



POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aeronautica

Studio dell'aerodinamica di un prototipo di vettura partecipante alla Shell Eco-Marathon

Relatore: Prof. Giuseppe Gibertini

Pirovano Raul 721055

Querena Carlo 720669

Anno Accademico 2009/2010

INDICE

Elenco dei simboli	6
Introduzione	9
1. Shell Eco-Marathon	11
1. La storia	11
2. Regolamento.....	13
3. Evoluzione della vettura	14
Why not	14
Artemide	15
2. Studi preliminari	18
1. Importanza dell'aerodinamica a basse velocità.....	18
2. Corpi assialsimmetrici.....	21
Confronto tra le geometrie	27
3. Sonda a filo caldo	29
1. L'attrezzatura di prova	29
Realizzazione della sonda	29
Piano utilizzato	34
Striscia di transizione	41
2. Configurazione di prova.....	43

Strumentazione	45
3. Risultati ottenuti	46
Elaborazione del segnale	46
Presentazione dei risultati	48
Intermittenza	51
Ulteriori considerazioni	56
4. Configurazione di prova.....	59
1. Prove automobilistiche.....	59
Problematiche tipiche delle prove automobilistiche	60
Configurazioni di galleria	60
Considerazioni aggiuntive.....	62
2. Strumentazione.....	63
Galleria del vento	63
Piano di appoggio	64
Sensori.....	66
3. Correzioni.....	67
5. Dati sperimentali	68
1. Prove sul corpo della vettura.....	68
Filo caldo	68
Bilancia	76
2. Prove su alcuni dettagli	79
3. Analisi dell'errore	84

6. Simulazioni numeriche	86
1. Basi teoriche e modelli di turbolenza.....	87
Scelta del modello di calcolo	88
2. Modello del veicolo.....	90
3. Condizioni al contorno.....	92
4. Discretizzazione del modello	93
5. Influenza del punto di transizione.....	95
6. Confronto con i dati sperimentali	97
7. Conclusioni	101
Indice delle figure	104
Bibliografia	107

ELENCO DEI SIMBOLI

Simbolo	Definizione	Unità di misura
A	Sezione frontale del veicolo	m ²
C	Sezione della camera di prova	m ²
C _D	Coefficiente di resistenza	-
C _L	Coefficiente di portanza	-
C _f	Coefficiente di attrito	-
C _p	Coefficiente di pressione	-
C _x	Coefficiente di forza longitudinale	-
C _{dv}	Coefficiente di resistenza volumetrico	-
F	Forza	N
FS	Fondoscala	-
H _i	Potere calorifico inferiore	J/kgK
K	Costante sperimentale di rugosità	-
Ma	Numero di Mach	-
Q	Portata volumica	l/s
R	Num. di Reynolds del flusso indisturbato	-
RMS	Deviazione standard	-
R ₀	Resistenza al rotolamento	N
R _a	Resistenza aerodinamica	N
R _i	Resistenza legata al peso	N
R _{tot}	Resistenza totale	N
Re	Numero di Reynolds	-
Re _v	Numero di Reynolds volumetrico	-
S _x	Sezione frontale	m ²
SC _x	Coefficiente di forma	m ²
U _∞	Velocità asintotica	m/s

U_0	Velocità a potenziale	m/s
V	Volume	m^3
W_{comb}	Potenza legata al combustibile	W
W_r	Potenza resistente	W
a_{ij}	anisotropia degli sforzi di Reynolds	-
c	Corda	m
C_{medio}	Autonomia	km/l
f	Coefficiente d'attrito	s^2/m^2
g	Accelerazione di gravità	m/s^2
h	Altezza della striscia di transizione	mm
k	Energia cinetica turbolenta	m^2/s^2
m	Massa	kg
\dot{m}	Portata massica	kg/s
q_c	Pressione dinamica corretta	Pa
q_u	Pressione dinamica	Pa
u_τ	Velocità a parete	m/s
v	Velocità	m/s
x	Coordinata longitudinale	m
x_{tr}	x di transizione	m
y	Ordinata (2D)	m
y	Coordinata curvilinea (3D)	m
y_{tr}	y di transizione	m
y^+	Unità di parete	-
δ	Spessore di strato limite	mm
ε	Dissipazione viscosa	m^2/s^3
ε_B	Correzione di bloccaggio	-
ε_{relF}	Errore sulla forza	-

ϵ_{reldin}	Errore sulla pressione dinamica	-
η_{mot}	Rendimento motore	-
η_t	Rendimento trasmissione	-
θ	Spessore di quantità di moto	m
ν	Viscosità cinematica	m^2/s
ν_t	Viscosità cinematica turbolenta	m^2/s
ρ	Densità	kg/m^3
τ	Coef. geometrico camera di prova	-
τ_w	Sforzi tangenziali	N/m^2

Introduzione

La competizione internazionale Shell Eco-Marathon ha come obiettivo la realizzazione di un veicolo che consumi la minor quantità possibile di carburante: il soddisfacimento di tale richiesta non può prescindere da un accurato studio dell'aerodinamica del corpo al fine di minimizzarne la resistenza.

Le specifiche stringenti dettate dal regolamento hanno portato i top team ad avere geometrie della vettura piuttosto simili, con caratteristiche tali da non poterle inserire all'interno di una classe di veicoli già esistenti. La necessità di minimizzare la resistenza aerodinamica ha portato ad avere un corpo affusolato, privo di evidenti imperfezioni superficiali, con configurazione a triciclo anteriore, ruote carenate e corpo vettura rialzato da terra. Geometrie di questo genere sono pertanto abbastanza particolari e sino ad ora non sono mai stati condotti studi approfonditi al riguardo. Appare evidente un certa analogia con i corpi assialsimmetrici, in particolar modo per ciò che concerne il corpo vettura, ma la presenza delle carenatura delle ruote e di una sezione non perfettamente circolare non consente di stabilire a priori quanto ci si discosti dai risultati ottenuti dagli studi effettuati in passato su geometrie con tali caratteristiche. È in questo contesto che si inserisce il presente lavoro, nel quale si è studiata l'aerodinamica del prototipo sviluppato dal Politecnico di Milano, denominato Artemide, traendone informazioni utili a futuri sviluppi progettuali.

Una caratterizzazione completa di un corpo la cui resistenza è data in buona parte dall'attrito non può prescindere dalla conoscenza del punto di transizione, in quanto lo strato limite, una volta divenuto turbolento, presenta valori di sforzi di

taglio decisamente più elevati rispetto alle zone di laminarità. I primi studi condotti a tal proposito su geometrie simili a quelle dei veicoli analizzati furono eseguiti su corpi assialsimmetrici immersi in acqua. Carmichael dimostrò che per bassi numeri di Reynolds, inferiori a $40 \cdot 10^6$, è possibile ottenere superfici con ampie zone di laminarità, in grado di ridurre fino al 60% la resistenza sul corpo esaminato: è evidente quindi come la conoscenza del punto di transizione sia di primaria importanza all'interno del presente lavoro. Per poter tracciare sperimentalmente in galleria del vento la linea di transizione sulla scocca di Artemide si è appositamente realizzata e collaudata la strumentazione necessaria. Parallelamente alle prove in galleria del vento sono state effettuate simulazioni numeriche sul modello della vettura che hanno confermato i risultati sperimentali ed hanno permesso di individuare le zone in cui si genera la maggior parte della resistenza aerodinamica.

I risultati ottenuti hanno permesso di individuare le peculiarità di questa categoria di veicoli, evidenziarne i limiti e fornire indicazioni utili per una ulteriore ottimizzazione del modello.

1.

SHELL ECO-MARATHON

1. LA STORIA

La Shell Eco-Marathon è uno dei più importanti progetti internazionali promossi dalla compagnia petrolifera Shell; la competizione ha come obiettivi primari l'educazione e la formazione professionale dei giovani in ambito di protezione dell'ambiente, dell'efficienza energetica e del riconoscimento delle diversità individuali e culturali. Essa vede sfidarsi giovani ingegneri e progettisti provenienti da tutto il mondo nell'ambito dell'esplorazione e della sperimentazione di tecnologie e carburanti in grado di fornire una risposta concreta alla necessità mondiale di creare forme di trasporto eco-compatibile. La sfida consiste nel progettare, costruire e guidare un veicolo che consumi il meno carburante possibile: a vincere la Shell Eco-Marathon infatti non è il veicolo più veloce, ma quello che percorre più chilometri con meno carburante.

Dalla prima edizione della manifestazione, avuta luogo nel 1985, la manifestazione ha riscosso un crescente successo, basti pensare che nel 2005 vi hanno partecipato più di 200 squadre per un totale di più di 5000 studenti.

La competizione ha due differenti ambiti ai quali è possibile partecipare:

1. prototipi, per i quali l'unico vincolo di design è rappresentato dalla massimizzazione dell'efficienza e della minimizzazione delle emissioni;
2. veicoli così detti "Urban Concept", costruiti secondo criteri convenzionali dei veicoli da strada.

I veicoli possono essere alimentati tramite carburanti tradizionali, quali diesel, benzina, GPL, o carburanti alternativi, quale energia solare o elettrica, idrogeno o combustione delle biomasse.

Al fine di giudicare equamente i diversi tipi di energia impiegata alle squadre partecipanti viene richiesto di completare una certa distanza in un tempo dato. La velocità media minima a cui si dovranno completare i giri è pari a 30 km/h, che corrisponde alla velocità media con cui ci si muove nei percorsi urbani. Il totale dell'energia consumata è poi calcolata ed espressa in termini dell'equivalente in chilometri/litro per l'Europa o di miglia/gallone per gli Stati Uniti.

Lo schieramento dei veicoli offre una chiara indicazione di come i giovani scienziati e tecnici di oggi possano influenzare il trasporto di domani e i numeri sono da fantascienza: il record assoluto è detenuto proprio dal Politecnico di Milano, avendo raggiunto i 7070 km/l se il veicolo fosse stato alimentato a benzina, nella configurazione della vettura con la presenza di pannelli solari. In particolare Apollo, la versione ad energia solare di Artemide, ha percorso 796 Km con un kWh. Per comprendere l'eccezionale sviluppo negli anni di questi prototipi si pensi che nel 1985 il record fu di soli 680 km/l.

Il Politecnico ha deciso di partecipare a questa prestigiosa competizione nella categoria dei prototipi. La progettazione e lo sviluppo della nuova macchina è stata frutto di una sinergia all'interno del Politecnico: in particolare sono stati coinvolti il dipartimento di ingegneria meccanica, energetica e aerospaziale. Il primo si è occupato della meccanica del veicolo, il secondo del motore, il terzo dell'aerodinamica. In questo lavoro ci si occuperà quindi dello studio dell'aerodinamica della carrozzeria della vettura. Essendo la vettura già realizzata è stato possibile provarla al vero nella galleria del Politecnico.

