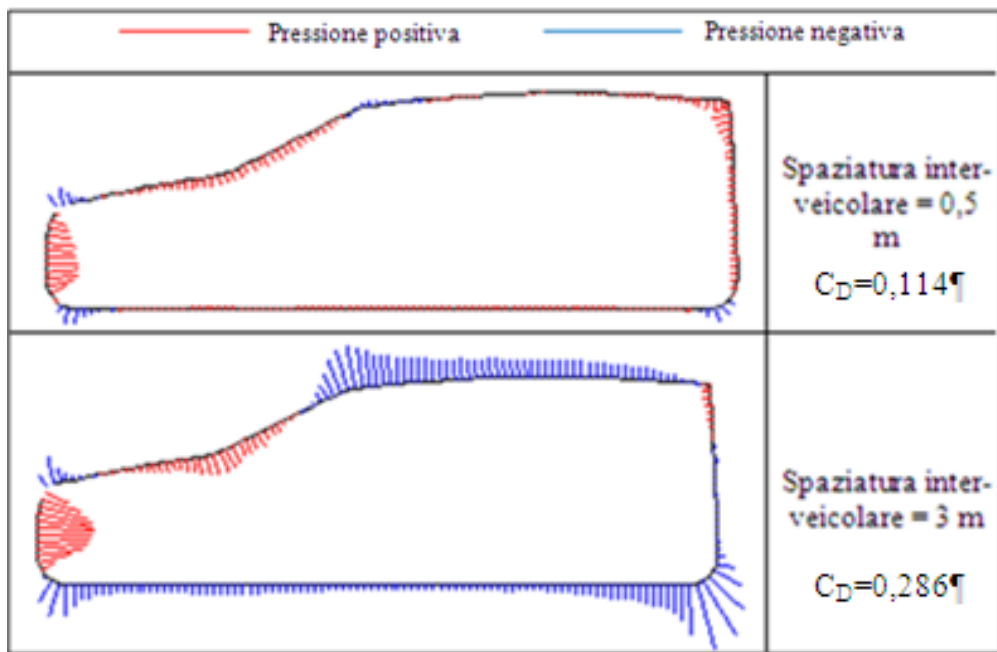


Figura 4.39 Profilo di pressione dell'utilitaria nella configurazione 1

L'immagine qui sopra riportata mostra come sull'utilitaria a una spaziatura inter-veicolare di 0,5 m agiscono pressioni sulla parte frontale molto minori che nel caso di una distanza di 3 m. Inoltre l'utilitaria per la distanza minore vede anche un aumento della pressione nella parte posteriore. Invece per una distanza di 3 m l'auto vede la formazione di una depressione nella parte posteriore e un incremento della pressione nella parte anteriore che generano una forza che si oppone al moto dell'auto e ciò ne incrementa il coefficiente di resistenza aerodinamica rispetto a una distanza di 0,5 m.

La Figura 4.40 riporta il profilo di pressione sulla berlina per tre distanze:

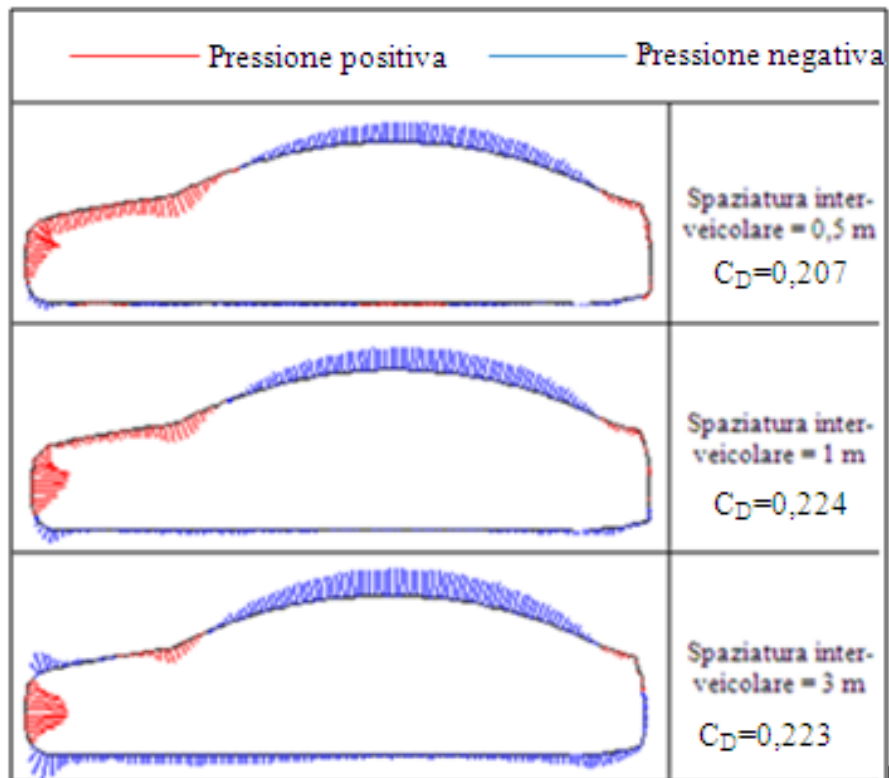


Figura 4.40 Profilo di pressione della berlina nella Configurazione 1

La berlina vede un incremento della pressione sulla parte frontale del veicolo e una diminuzione della pressione fino alla formazione di una caduta di pressione nella parte posteriore all'aumentare della distanza. Il fatto che sia a una distanza di 1 m che a quella di 3 m il coefficiente di resistenza aerodinamica non cambia è dovuto al fatto che a 1m sia sul cofano che sul retro si ha una aumento di pressione mentre a 3 m sia sul cofano che nella parte posteriore si genera una depressione che genera lo stesso effetto dell'aumento di pressione che si ha a 1 m. Inoltre l'immagine mostra che a una distanza di 0,5 m si ha un aumento di pressione sul cofano ma una minore pressione, rispetto a una distanza di 3m, sulla parte anteriore (all'altezza del radiatore) del veicolo che è quella che contribuisce maggiormente ad incrementare il C_D . Tale effetto genera una riduzione del coefficiente di resistenza aerodinamica a una distanza di 0,5 m rispetto a 3 m

Configurazione 2

La Figura 4.41 mostra la disposizione dei veicoli per la configurazione 2:



Figura 4.41 Disposizione dei veicoli per la configurazione 2

Nella Figura 4.42 sono riportati i valori del coefficiente di drag ottenuti con la seguente configurazione:

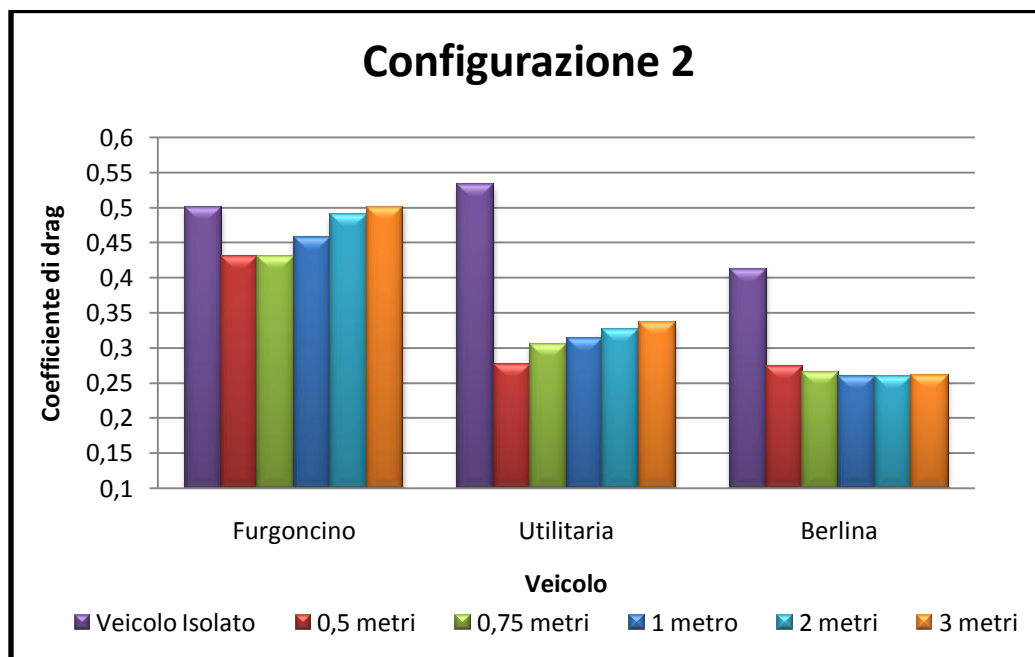


Figura 4.42 Coefficiente di resistenza aerodinamica dei veicoli nella Configurazione 2 al variare della spaziatura inter-veicolare

Come mostra la Figura 4.42 tutti i veicoli subiscono una riduzione del coefficiente del drag, che aumenta all'aumentare della distanza tranne nel caso della berlina. La Tabella 4.1 riporta le riduzioni percentuali sui tre veicoli.

Tabella 4.1 Riduzione del C_D nella configurazione 2 al variare della spaziatura inter-veicolare

Veicolo	Riduzione percentuale del C_D		
	0,5 metri	1 metro	3 metri
Furgoncino	14,1%	8,8%	0%
Utilitaria	48%	41%	36%
Berlina	33%	36,9%	36,6%

A differenza della configurazione 1 nella 2 la berlina subisce un lieve aumento del coefficiente di resistenza aerodinamica al diminuire della spaziatura inter-veicolare.

Questo è causato dal fatto che quando la berlina è molto vicina all'utilitaria essa vede un aumento di pressione che interessa una zona più ampia del cofano come mostrato nelle Figura 4.43 e nella Figura 4.43 e

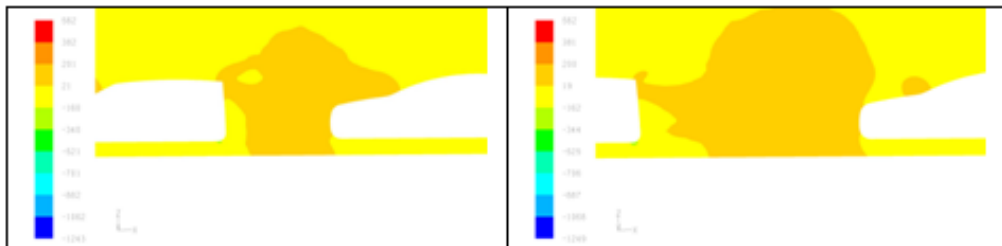


Figura 4.43 Andamento della pressione tra utilitaria e berlina per spaziature inter-veicolari pari a 0,5 metri e 1 metro

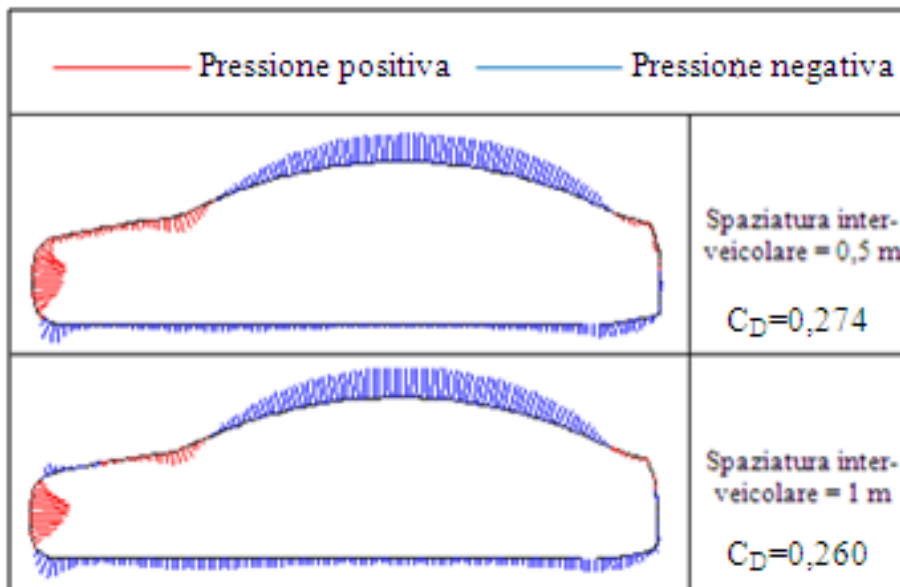


Figura 4.44 Profilo di pressione della berlina nella configurazione 2

Configurazione 3:

La Figura 4.45 mostra la disposizione dei veicoli per la configurazione 3:

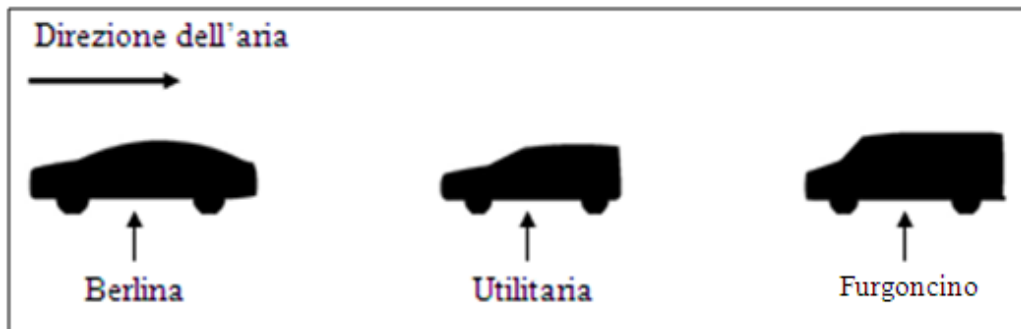


Figura 4.45 Disposizione dei veicoli nella configurazione 3

I risultati ottenuti con la seguente configurazione sono riportati nella Figura 4.46

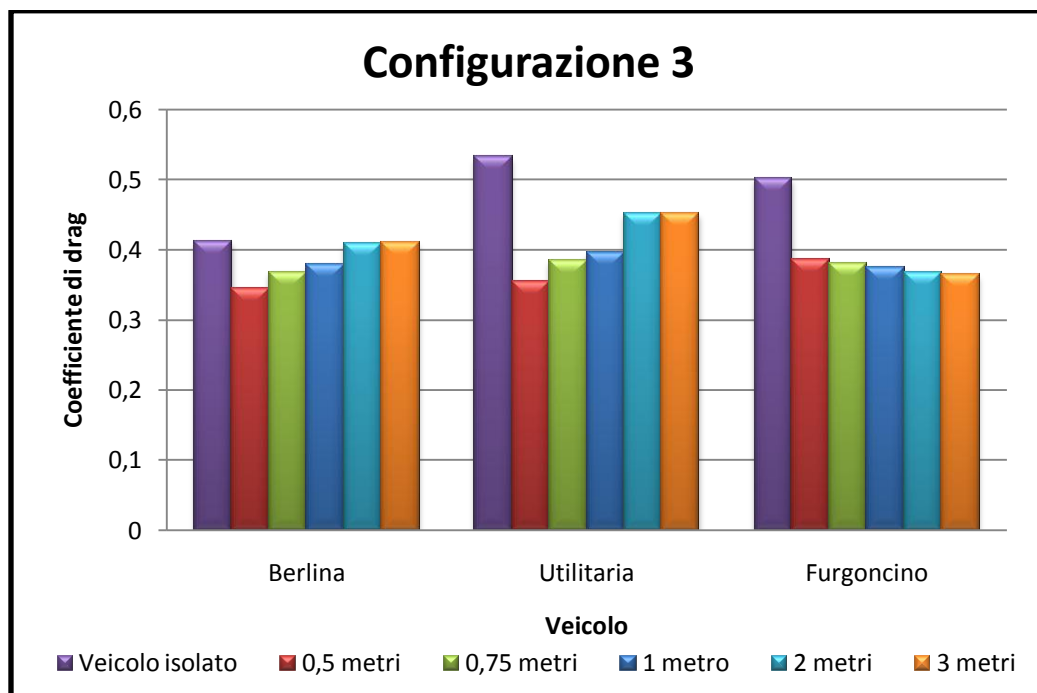


Figura 4.46 Coefficiente di resistenza aerodinamica dei veicoli per la configurazione 3 al variare della spaziatura inter-veicolare.

Anche in questo caso come nel precedente diminuendo la distanza diminuisce il coefficiente di resistenza dei primi due veicoli mentre quello dell'ultimo aumenta rimanendo sempre al di sotto del coefficiente di resistenza aerodinamica del veicolo isolato.

In conclusione, dalle tre configurazioni analizzate si nota come il coefficiente di resistenza aerodinamica è influenzato non solo dalla spaziatura inter-veicolare ma anche dalle dimensioni dei veicoli. Infatti se poniamo come veicolo guida il camion questo permetterà ai veicoli posti dietro di ricevere una riduzione del coefficiente di resistenza aerodinamica maggiore rispetto a quando si pone d'innanzi il furgoncino o la berlina. La conseguenza è che il C_D medio è minore nella prima configurazione rispetto alla configurazione 2 e 3 come mostrato nella Figura 4.47, per una spaziatura inter-veicolare fino a 1 metro. Per distanze superiori a 1 m la configurazione più vantaggiosa, anche se di molto poco, è la 2 mentre la configurazione 3 risulta essere sempre la meno vantaggiosa.

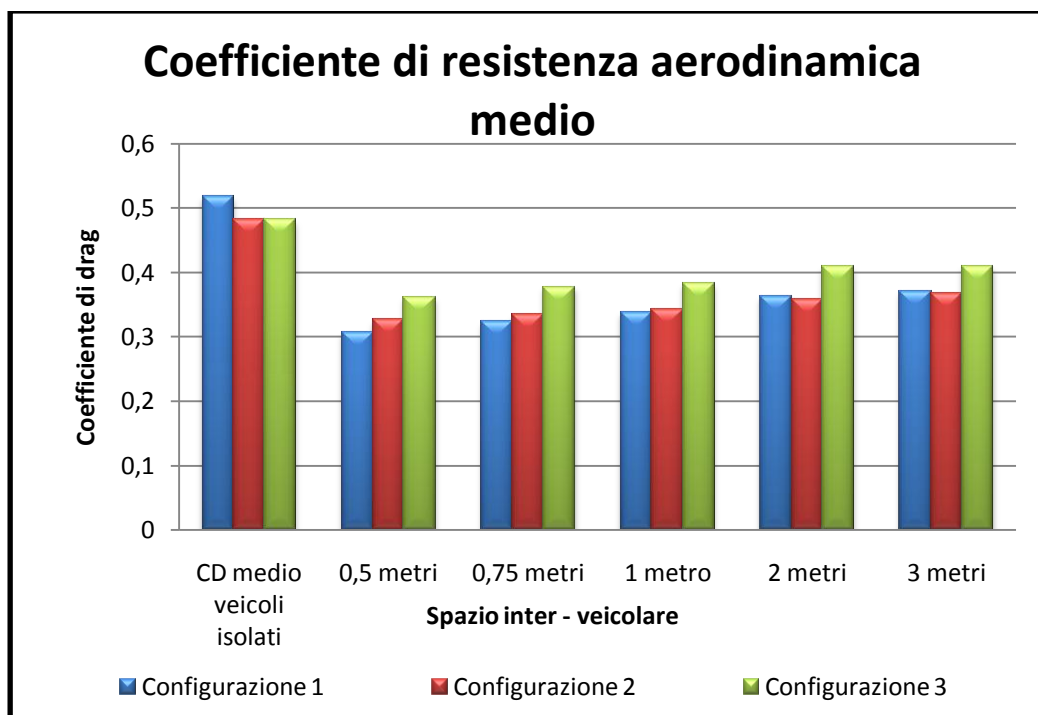


Figura 4.47 Coefficiente medio di resistenza aerodinamica nelle configurazioni 1, 2 e 3 al variare della spaziatura inter-veicolare.