Nel corso degli anni i team più competitivi hanno sviluppato una geometria di veicolo molto simile tra di loro, la quale prevede un triciclo anteriore con ruote carenate e il corpo vettura rialzato da terra.



FIGURA 1 - VETTURA PACCAR, CONCORRENTE DI ARTEMIDE

2. REGOLAMENTO

Il regolamento impone le seguenti specifiche:

Specifiche vettura	Valore
Massa vettura	< 25 kg
Massa pilota	< 45 kg
Numero ruote	3
Ruota motrice	Posteriore
Ruota sterzante	Posteriore
Passo vettura	1.5 m
Sezione trasversale	< 0.35 m ²
C_x	< 0.12
Larghezza massima	0.11 m
Appendici	Vietate

3. EVOLUZIONE DELLA VETTURA

All'interno del Politecnico di Milano, sino ad oggi, sono stati realizzati due prototipi: "Why not" e "Artemide".

WHY NOT

La prima partecipazione del Politecnico di Milano alla manifestazione risale al 2005. Solo l'anno successivo tuttavia la vettura è stata in grado di completare il percorso percorrendo 464 km con un litro di carburante.

Il primo prototipo, denominato "Why not", era costituito da un telaio in alluminio abbastanza imponente e la superficie frontale era di conseguenza abbastanza elevata, circa 0.39 m^2 . Le ruote erano tre, interamente inglobate nell'abitacolo per ridurre la resistenza aerodinamica, con ruota posteriore sterzante. L'obbligatorio roll-bar sopra la testa del pilota ha poi praticamente determinato l'ingombro frontale. Le prove condotte in galleria del vento hanno evidenziato una bolla di separazione sui rigonfiamenti della carrozzeria in corrispondenza delle ruote anteriori.



FIGURA 2 - PROTOTIPO "WHY NOT", FOTO

La parte posteriore della vettura è stata oggetto di grande attenzione in quanto sede dei meccanismi sterzanti. La rotazione avveniva mediante lo spostamento della parte del telaio che reggeva la ruota: così facendo si è riusciti ad ottenere una elevata escursione della stessa ottenendo il necessario effetto sterzante, ma provocando la necessità di creare una grande apertura nella coda della vettura.

ARTEMIDE

L'intento progettuale primario del nuovo veicolo è stato la realizzazione di un prototipo che potesse competere con le migliori università del mondo e che potesse ambire in pochi anni alla vittoria della competizione. L'obiettivo principale è stato quello di minimizzare la totalità delle resistenze meccaniche che il veicolo incontra all'avanzamento, data dalla somma di resistenza aerodinamica, resistenza al rotolamento, resistenza all'avanzamento in curva e resistenza all'avanzamento in pendenza.

Del veicolo "Why not" è stata mantenuta l'idea del comando dello sterzo, eliminando però la rotazione del telaio posteriore che, oltre a portare ad un aumento eccessivo dello spazzolamento in curva incrementando le perdite associate, obbliga a dover garantire un'ingente spazio di manovra sul posteriore del veicolo. Si è deciso di concepire inoltre una ruota che potesse ruotare direttamente attorno al proprio asse verticale durante la manovra di sterzo, assicurando solo un modesto braccio a terra, per stabilizzare la marcia del veicolo.

Il sistema di trasmissione è stato pensato in modo da limitare gli ingombri per poter ridurre il più possibile le dimensioni della parte posteriore del veicolo. Per garantire invece una minima resistenza al rotolamento delle ruote, sono stati mantenuti i medesimi pneumatici (e quindi le stesse dimensioni delle ruote) ma è stato abbandonato l'uso di ruote lenticolari in fibra di carbonio, date le scarse tolleranze ottenibili con il ciclo di fabbricazione che inducevano dei movimenti oscillatori alla ruota, dissipando energia. Queste sono state sostituite da delle ruote appositamente progettate e realizzate in lega di alluminio direttamente dal pieno.

Per ridurre le resistenze aerodinamiche è stato indispensabile pensare di ridurre la sezione maestra del veicolo, utilizzando la carreggiata minima consentita dal regolamento, pari a 50 cm, ed è stata analizzata immediatamente la possibilità di utilizzare un angolo di camber non nullo, in modo da poter ridurre ancora la sezione maestra, lasciando invariata la carreggiata al limite regolamentare.

Inoltre per evitare il contributo alla resistenza aerodinamica dato dall'interferenza con il suolo si è optato per il disegno di una vettura alta da terra. Lo studio del telaio ha condotto all'eliminazione del pesante e voluminoso telaio in tubi di alluminio, sostituito con una più raffinata scocca portante in fibra di carbonio. Questa tuttavia deve essere sufficientemente rigida da sopportare le sollecitazioni statiche e dinamiche provenienti dai collegamenti alle ruote, ma soprattutto dal pilota che rappresenta la massa più significativa all'interno del veicolo.

L'intera progettazione ha poi dovuto confrontarsi con i vincoli imposti da un regolamento molto stringente ed articolato atto a garantire una sufficiente sicurezza di marcia.

Si riportano le peculiarità geometriche e prestazionali della vettura:

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE	
Superficie frontale	0.28 m ²
Peso	37 kg
Lunghezza	2750 mm
Larghezza	590 mm
Altezza	620 mm
Peso	1600 mm
Carreggiata	500 mm
Pneumatici	45/75 R16

FUEL CELL	
Potenza	0,5 ÷ 0,75 kW
Tensione	40 ÷ 18 V
Numero Celle	30 ÷ 40
Sovrapressione	0,4 ÷ 0,5 bar

MOTORE	
Potenza	150 W
Tensione	24 V
Coppia	0,145 Nm
Rendimento	0,91



FIGURA 3 – ARTEMIDE

2.

STUDI PRELIMINARI

Prima di procedere con studi numerici e sperimentali è importante comprendere l'importanza rivestita dalla resistenza aerodinamica a basse velocità e come una diminuzione di quest'ultima possa portare a un miglioramento dal punto di vista delle prestazioni della vettura. Inoltre, non essendo ben nota la fenomenologia legata a geometrie di questo tipo, si sono presi a riferimento studi presenti in letteratura su corpi il più possibile riconducibili a quello in esame, quali i corpi assialsimmetrici.

1. IMPORTANZA DELL'AERODINAMICA A BASSE VELOCITÀ

Il prototipo realizzato difficilmente supererà i 40 km/h; si potrebbe quindi pensare che non sia necessario, in tali condizioni operative, un accurato studio aerodinamico del mezzo. Risulta pertanto importante riuscire ad effettuare una stima di quanto possa incidere sui consumi una diminuzione della resistenza aerodinamica.

Per effettuare questo studio si è fatta l'approssimazione di assumere il veicolo in moto rettilineo uniforme: si sono quindi trascurate le accelerazioni e la presenza

di curve nel circuito. In questo modo la resistenza totale all'avanzamento può essere vista come somma di tre differenti componenti, la prima legata alla forza peso, la seconda legata al rotolamento e la terza alla resistenza aerodinamica:

$$R_{tot} = R_i + R_o + R_A$$

con:

$$R_i = mg \sin \alpha$$

Considerando tuttavia trascurabile il dislivello del circuito, questa prima componente di resistenza può essere considerata nulla. Per la seconda componente vale:

$$R_o = (f_o + f v^2) mg \cos \alpha$$

in cui f_o è dovuto allo spostamento in avanti del centro di pressione nell'area di contatto, mentre il secondo termine, legato al quadrato della velocità, è generato dallo strisciamento del pneumatico sull'asfalto. Possiamo indicativamente assumere $f_o = 0.003$ e $f = 5 \cdot 10^{-6} \text{ s}^2 \text{ m}^{-2}$.

L'ultima componente è la resistenza aerodinamica:

$$R_A = \frac{1}{2} \rho S_x c_x v^2$$

in cui S_x rappresenta la sezione di bloccaggio, mentre c_x è il coefficiente di resistenza aerodinamica.

Se, in prima approssimazione, si assumono una velocità di $35 \text{ km/h} = 9.7 \text{ m/s}$, una sezione di 0.28 m^2 , un c_x di 0.14 e una massa di 70 kg , si ottiene:

$$R_o = 2.30 \text{ N}$$

$$R_A = 2.27 \text{ N}$$

$$R_{tot} = 4.57 \text{ N}$$

Appare evidente come la resistenza aerodinamica costituisca circa il 50% della resistenza totale. È importante poi determinare il consumo medio della vettura a 35

km/h, velocità media alla quale viene percorso il circuito. La potenza resistente si calcola come segue:

$$W_r = R_{tot} v = 44.43 \text{ W}$$

Il valore di potenza fornita dal carburante è pari a:

$$W_{comb} = \frac{W_r}{(\eta_{mot}\eta_t)} = 152.68 \text{ W}$$

in cui η_{mot} ed η_t sono rispettivamente rendimento del motore, pari a 0.3 e rendimento della trasmissione a catena pari a 0.97.

Essendo noto il potere calorifico inferiore del combustibile $H_i = 43300000 \text{ J/kgK}$, è possibile calcolare la portata massica di combustibile:

$$\dot{m} = \frac{W_{comb}}{H_i} = 3.52 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

E avendo a disposizione il valore di densità del combustibile, pari a $\rho = 750 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, è possibile calcolare la portata volumica di combustibile che ne deriva:

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} = 4.70 \cdot 10^{-6} \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

Se si divide il valore appena ottenuto per la velocità media si ricava l'autonomia:

$$C_{medio} = \left(\frac{Q}{v}\right)^{-1} = 2068 \frac{\text{km}}{\text{l}}$$

È ora possibile analizzare l'andamento della percorrenza media al variare del coefficiente c_x (figura 4). Si nota immediatamente come una diminuzione del c_x comporti un grande aumento di autonomia anche per valori di velocità non particolarmente elevati. Ad esempio, portando il c_x da 0.12 a 0.10, si ottiene un aumento di autonomia di quasi 200 km.

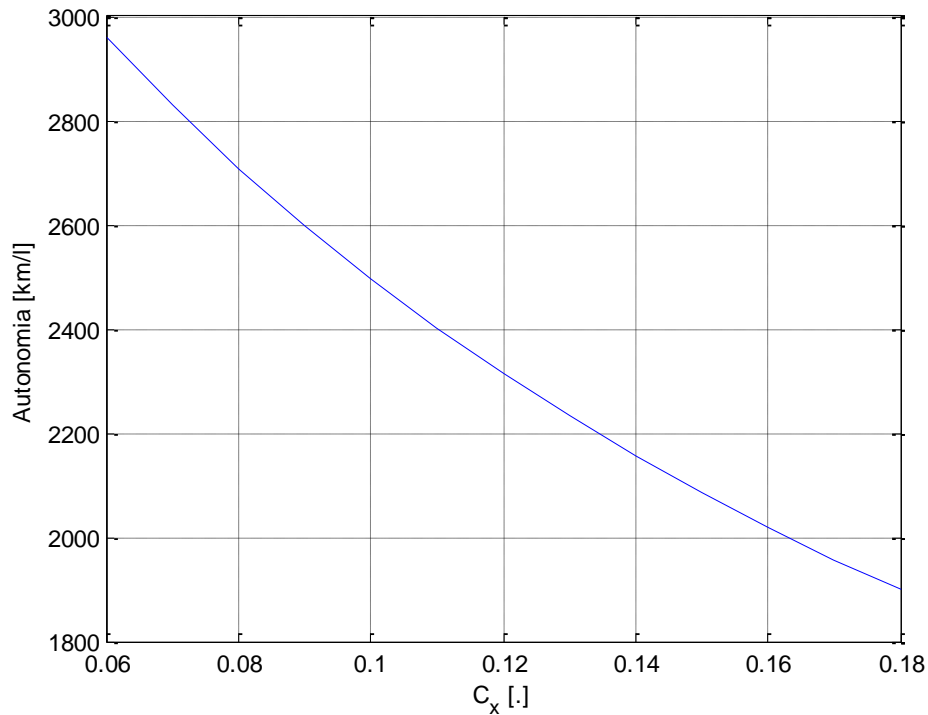


FIGURA 4 - ANDAMENTO DELL'AUTONOMIA IN FUNZIONE DEL COEFFICIENTE C_x

2. CORPI ASSIALSIMMETRICI

Fin dai primi anni '50 sono stati condotti diversi studi riguardanti la minimizzazione della resistenza sui corpi assialsimmetrici. Gertler¹ fu il primo ad occuparsi del problema indagando possibili forme da utilizzare per la realizzazione di sottomarini: il suo lavoro prevedeva lo studio di diverse geometrie, pur non coinvolgendo il fenomeno della transizione. I valori dei coefficienti di resistenza ottenuti mediante studi sperimentali sono rappresentati in figura 5.

¹ M. Gertler, "Resistance experiments on a systematic series of streamlined bodies of revolution – For application to the design of high speed submarines", Navy Dept., 1950

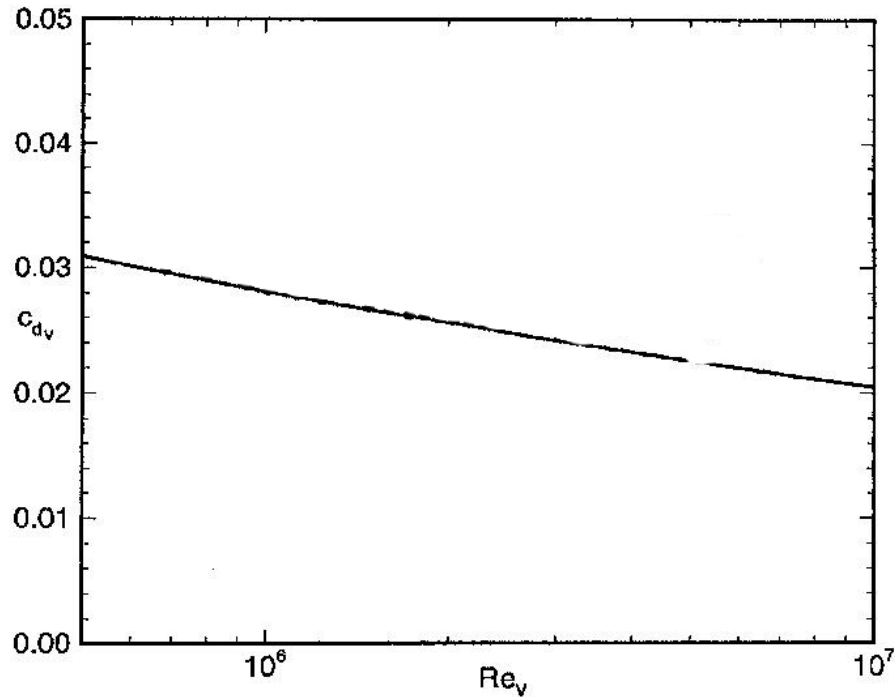


FIGURA 5 - CURVA DI RESISTENZA AL VARIARE DEL REYNOLDS, GERTLER 4154

in cui il coefficiente di resistenza volumetrico è definito come:

$$C_{dv} = \frac{R}{(\rho/2)U_{\infty}^2 V^{2/3}}$$

In corpi di questo tipo la resistenza d'attrito rappresenta più della metà della resistenza totale, ed essa è strettamente legata al punto di transizione. Per tale motivo studi successivi, condotti da Carmichael², hanno posto particolare attenzione su questo importante aspetto, ricercando geometrie che consentissero di ottenere zone di laminarità più ampie possibili, evitando separazioni. In particolare lo stesso Carmichael realizzò e provò in oceano un modello di bulbo denominato "Dolphin 1", la cui resistenza all'avanzamento risultò essere, in certe condizioni operative, fino al 60% inferiore a quella dei bulbi tradizionali allora esistenti.

² B. H. Carmichael, "Underwater drag reduction through optimum shape", AIAA, New York, 1966

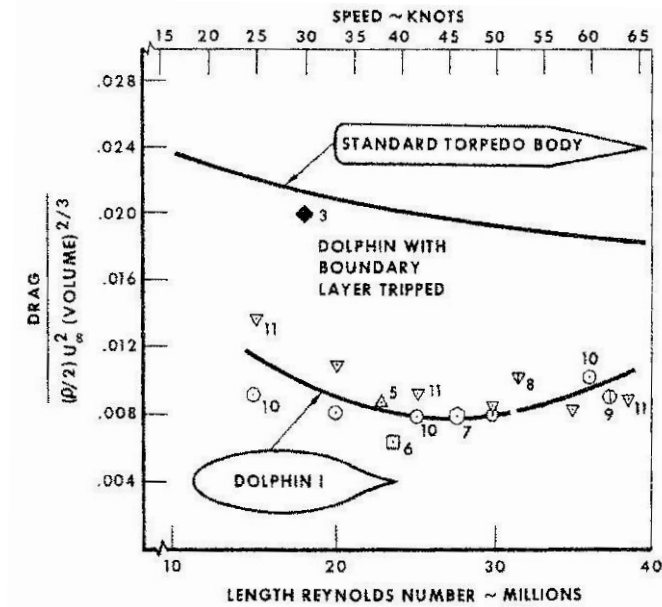


FIGURA 6 - CONFRONTO TRA CURVE DI RESISTENZA SPERIMENTALI, GERTLER E CARMICHAEL

Dalla figura è evidente l'abbattimento di coefficiente di resistenza ottenuto e validato dalla sperimentazione in mare al variare del numero di Reynolds.

L'importanza del punto di transizione è divenuta quindi l'oggetto dello studio di Carmichael, il quale è stato in grado di dimostrare come una posizione arretrata di quest'ultimo comporti indubbi benefici dal punto di vista della resistenza.

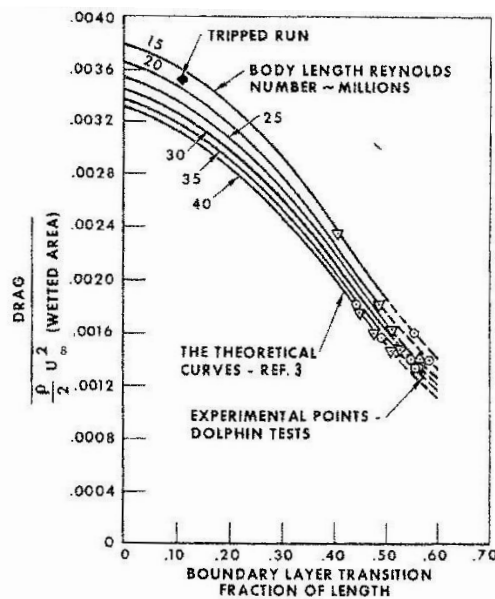


FIGURA 7 - STIMA DEL PUNTO DI TRANSIZIONE

Studi sperimentali condotti in seguito da Hansen e Hoyt³, sempre su corpi assialsimmetrici, hanno dimostrato analogamente quanto influisca il punto di transizione sul valore di resistenza. In particolare ciò è risultato evidente dal confronto tra valori sperimentali ottenuti in configurazione pulita e con striscia di transizione, posta a 20 cm dal punto di ristagno di un bulbo appositamente realizzato.

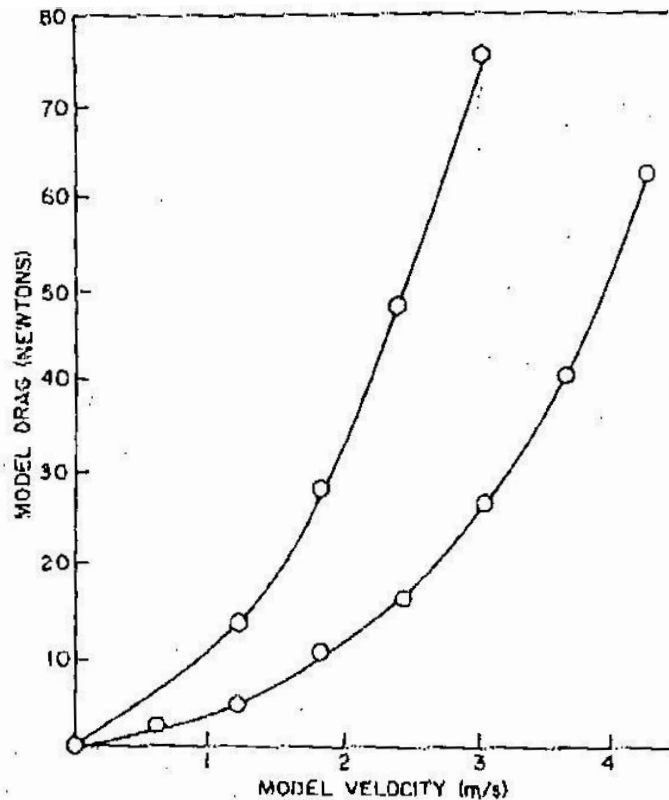


FIGURA 8 - CURVE DI RESISTENZA CON E SENZA STRISCE DI TRANSIZIONE

Il considerevole miglioramento ottenuto è strettamente legato alle caratteristiche intrinseche di questi corpi, i quali presentano una forma affusolata, estese zone di laminarità e sono privi di separazioni. In questo caso la resistenza d'attrito risulta essere predominante. Tali risultati non sono pertanto applicabili a qualsiasi forma, ma solamente a geometrie simili.