La Figura 4.48 riporta la variazione del coefficiente di resistenza aerodinamica dell' utilitaria in base alle tre configurazioni analizzate con una spaziatura inter-veicolare pari a un metro.

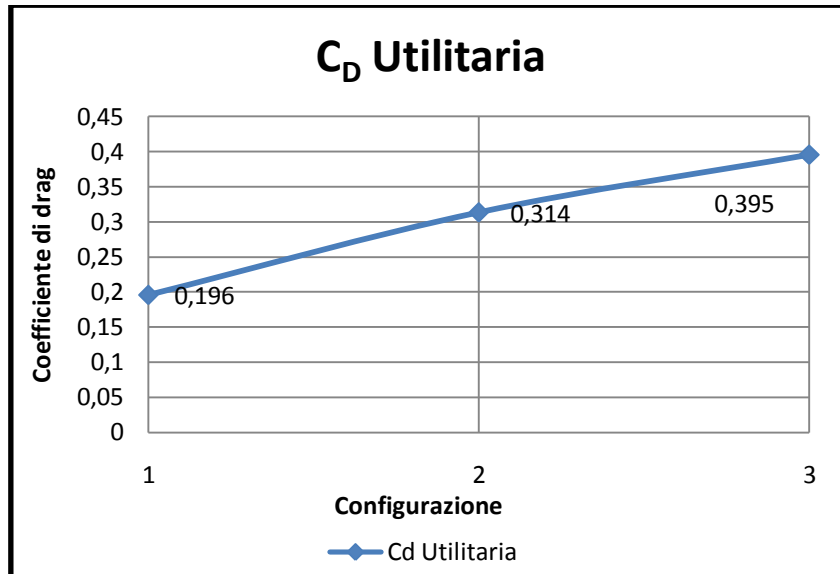


Figura 4.48 Andamento del coefficiente di resistenza aerodinamica dell'utilitaria nella configurazione 1, 2 e 3 con spaziatura inter-veicolare pari a 1m

L'immagine evidenzia che il coefficiente di resistenza aerodinamica dell'utilitaria è minore nella configurazione 1 dove dinanzi a essa è posto il camion il quale ha una superficie frontale molto più ampia dell'utilitaria. Invece diminuendo la superficie frontale, del veicolo guida, cioè ponendo prima il furgoncino e poi la berlina la Figura 4.48 mostra un andamento crescente del coefficiente di drag dell'utilitari. Questo evidenzia una dipendenza del C_D dell'utilitaria dalle dimensioni dei veicoli che la precedono.

La Figura 4.49 mostra il profilo della pressione dell'utilitaria nelle tre differenti configurazioni:

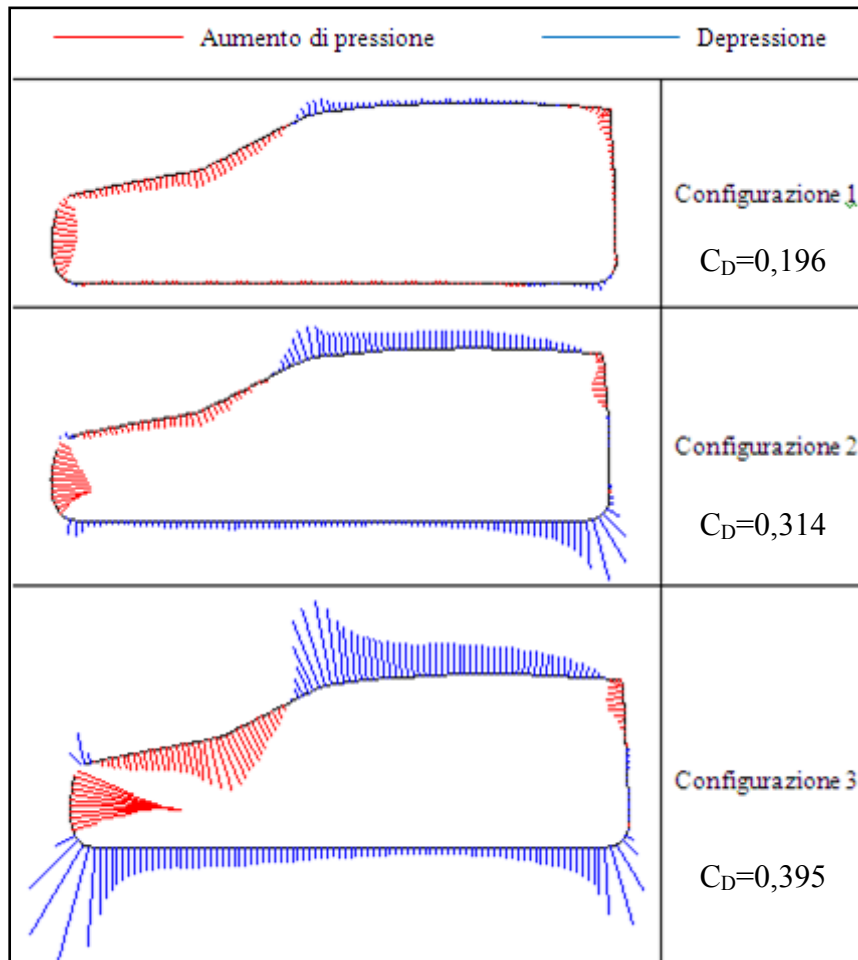


Figura 4.49 Andamento della pressione dell'utilitaria nelle tre configurazioni con spaziatura inter-veicolare di 1 m

La Figura 4.49 evidenzia che la pressione nella parte anteriore dell'utilitaria nella configurazione 1 è inferiore che negli altri due casi e che la pressione positiva nella zona posteriore del veicolo interessa una regione più ampia nella configurazione 1 rispetto alle altre. Questi fattori sono le principali cause della maggiore riduzione di drag che si ha ponendo dinanzi alla fila il camion rispetto agli altri due veicolo.

4.2.4 Sei veicoli in tandem

L'analisi prosegue studiando come vari il coefficiente aerodinamico in un plotone formato da sei veicoli.

In questo caso si sono considerati due tipi di configurazioni:

- Configurazione 1: Camion – Utilitaria – Berlina – Berlina – Utilitaria – Camion
- Configurazione 2: Furgoncino – Utilitari – Berlina – Berlina – Utilitaria – Furgoncino

Configurazione 1:

La Figura 4.50 mostra la disposizione dei veicoli per la configurazione 1:

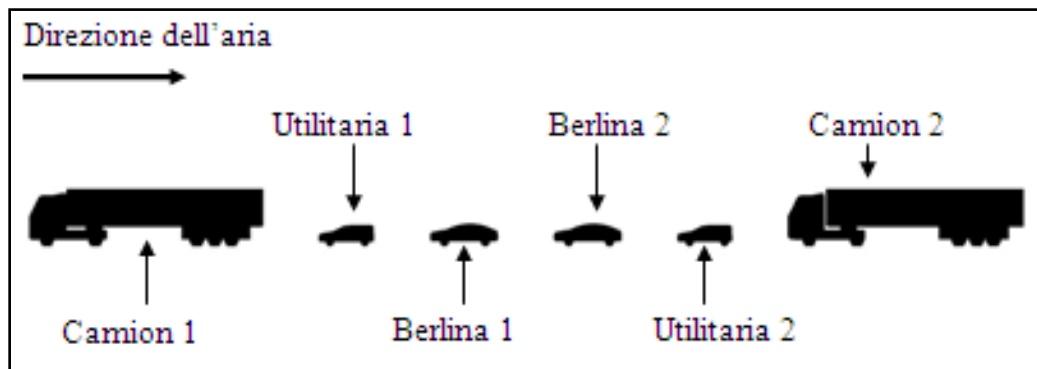


Figura 4.50 Disposizione dei veicoli nella configurazione 1

I risultati ottenuti dalla seguente configurazione sono riportati nella Figura 4.51

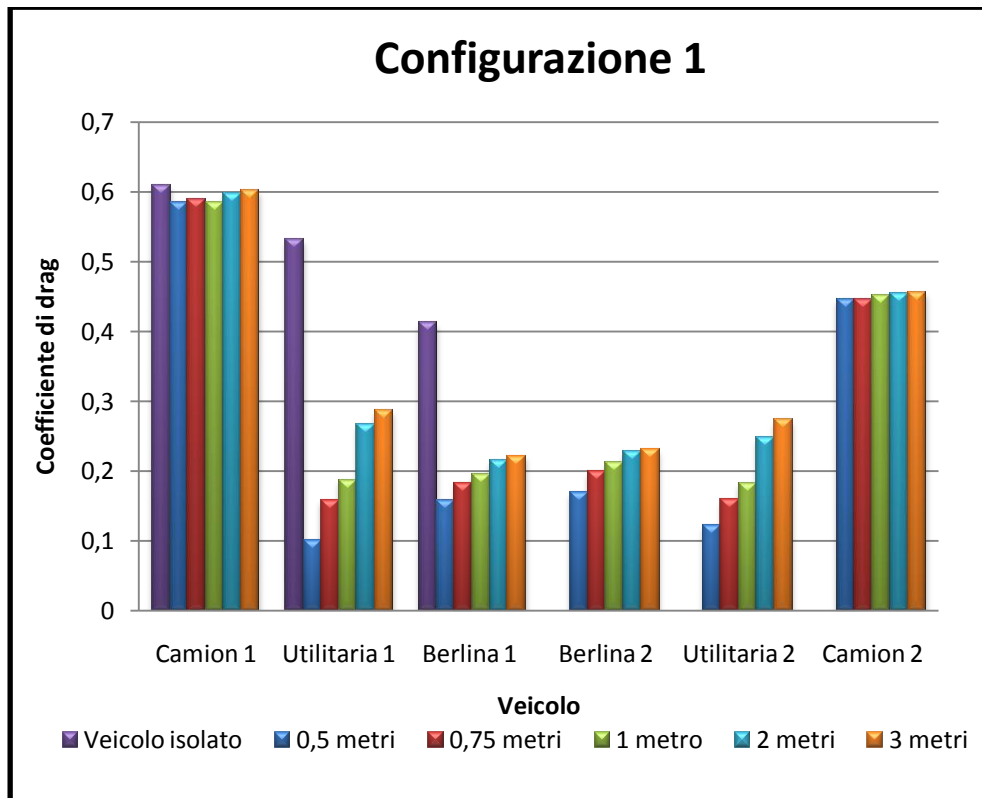


Figura 4.51 Coefficiente di resistenza aerodinamica dei veicoli nella configurazione 1 al variare della spaziatura inter-veicolare

L'immagine mostra che l'utilitaria 1 e 2 sono i due veicoli che beneficiano maggiormente dal punto di vista della riduzione del drag per distanze non superiori a 1 m. In tale configurazione anche il camion 2 subisce una riduzione del drag pari circa al 25% in quanto beneficia della presenza del camion 1.

La Figura 4.52 mostra il profilo di pressione del camion 1

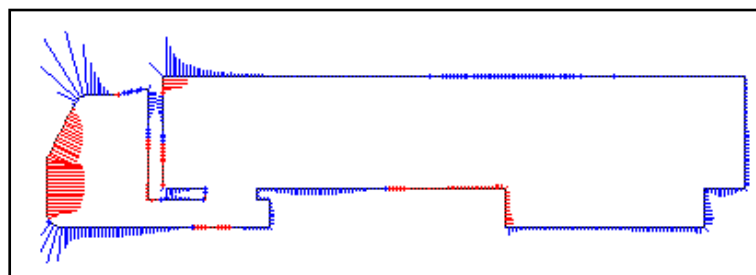


Figura 4.52 Profilo di pressione Camion 1

La Figura 4.53 mostra il profilo di pressione sul camion 2 per due distanze :