³ R. J. Hansen, J. G. Hoyt, "Laminar to turbulent transition on a body of revolution with an extended favorable pressure gradient forebody", Journal of fluids engineering, Vol. 106, 1984

Nel medesimo articolo è stato poi studiato l'andamento del coefficiente di resistenza volumetrico, definito in precedenza, al variare del numero di Reynolds volumetrico:

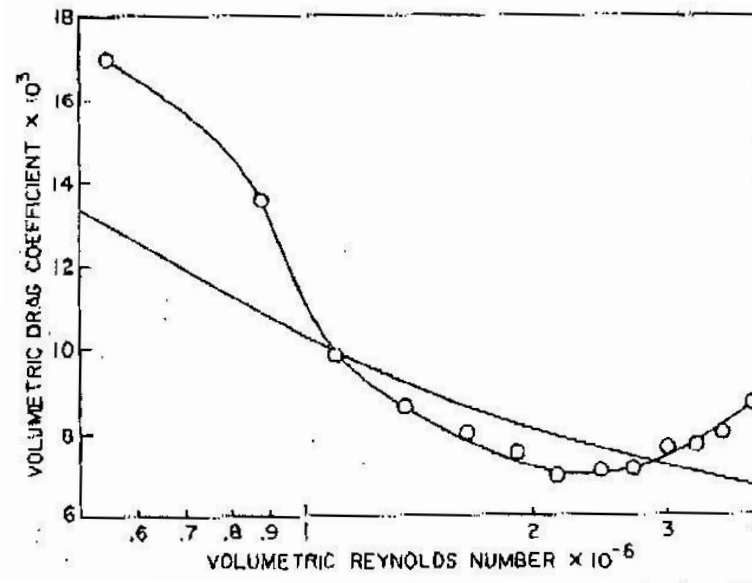


FIGURA 9 - RESISTENZA MISURATA E CALCOLATA IN FUNZIONE DEL REYNOLDS

Nella figura 9 la linea continua rappresenta la resistenza calcolata facendo coincidere il punto di transizione con quello di separazione laminare. All'aumentare del Reynolds, con la separazione che avviene sempre all'incirca nel medesimo punto, la curva ha andamento monotono discendente, legato alla diminuzione dello spessore dello strato limite. Risultati teorici e sperimentali si accordano solamente nell'intervallo $1 \cdot 10^6 < Re_v < 3 \cdot 10^6$; ad alti Reynolds infatti la resistenza cresce progressivamente, suggerendo un graduale aumento del fenomeno dell'intermittenza nella parte laminare dello strato limite o più probabilmente uno spostamento verso prua del punto di transizione che viene così a precedere quello che sarebbe stato il punto di separazione laminare. La grande discrepanza evidente a bassi Reynolds potrebbe invece essere dovuta alle bolle di separazione poste dietro il punto di separazione laminare che divengono più estese per valori bassi di velocità. Si nota comunque dalla figura un punto di minimo stabile in cui si raggiunge l'ottimo compromesso tra spessore dello strato limite e punto di transizione. Per valori di Reynolds più bassi infatti lo strato limite è molto spesso e

va ad aumentare la resistenza di pressione, per valori più alti invece è più sottile, ma il punto di transizione si sposta molto in avanti incrementando la resistenza.

Studi successivi, assieme all'evoluzione dei metodi numerici, hanno condotto alla determinazione di forme ottime per quello che riguarda i corpi affusolati assialsimmetrici. In particolare Lutz e Wagner⁴ hanno trovato le geometrie ottime al variare del numero di Reynolds, parametro da cui dipende fortemente il punto di transizione e di conseguenza la forma in pianta del corpo.

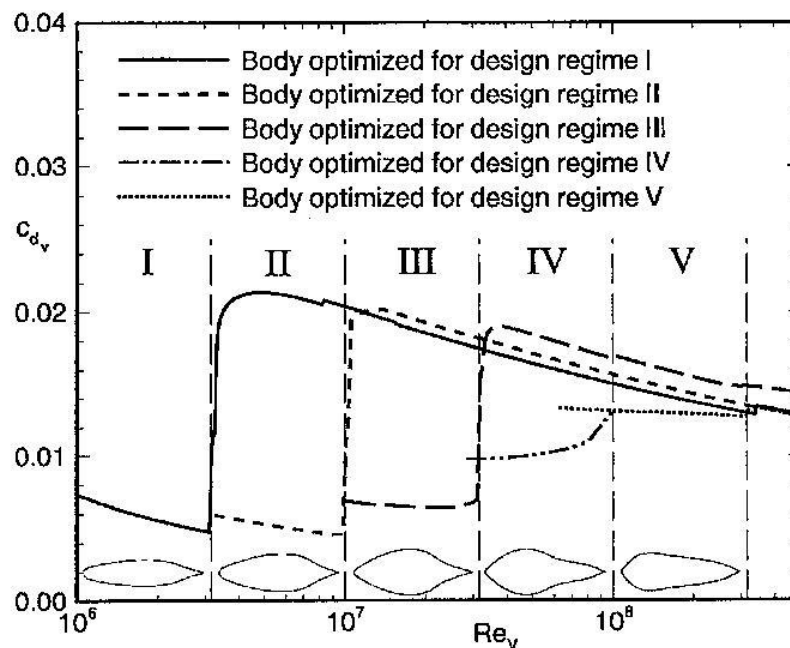


FIGURA 10 - CURVE DI RESISTENZA PER I CORPI OTTIMIZZATI

Si nota immediatamente come per le diverse geometrie il C_{dv} sia molto sensibile al numero di Reynolds infatti, appena al di fuori delle regione di progetto, il punto di transizione si sposta velocemente in avanti, causando un deciso aumento di resistenza: questo dimostra ancora una volta l'importanza di questo parametro. È evidente inoltre come all'aumentare del numero di Reynolds, l'ottimizzazione conduca a geometrie dallo spessore massimo maggiore e più prossimo al punto di ristagno.

⁴ T. Lutz, S. Wagner, "Drag reduction and shape optimization of airship bodies", Journal of aircraft, Vol. 35 No. 3, 1998

Per la nostra vettura è stato stimato un Re di $1.5 \cdot 10^6$, valore che rientra nel primo regime analizzato nello studio di cui sopra. In particolare il corpo è caratterizzato dalla posizione di massimo spessore molto arretrata e da una moderata e quasi costante accelerazione della corrente fino a questo punto. Teoricamente questo piccolo ma favorevole gradiente di pressione è sufficiente a mantenere lo strato limite laminare fino al 75% del corpo. Per questo motivo si riescono a ottenere valori di c_{dv} così bassi come mostrato in precedenza.

Francesco Bettinelli⁵ ha svolto una tesi di laurea sull'ottimizzazione dei corpi assialsimmetrici, all'interno della quale è stato in grado di proporre la geometria dell'attuale vettura partecipante all'Eco-Marathon, ottenendo una forma in pianta molto simile a quella soprastante.

Gli studi presentati nel capitolo sono volti alla minimizzazione del coefficiente di resistenza. È importante tuttavia ricordare che per ridurre la resistenza di un corpo aerodinamico le strade percorribili sono principalmente due: ridurre il coefficiente di resistenza oppure diminuire la superficie frontale. Poiché le dimensioni della superficie frontale sono imposte dalla presenza del pilota e del telaio e non è possibile ridurle ulteriormente, risulta ancora più importante la minimizzazione della resistenza d'attrito. In quest'ottica è fondamentale indagare sperimentalmente l'effettiva posizione del punto di transizione, presumibilmente diversa da quella stimata in quanto la vettura non è assialsimmetrica per la presenza delle ruote e delle giunzioni tra le varie componenti della carenatura.

CONFRONTO TRA LE GEOMETRIE

Un confronto tra i diversi modelli di bulbo consente di apprezzare maggiormente l'evoluzione avvenuta nel corso degli anni e l'importanza di un'ottimizzazione aerodinamica di questa tipologia di corpi e serve a definire dei termini di confronto per la vettura oggetto del nostro studio.

⁵ F. Bettinelli, "Ottimizzazione aerodinamica di corpi assialsimmetrici", Politecnico di Milano, 2008

Nelle figure 11 e 12 il coefficiente di resistenza C_x è riferito alla sezione frontale ed il numero di Reynolds è riferito alla lunghezza del corpo.

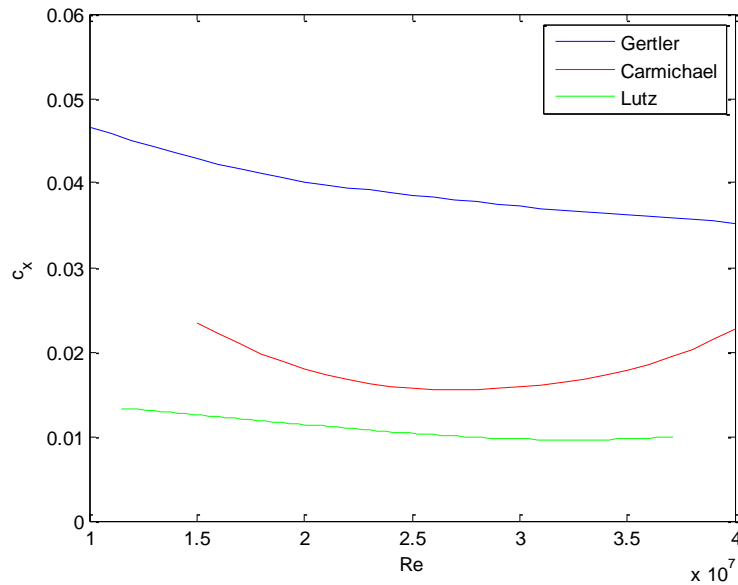


FIGURA 11 - CONFRONTO TRA C_x AL VARIARE DEL NUMERO DI REYNOLDS

Risulta evidente il netto miglioramento conseguito a uno studio di forme ottimizzate grazie ad uno studio approfondito del punto di transizione.