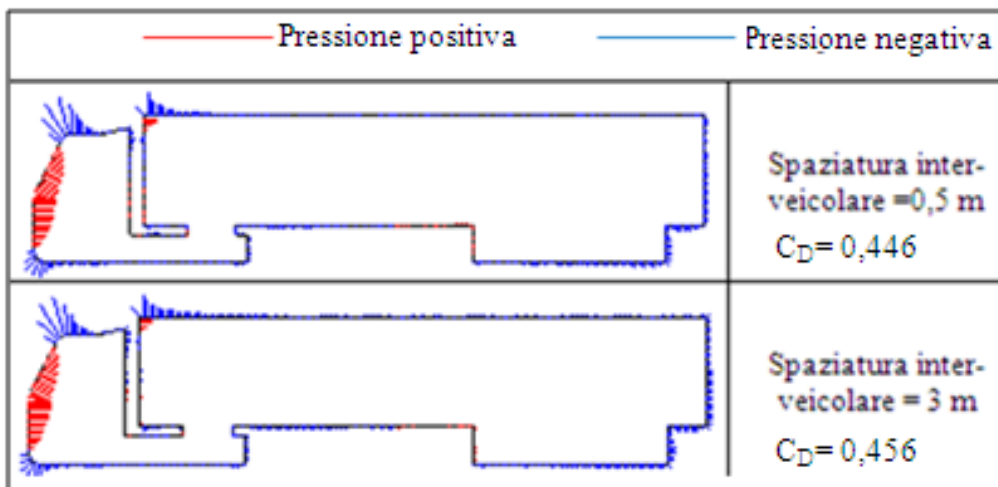


Figura 4.53 Profilo di pressione del camion 2

La Figura 4.53 non evidenzia sostanziali cambiamenti nel profilo di pressione per le due distanze questo è il motivo per cui il camion 2 subisce solo trascurabili variazioni del coefficiente di resistenza aerodinamica.

La Figura 4.54 mostra il profilo di pressione sull'utilitaria 1 e 2 a una distanza di 0,5 m:

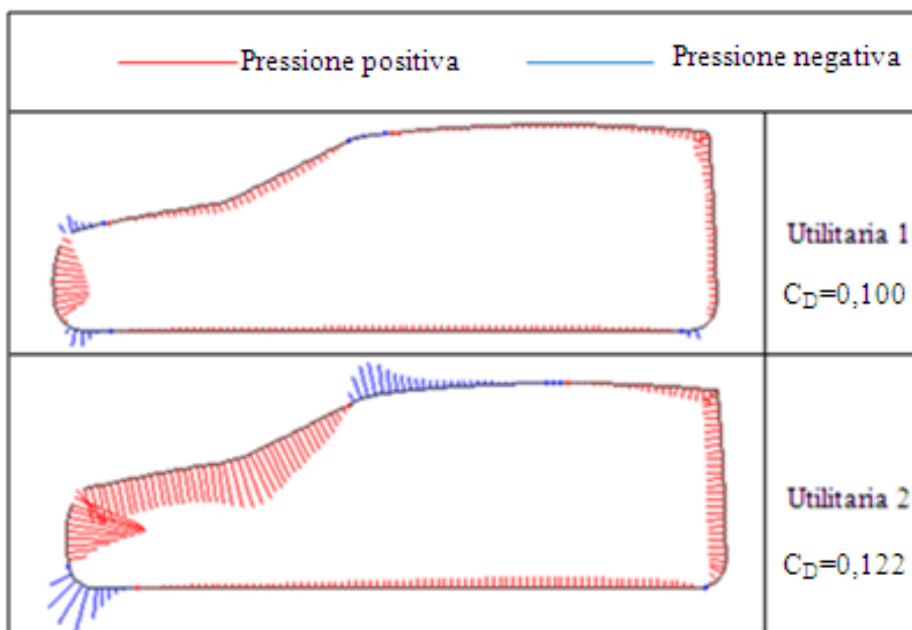


Figura 4.54 Profilo di pressione dell'utilitaria 1 e 2 nella Configurazione 1

Come mostrato dall'immagine, l'utilitaria 1 vede una riduzione molto maggiore dell'aumento di pressione sulla parte frontale rispetto all'utilitaria 2 perché la 1

ha di fronte a se il camion . Entrambe vedono un aumento di pressione nella parte posteriore che è leggermente maggiore nella caso dell'utilitaria 2 che ha dietro di se il camion. E' per questi motivi che l'utilitaria 1 vede una riduzione del coefficiente di resistenza aerodinamica maggiore rispetto alla due.

Configurazione 2

La Figura 4.55 mostra la disposizione dei veicoli per la configurazione 2:

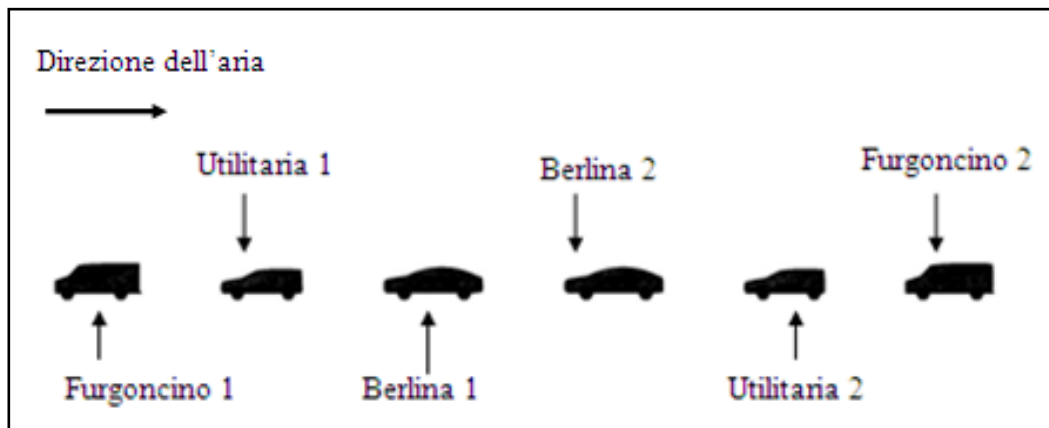


Figura 4.55 Disposizione dei veicoli nella configurazione 2

I risultati ottenuti dall'analisi della configurazione 2 sono riportati in Figura 4.56

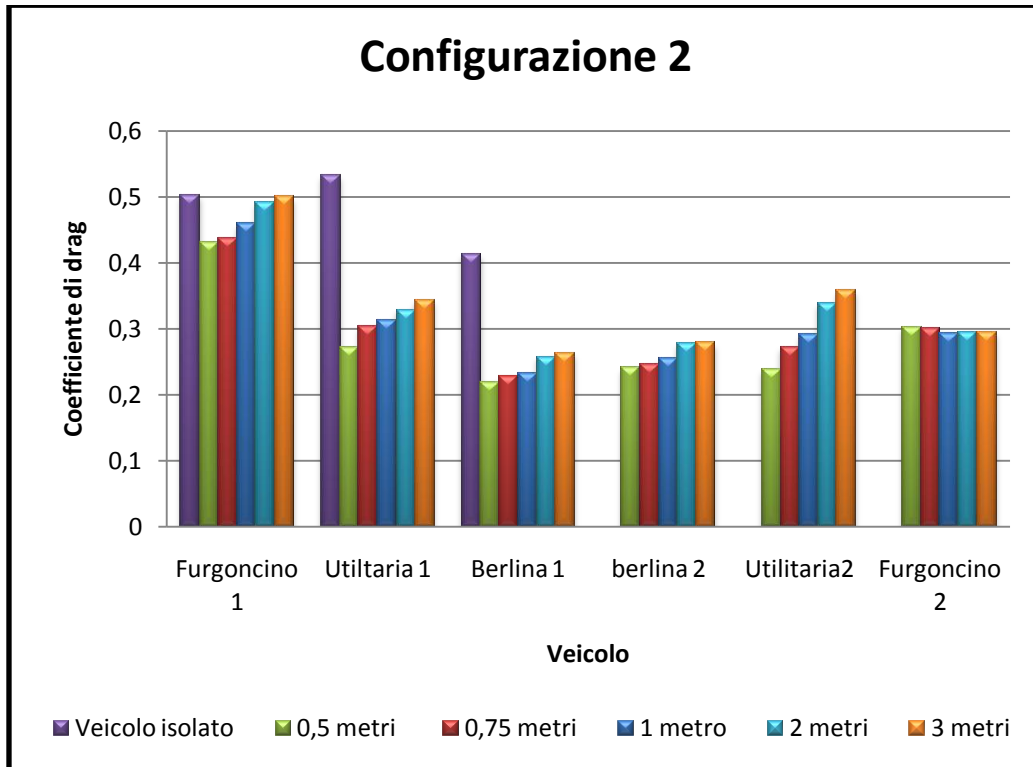


Figura 4.56 Coefficiente di resistenza aerodinamica dei veicoli nella configurazione 1 al variare della spaziatura inter-veicolare

L'immagine mostra che il veicolo che subisce una riduzione maggiore del coefficiente di resistenza aerodinamica è la Berlino 1. Rispetto alla configurazione 1 i quattro veicoli posti al centro subiscono una riduzione del coefficiente di resistenza aerodinamica inferiore.

Nella Figura 4.57 sono riportati i valori del coefficiente di resistenza aerodinamica medio per le due configurazioni al variare della distanza:

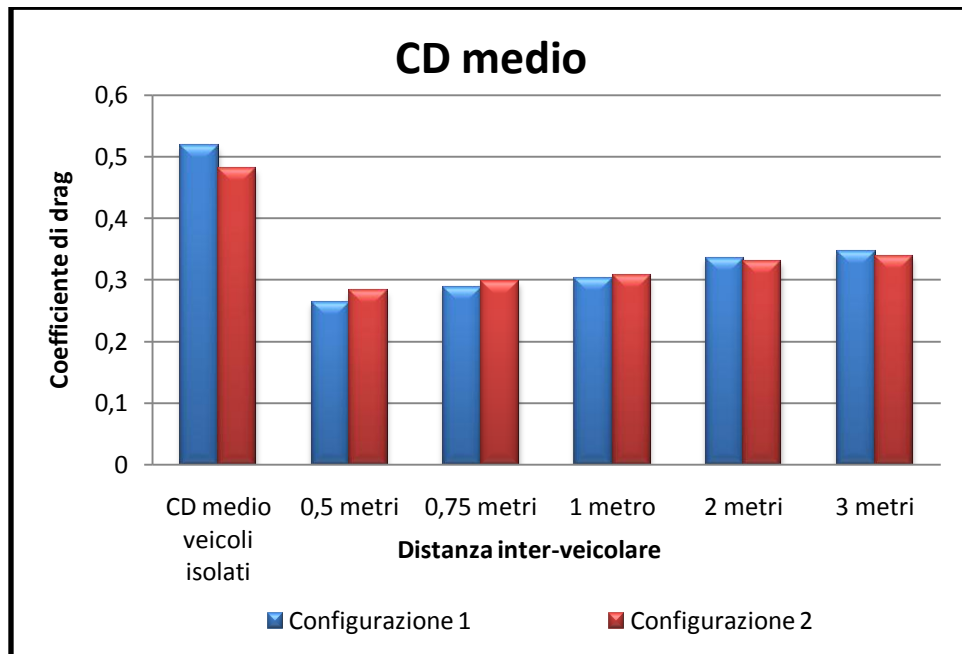


Figura 4.57 Coefficiente medio di resistenza aerodinamica nelle configurazioni 1 e 2 al variare della spaziatura inter-veicolare

Come per il caso dei tre veicoli in fila anche in questo il coefficiente di resistenza medio è minore per la configurazione 1 fino ad una spaziatura inter-veicolare ≤ 1 m, per spaziature maggiori risulta essere più vantaggiosa la configurazione 2.

5 Conclusioni

E' stato effettuato uno studio sulle forze di resistenza aerodinamica sui dei veicoli in configurazione di platoon. Si è trovato che la configurazione in platoon apporta notevoli riduzioni delle forze di resistenza aerodinamica.

Per quanto riguarda l'analisi sull'Ahmed Body nonostante gli errori introdotti dal modello numerico è possibile dire che il platoon di Ahmed Body presenta un vantaggio per angolo della superficie posteriore pari a 0° , mentre non presenta sempre un vantaggio in platoon se l'angolo della faccia posteriore è uguale a 30° in quanto i vortici che si generano sulla superficie posteriore influiscono negativamente sulla resistenza del veicolo che segue.

L'analisi condotta sui modelli dei veicoli evidenzia un minore coefficiente di resistenza aerodinamica sulla berlina in quanto l'angolo del lunotto posteriore permette di generare una scia minore. Ad ogni modo la scia generata dagli altri veicoli permette delle migliori performance del platoon di veicoli. Specialmente la presenza di un camion come veicolo guida assicura una buona riduzione della resistenza aerodinamica per i veicoli successivi. Un platoon di sole berline al contrario potrebbe avere meno efficienza di quello con veicoli con parte posteriore verticale. L'analisi ha inoltre evidenziato che aumentando il numero di veicoli posti in platoon si riduce il coefficiente medio di resistenza aerodinamica.