Poiché il numero di Reynolds di interesse è di $1.5 \cdot 10^6$ si riporta il confronto tra gli articoli di Hansen e Lutz relativamente a queste condizioni.

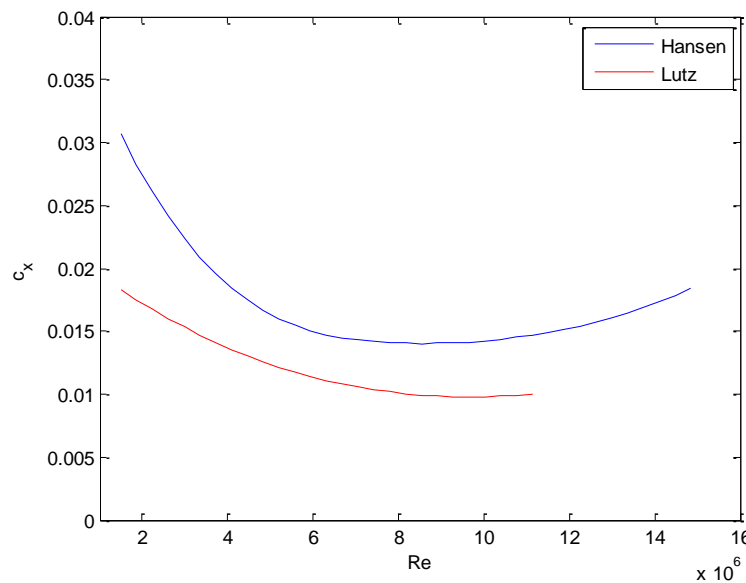


FIGURA 12 - CONFRONTO TRA C_x AL VARIARE DEL NUMERO DI REYNOLDS

3.

SONDA A FILO CALDO

Un aspetto fondamentale nello studio della resistenza generata dalla vettura consiste nell'individuazione sul corpo della linea di transizione dello strato limite. Ciò risulta indispensabile non solo per avere un panorama completo del flusso attorno alla vettura, ma anche per poter correttamente impostare le simulazioni numeriche, nelle quali si richiede di definire le zone da trattare come laminari e quelle in cui deve essere attivato il modello di turbolenza.

A questo scopo è stata costruita appositamente una sonda a filo caldo in grado di rilevare il comportamento dello strato limite. Infatti, grazie alla sua struttura, essa può essere posta in prossimità della parete, all'interno di quest'ultimo.

1. L'ATTREZZATURA DI PROVA

REALIZZAZIONE DELLA SONDA

Per rilevare l'insorgere della transizione nello strato limite si è optato per l'utilizzo di sonde a filo caldo. A tal fine sono state appositamente adattate alcune sonde anemometriche.

Per ritenere attendibili i risultati ottenuti è stato necessario verificare l'intrusività della sonda. Se infatti la presenza del filo caldo è tale da modificare in modo significativo il campo di moto, le considerazioni fatte sulla base dei segnali misurati potrebbero essere completamente errate e rappresentanti fenomeni lontani dalla realtà. Il metodo più immediato per comprendere i disturbi che la sonda crea alla corrente che lo investe consiste nell'effettuare una campagna di visualizzazioni.

La prima tipologia di sonda provata ha evidenziato immediatamente dei problemi, chiaramente visibili dalle figure 13.



FIGURA 13 - VISUALIZZAZIONI, PRIMA SONDA E BLOCCAGGIO

Risulta evidente una elevata intrusività: la corrente viene infatti rallentata in modo violento in corrispondenza del filo caldo, generando un forte bloccaggio e rendendo di conseguenza le misurazioni completamente inaffidabili.

Per evitare l'insorgere di un fenomeno simile si è utilizzato un modello diverso di sonda, del tipo da strato limite, con un corpo più alto, i due supporti del filo posti verso il basso e più lunghi. Dopo diversi tentativi, si è giunti ad una soluzione che incide molto poco sul campo di moto a parete, come si evince dalla foto.

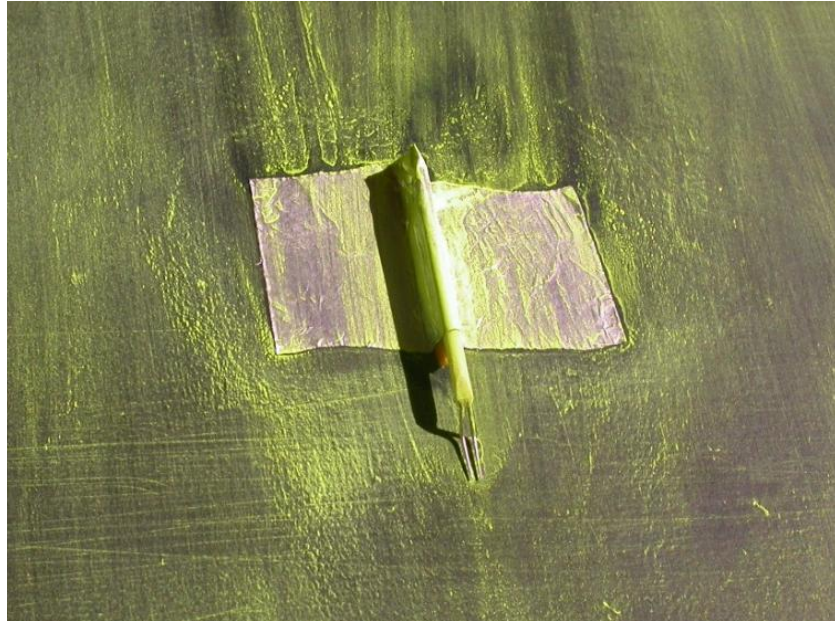


FIGURA 14 - VISUALIZZAZIONI, SONDA SENZA BLOCCAGGIO

Per poterle posizionare in prossimità della superficie del corpo è stato necessario realizzare un distanziale carenato in alluminio che consentisse di avvicinare il filo alla parete, evitando il contatto. Inoltre si sono inclinati verso il basso i supporti del filo per ottenere l'altezza desiderata; la sonda è stata poi vincolata alla parete tramite nastro adesivo di alluminio. Il risultato finale è mostrato in figura 15.

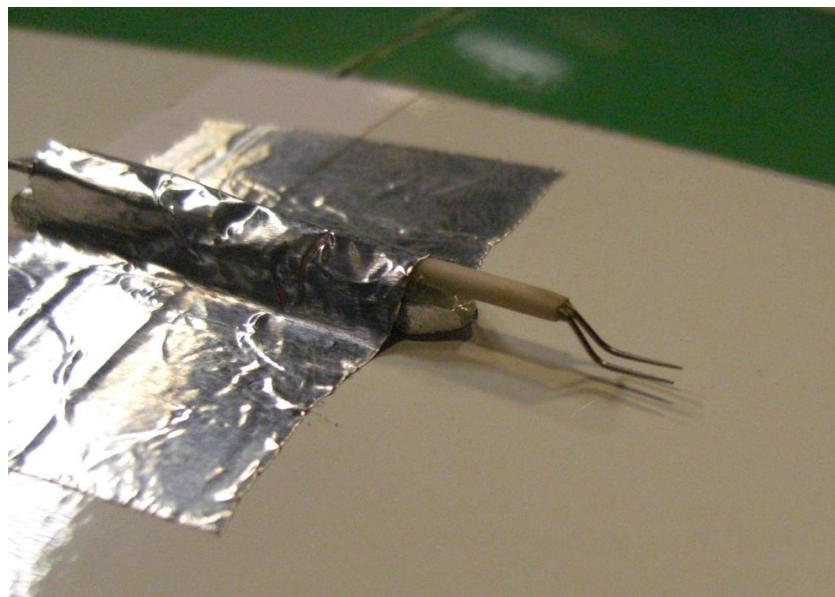


FIGURA 15 - SONDA UTILIZZATA

Poiché l'intervento ha richiesto una opportuna lavorazione che avrebbe potuto danneggiare il filo, si è optato per l'utilizzo di sonde il cui filo fosse già rotto, provvedendo poi alla sostituzione.

Per la riparazione delle sonde ci si è avvalsi della strumentazione apposita presente al Politecnico, che consta di un microscopio e di bracci meccanici, che consentono di fare da supporto alla sonda stessa, al filo di tungsteno, del diametro di $3\ \mu\text{m}$ e alla saldatrice.

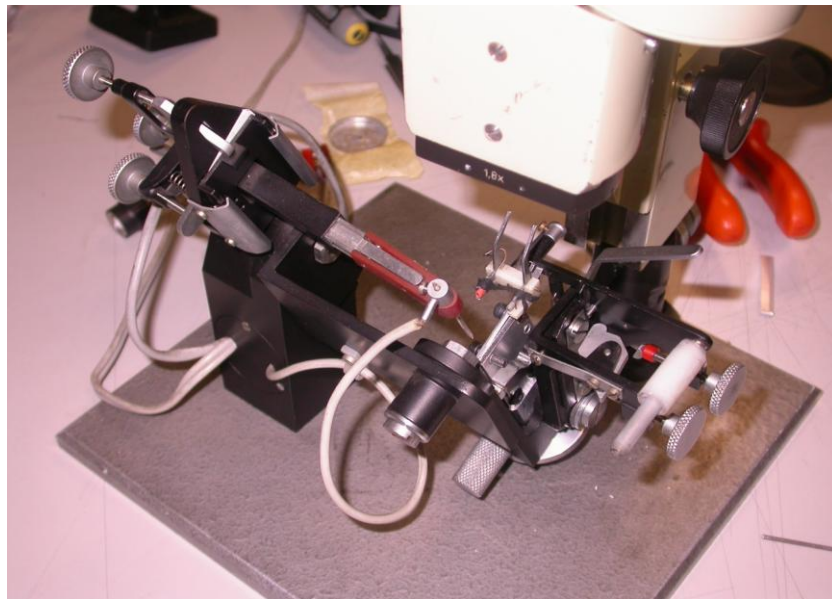


FIGURA 16 - ATTREZZATURA PER LA REALIZZAZIONE DELLA SONDA A FILO CALDO

In primo luogo si è posizionata la sonda rotta nel supporto. Si è quindi cercato di far coincidere parte del filo teso sui due supporti e si è avvicinata la saldatrice: questa, mediante una scarica elettrica, è in grado di saldare il filo alla sonda, mettendo a terra il supporto relativo al punto di saldatura: se la corrente infatti passasse nel filo lo brucerebbe all'istante.

L'operazione non è purtroppo semplice date le dimensioni davvero piccole; non è stato pertanto possibile realizzare più di due sonde. La foto sottostante mostra un'immagine della limitata zona di saldatura vista al microscopio.

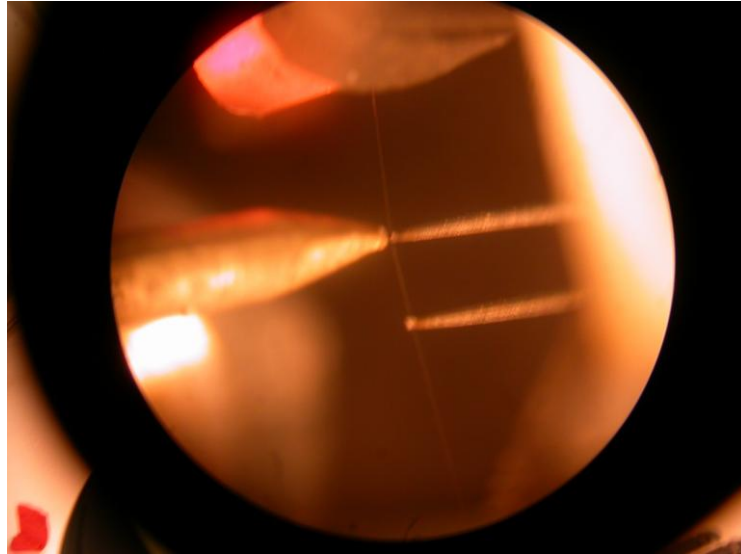


FIGURA 17 - SONDA, FILO E SALDATRICE AL MICROSCOPIO

Nella misure di strato limite è necessario tenere in considerazione l'andamento delle curve di taratura tipiche di un anemometro a filo caldo, le quali denotano un calo di sensibilità a bassa velocità. Il fenomeno è legato allo scambio termico per convezione naturale, che produce un raffreddamento del filamento anche in aria calma, non consentendo di rilevare adeguatamente velocità poco elevate. Per conoscere il limite inferiore misurabile in aria da una sonda a filo caldo si utilizza la legge empirica di Jorgensen (1979) ⁶, il quale constatò che tale limite mediamente varia da 0.15 a 0.20 m/s. Nelle misure che verranno effettuate sarà quindi necessario verificare di non rientrare in questo intervallo di velocità. I risultati a cui si è interessati sono in realtà abbastanza qualitativi, essendo di primaria importanza la posizione del punto di transizione, che dovrebbe essere denotato da una marcata modifica dello spettro di frequenze. Si potrebbe tuttavia incorrere in bolle di strato limite, in cui il ricircolo dell'aria può portare effettivamente ad avere dei valori di velocità prossimi allo zero; uno studio approfondito di queste zone esula però dal contenuto e dagli obiettivi del presente lavoro, sebbene si sia osservato, nel corso delle prove, anche questo fenomeno.

⁶ G. Lomas, "Fundamentals of hot wire anemometry", Cambridge University Press, 1986.

L'altezza a cui viene posizionata la sonda è un aspetto di grande importanza. Potrebbe infatti sembrare utile effettuare delle rilevazioni alla stessa quota dal piano, in termini di unità di parete. Questo permetterebbe di trovarsi ragionevolmente nelle stesse condizioni di strato limite, pur muovendoci lungo la superficie. Tuttavia calcolare in ogni punto lo spessore di strato limite, posizionandosi alla quota desiderata per effettuare le misure, sarebbe stato decisamente oneroso, soprattutto considerando che la sonda, per essere il meno intrusiva possibile e più facilmente spostabile, non è stata dotata di un supporto che le consenta di alzarsi con la precisione desiderata.

Si è comunque verificato che nello stesso punto, a diverse quote, lo spettro misurato ha sempre lo stesso andamento. Questo ovviamente non è vero all'interno del substrato viscoso, a cui non si è interessati dato che viene ricercata unicamente la transizione di strato limite. È parso subito evidente come le curve dello spettro di frequenza a diverse quote di uno strato limite completamente turbolento siano praticamente sovrapponibili. Sono presenti soltanto piccole variazioni di ampiezza: questo effetto è riconducibile ad una differente energia dello strato limite e ad una deviazione standard maggiore, ma non incide nella fase di riconoscimento della tipologia dello strato limite stesso.

PIANO UTILIZZATO

Per le prove relative alla sonda si è utilizzato un impianto del laboratorio didattico CLASD costituito da una galleria a circuito chiuso e camera di prova chiusa con sezione di 0.4 m x 0.4 m e velocità massima pari a 15 m/s.

La scelta del piano è stata oggetto di attenzione. Profili con curvature elevate non potevano essere adeguati, dato che la sonda si sarebbe trovata al di fuori dello strato limite appoggiandosi al piano tramite il supporto posteriore. Utilizzare una lamina piana sarebbe stato decisamente rischioso dato che essa, se posta a incidenza, tenderebbe a separare dal bordo di attacco. Come piano si è scelto quindi di ricorrere a quanto progettato da Alberto Maggioni in una tesi

sperimentale precedentemente discussa al Politecnico di Milano, volta al progetto di una piattaforma per prove motociclistiche.

Nella tesi si ricercavano le forme dei bordi di attacco e di uscita da collegare al tratto rettilineo in modo da avere distribuzione di pressione costante tale tratto, con C_p il più possibile prossimo allo zero. Per studiare le possibili configurazioni di prova ci si è serviti del codice di calcolo X-Foil, il quale consente di analizzare profili bidimensionali in campo subsonico. Nella realtà il piano risulta essere una sorta di ala ad apertura finita con allungamento pressoché unitario; gli effetti di tridimensionalità sono quindi tutt'altro che assenti, ma compiendo le misurazioni lungo il piano di simmetria e a bassi coefficienti di portanza è possibile trascurare questo aspetto. Il grande vantaggio di questa geometria è la possibilità di avere una superficie piana su cui effettuare le rilevazioni, potendo controllare facilmente l'altezza della sonda dalla superficie stessa.

La forma del piano è la seguente:

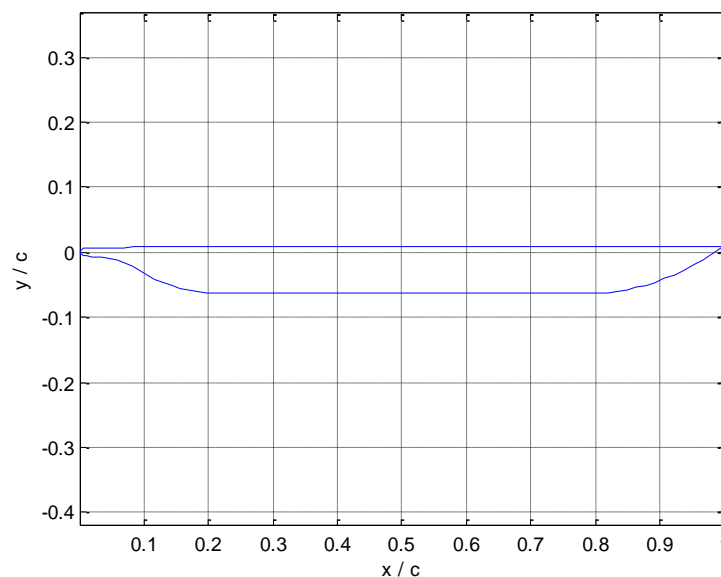


FIGURA 18 - SEZIONE DEL PIANO UTILIZZATO

Prima di utilizzare tale geometria per la prova se ne sono verificate le proprietà tramite X-Foil. In particolare si è cercata la posizione del punto di transizione per poter poi procedere alle misure con la sonda nell'intorno della zona di interesse. I

calcoli sono stati effettuati al numero di Reynolds $Re=263000$ corrispondente alle condizioni della prova e attribuendo il valore 6 all'esponente n del metodo e^n per la predizione della transizione⁷. Tale valore tiene conto del livello di turbolenza presente in camera di prova.

Dai risultati dei calcoli condotti con il codice X-Foil è risultato che ad incidenza nulla si genera una bolla di ricircolo, posta in corrispondenza del bordo d'attacco, lunga circa 2 cm.

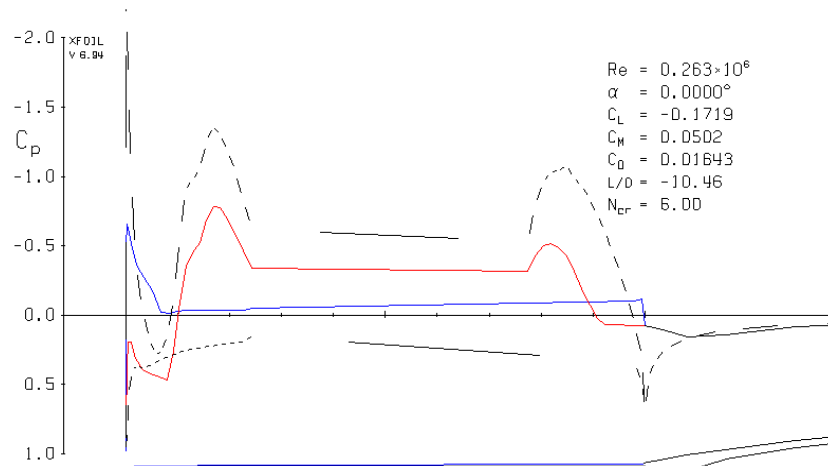


FIGURA 19 - Cp SUL PIANO AD INCIDENZA NULLA

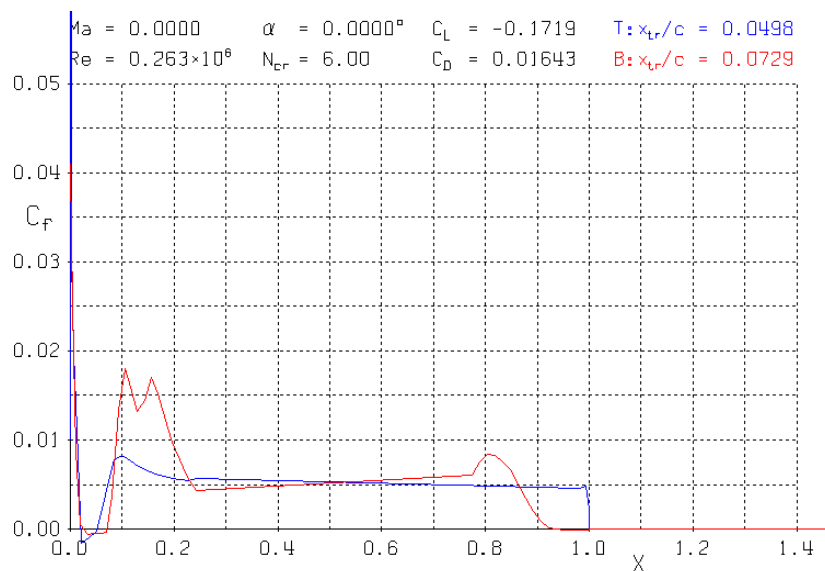


FIGURA 20 - Cf LUNGO IL PIANO AD INCIDENZA NULLA

⁷ Mark Drela, "Xfoil 6.9", 2001

Si nota infatti come siano presenti dei C_f negativi generati dal ricircolo dell'aria. È inoltre possibile osservare, dall'andamento dello strato limite a pochi centimetri dal bordo di attacco, un considerevole ispessimento di quest'ultimo.