6 Nomenclatura

Di seguito è riportato l'elenco dei simboli utilizzati nel presente studio:

ρ = densità

t = tempo

T = periodo campione

u, v, w = componenti della velocità locale media

V = velocità del flusso libero

A = area frontale del veicolo considerato

C_D = coefficiente di resistenza aerodinamica

L = lunghezza del veicolo considerato

x = distanza tra due veicoli

Re = numero di Reynold

S_m = incrementi di massa

p = pressione statica

Γ = tensore degli sforzo

\vec{F} = forze di gravità del corpo e forze esterne che agiscono sul corpo

μ = viscosità molecolare

μ_t = viscosità turbolenta o (eddy viscosity)

I = tensore unitario

k = energia cinetica della turbolenza

ε = tasso di dissipazione

G_b = generatore dell'energia cinetica della turbolenza dovuta alla galleggiabilità

G_k = generatore dell'energia cinetica della turbolenza causata dal gradiente della velocità media

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ = costanti

C_μ = costante

σ_k = numero turbolento di Prandtl per k

σ_ε = numero turbolento di Prandtl per ε

S_k, S_ε = termini definiti dall'utente

$\overline{u^2}$ = sforzo normale

$\overline{\Omega_{ij}}$ = velocità di rotazione media

ω_k = velocità angolare

A_0, A_s = costanti del modello

α = angolo posteriore dell'Ahmed Bod

7 Bibliografia

- [1] Hall, R., Thakker, V., Horan, T., Glazer, J., Hoene, C., “Automated Highway System Field Operational Tests for the State of California: Potential Sites, Configurations and Characteristics”, California PATH Research Report UCB-ITSPRR- 97-45, 1997
- [2] Gillieron, P. and Chometon, F., “Modelling of Stationary Three-Dimensional Separated Air Flows Around an Ahmed Reference Model”. In ESAIM proc., volume 7 1999.
- [3] Krajnovic, S. and Davidson, L., “Large Eddy Simulation of the Flow Around a Simplified Car Model”, SAE Paper 2004-01-0227, 2004.
- [4] Hinterberger, Garcia-Villalba, M. and Rodi, W., “Large Eddy Simulation of flow around the Ahmed body”. In “Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics / The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses, and Trains”, R. McCallen, F. Browand, J. Ross (Eds.), Springer Verlag, ISBN: 3-540-22088-7, 2004.
- [5] Strachan R.K., Knowles K., and Lawson N.J., “CFD and Experimental Study of an Ahmed Reference Model”, SAE Paper 2004-01-0442, 2004.
- [6] Francis, T.M. and Sung-Eun, K., “Advances in External-aero Simulation of Ground Vehicles using the Steady RANS Equations”, SAE Paper 2000-01-0484, 2000.
- [7] Kapadia S., Roy S. and Wurtzler K., “Detached Eddy Simulation over a Reference
- [8] Ahmed, S.R., “Influence of Base Slant on the Wake Structure and Drag of Road Vehicles”, Transactions of the ASME, Journal of fluids engineering, Vol. 105, 1984.
- [9] Gotz, K.G., 1983. “Bewegungssehen and FlugsteuerungŽ bei der FliegeDrosophila”. In: Nachtigall, W. Ed. ,BIONA report 2. Fischer Stuttgart.

- [10] Abdel Azim, A.F. and Abdel Gawad, A.F., “A Flow Visualisation Study of the Aerodynamic Interference between Passenger Cars”, SAE Paper 2000-01-0355, 2000.
- [11] Zabat, M., Frascaroli, S., and Browand, F.K., “Drag Measurements on 2,3 and 4 Car Platoons”, SAE Paper 940421, 1994.
- [12] Watkins, S. and Vio, G., “On Vehicle Spacing and its Effect on Drag and Lift”, Proceedings, Fifth International Colloquium of Bluff Body Aerodynamics & Applications (BBAA5), Ottawa, Canada, July 2004.
- [13] California PATH, "Vehicle Platooning and Automated Highways," 1997.
- [14] Barnard, R.H., “Aerodynamics of Road Vehicles”, Fourth Edition, Society of Automotive Engineers, Warrendale Pa, 1998.
- [15] Hucho, W.H., “Aerodynamics of Road Vehicles”, Fourth Edition, Published by SAE Int. Warrendale Pa, 1998.
- [16] Schlichting H., “Boundary Layer Theory”, McGraw Hill Book Company, 1960.
- [17] Le Good, G. and Garry, K. P., “On the use of Reference Models in Automotive Aerodynamics”, SAE Paper 2004-01-1308, 2004.
- [18] Morel, T., “Aerodynamic drag of bluff body shape characteristics of hatch back cars”, SAE Paper 780267, 1978.
- [19] Lienhart, H., Stoots, C., and Becker, S., “Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Model)”, DGLR Fach Symp. der ASTAB, Stuttgart University, 15-17 Nov, 2000.
- [20] Sims-Williams, D. B., “Self-Excited Aerodynamic Unsteadiness Associated with Passenger Cars, PhD Thesis”, University of Durham, 2001.

- [21] Spohn, A. and Gillieron, P., “Flow Separations Generated by a Simplified Geometry of an Automotive Vehicle”, IUTAM Symposium, 2002.
- [22] Vio, G., Watkins, S., Mousley, P., Watmuff, J., Prasad, S., “The Unsteady Near-Wake of a Simplified Passenger Car”, 15th Australasian Fluid Mechanics Conference, Sydney, 2004.
- [23] Nouzawa, T, Haruna, S, Hiasa, K, Nakamura, T. and Sato, H, “Analysis of WakePattern for Reducing Aerodynamic Drag of Notchback Model”, SAE Paper 900318, 1990.
- [24] Nouzawa, T., Hiasa, K., Yoshimoto, M. and Haruna, S., “Influence of Geometry of Rear Part on the Aerodynamic Drag and Wake Structure of a Vehicle”, Mazda Motor Corp, Technical Report, 1992.
- [25] FLUENT Inc., “FLUENT 6.0 User’s Guide”, 2001.
- [26] Johnson, S.A., Hourigan, K. and Thompson, M.C., “Effect of Aspect ratio on the Wake Structures of Simplified Automotive Geometries”, FLAIR, Department of Mechanical Engineering, Monash University, Australia, 2004.