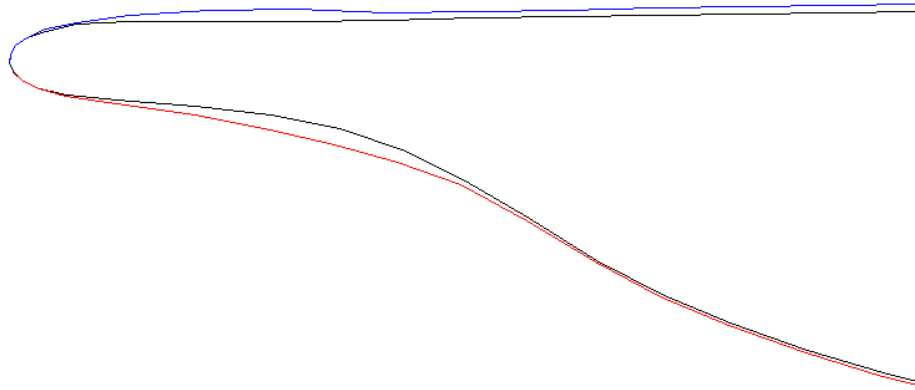


FIGURA 21 - ANDAMENTO DELLO SPESSORE DI STRATO LIMITE SUL NASO

Il fenomeno è causato dalla presenza di una bolla di ricircolo; questa è conseguenza di separazione laminare seguita da riattacco turbolento, che fa quindi diminuire lo spessore di strato limite. Questa problematica doveva essere risolta prima dell'inizio delle prove, in quanto ostacolo alla ricerca del punto di transizione e possibile fonte di ambiguità nell'interpretazione fisica del fenomeno.

Per essere il più possibile conformi alle condizioni ideali, studiate per via numerica, si è provveduto innanzitutto a lisciare il piano e a trattarlo con un'apposita vernice. La rugosità di parete infatti è una delle principali cause di transizione anticipata ed inoltre il colore nero della vernice ha facilitato le visualizzazioni.

Sono state eseguite quindi delle visualizzazioni di superficie sul piano posto a incidenza nulla, le quali hanno evidenziato la presenza della bolla in corrispondenza del bordo di attacco.

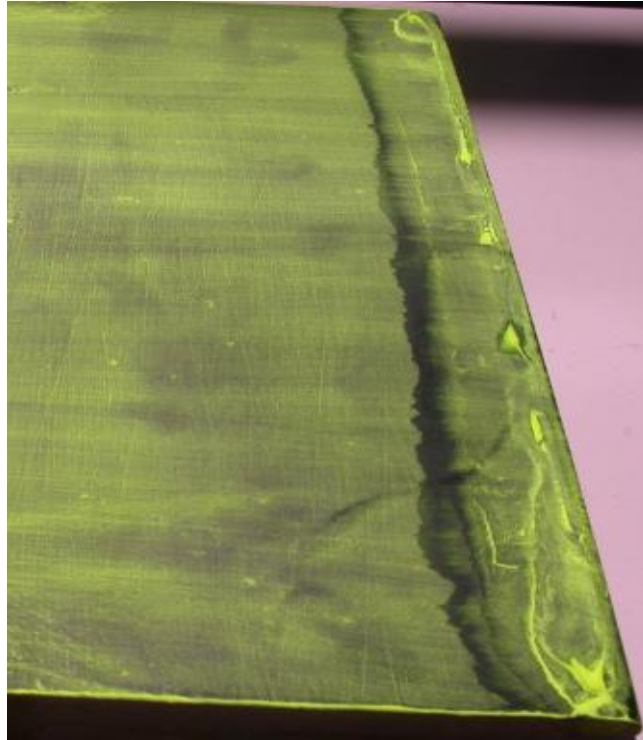


FIGURA 22 - BOLLA DI TRANSIZIONE AL BORDO DI ATTACCO

Per risolvere il problema si è pensato di porre il piano ad incidenze negative, circa -7° , alle quali la bolla, come confermato anche dalle visualizzazioni effettuate, non è risultata più essere presente. Così facendo inoltre si è ottenuto uno strato limite accelerante, che si mantiene laminare lungo tutta la lunghezza del piano.

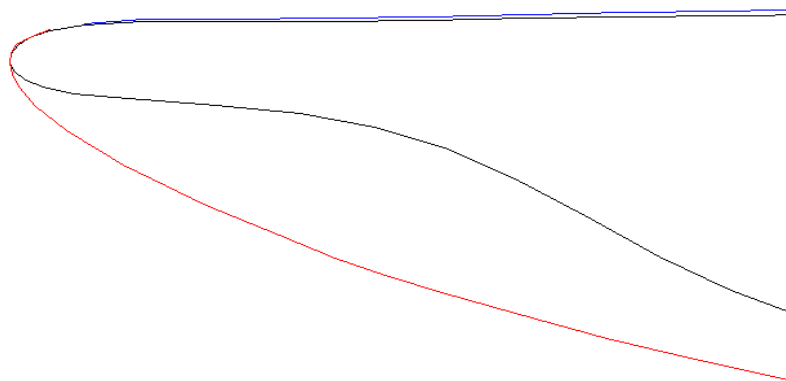


FIGURA 23 – STRATO LIMITE SUL PIANO A -7°

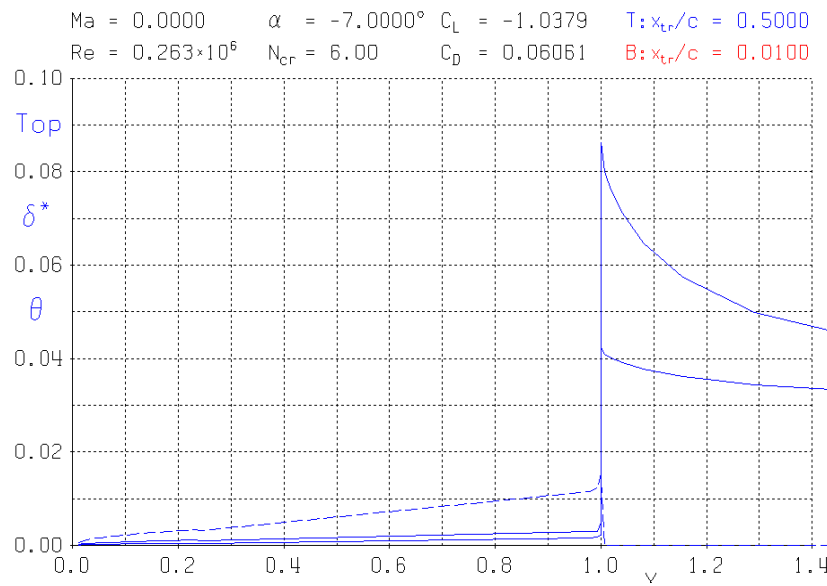
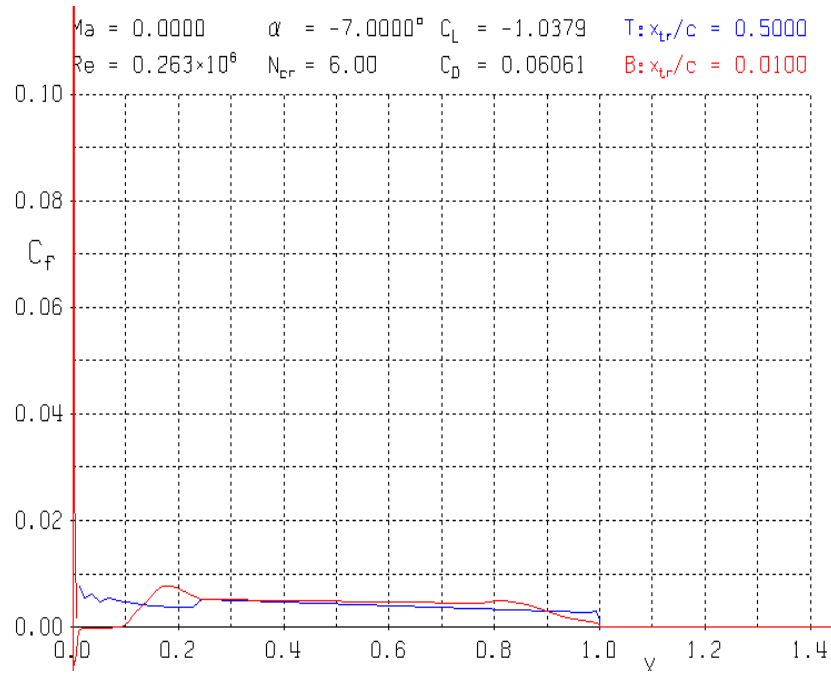


FIGURA 24 - ANDAMENTO DEL CF E DEGLI SPESSORI DI STRATO LIMITE

In questo caso non sono presenti valori di coefficiente d'attrito negativi e lo strato limite ha un andamento regolare lungo la corda e privo della bolla vista in precedenza.

È infine interessante analizzare l'andamento della velocità esterna allo strato limite, per poter valutare meglio le misurazioni che verranno effettuate alle diverse ascisse del piano:

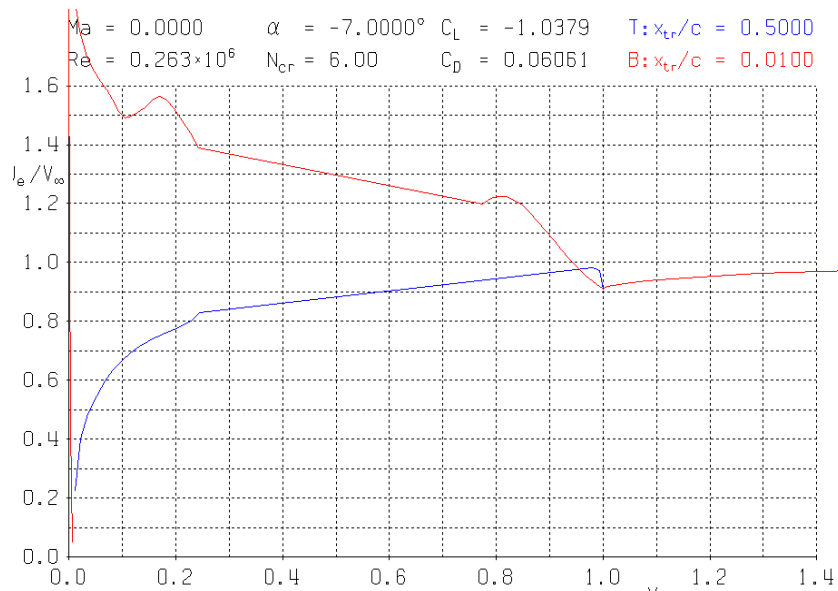


FIGURA 25 - VELOCITÀ SUL CORPO A POTENZIALE

Appare chiaro come, per ascisse molto piccole, la velocità tenda ad essere decisamente bassa. Oltre a ciò lo strato limite, come visto nel grafico precedente, è molto sottile: questi due aspetti rendono difficoltosa la rilevazione delle perturbazioni di velocità all'interno dello strato limite vicino al bordo d'attacco.

STRISCIA DI TRANSIZIONE

Per forzare la transizione dello strato limite laminare si è ricorso ad una striscia di transizione. Per la sua realizzazione e posizionamento ci si è avvalsi di studi presenti in letteratura⁸.

La striscia di transizione è interpretabile come rugosità aggiuntiva che viene posta sulla superficie di un piano per prevenire ad esempio problemi di separazione laminare. Nel caso in questione, non essendo presente una transizione naturale sul piano, si è pensato di forzarla, facendo in modo che a valle della striscia il flusso non fosse completamente turbolento, ma venisse perturbato da questa pur mantenendosi laminare per un tratto e quindi evolvesse in modo turbolento.

La striscia va posta al 10% della corda per avere una completa transizione alla turbolenza a circa il 50% della corda. L'altezza della striscia è determinata dalla relazione seguente, la quale deve far riferimento alla velocità di prova, pari a 10 m/s:

$$h = \frac{12 K}{R}$$

in cui K è una costante basata sulla rugosità della striscia. Tale parametro dipende dal numero di Reynolds basato su flusso indisturbato e lunghezza di riferimento compresa tra bordo di attacco del piano e striscia di transizione: questo assume il valore di 600 per un numero di Reynolds superiori a 100000 e cresce fino a 1000 al tendere a zero di quest'ultimo. Nel caso in esame il numero di Reynolds è pari a circa 88000 da cui si ricava una K pari a circa 650. R è invece il numero di Reynolds per piede basato sulla velocità del flusso indisturbato, quindi pari a 862600. Lo spessore della striscia è pertanto pari a 0.8 mm.

Particolare attenzione va posta poi alla rugosità della striscia. Studi sperimentali hanno evidenziato come il coefficiente di resistenza vari

⁸ W. Rae, A. Pope, "Low speed wind tunnel testing", John Wiley & Sons, 1984.

considerevolmente al variare del diametro delle particelle che costituiscono la rugosità superficiale (grit diameter):

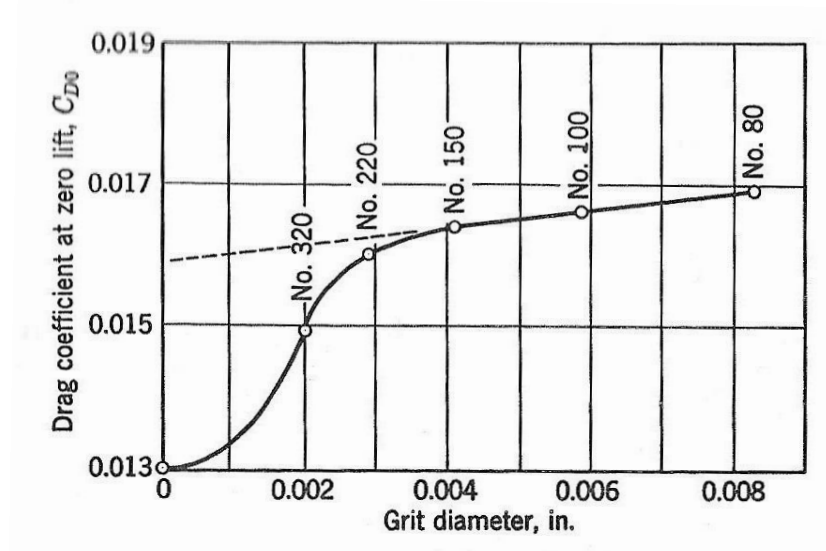


FIGURA 26 - RISULTATO DI UNO STUDIO DI TRANSIZIONE CON DIVERSE RUGOSITÀ SUPERICIALI

Si nota come per diametri superiori a 0.004 in, la curva sperimentale si allinea a quella teorica basata su uno strato limite completamente turbolento: ciò indica che per diametri inferiori la transizione non è immediata. Nel corso delle prove, per ottenere questo effetto, si è utilizzata una striscia di alluminio dentellata dalla superficie molto liscia.

2. CONFIGURAZIONE DI PROVA

È stato realizzato un disegno tridimensionale della configurazione di prova e della disposizione del piano, con relativi attacchi, all'interno della camera di prova:

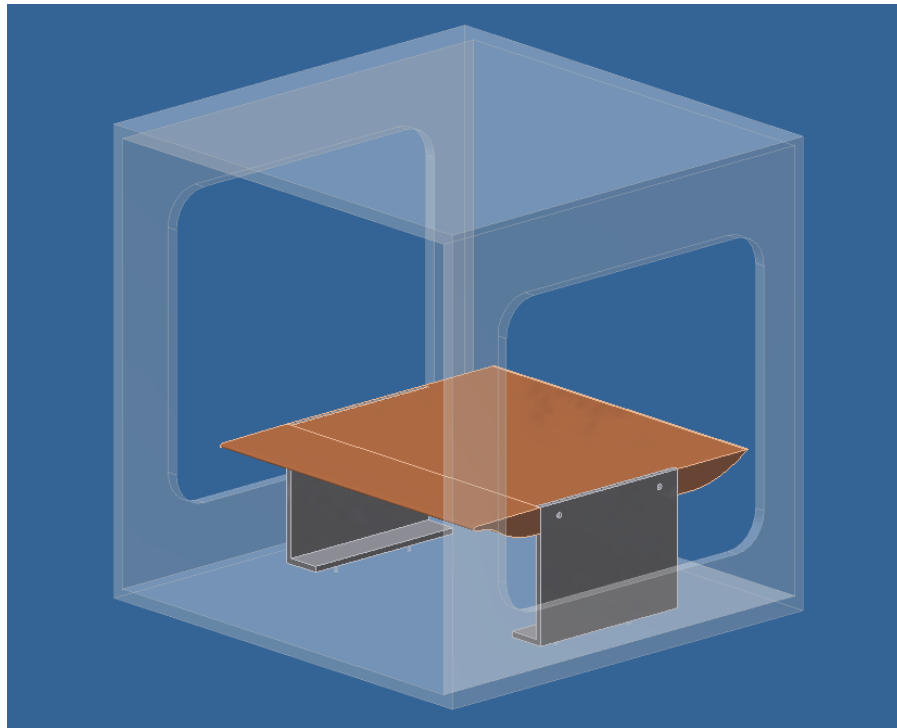


FIGURA 27 - IMMAGINE CAD DELLA CAMERA CON PIANO E ATTACCHI

Il piano, di dimensioni 40 cm x 35 cm, è stato posto poco al di sotto della metà dell'altezza totale della camera, ed è stato vincolato ad essa mediante due spalle di alluminio; l'inclinazione è regolabile mediante un gioco abbondante lasciato in corrispondenza dei fori per le viti. Le dimensioni, rispetto alla grandezza della camera di prova, sono abbastanza elevate, ma i problemi di bloccaggio non costituiscono in questo caso un problema.

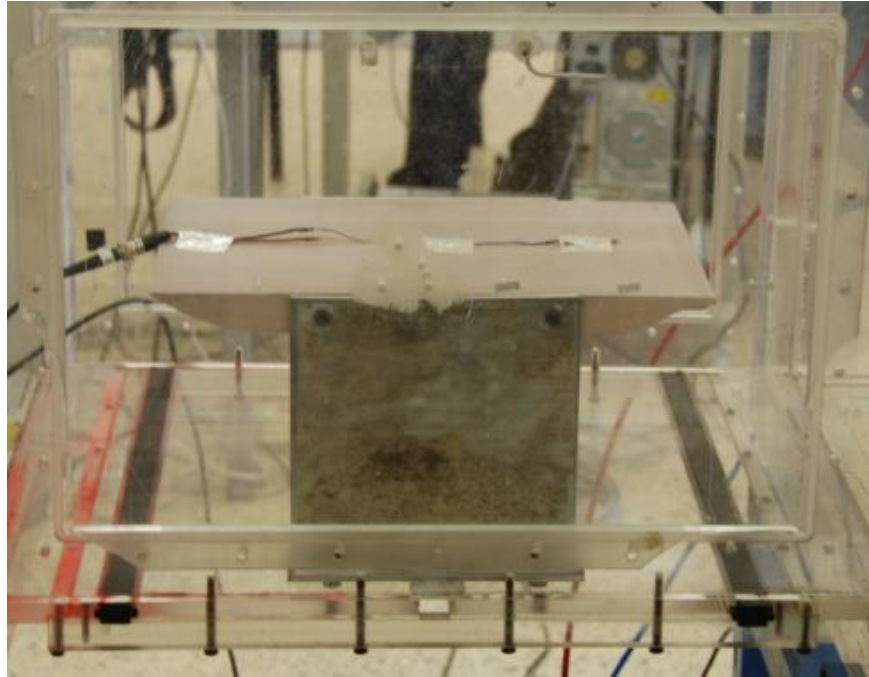


FIGURA 28 - CONFIGURAZIONE DI PROVA AL VERO

La sonda è stata bloccata al piano tramite strisce adesive di alluminio, utilizzate anche per fissare i cavi, cercando così di limitare il più possibile interferenza e vibrazioni.

Nella parte superiore della camera poi è stato posto un tubo di Pitot e una sonda in grado di leggere la temperatura del fluido.

STRUMENTAZIONE

Gli strumenti utilizzati per effettuare la prova sono i seguenti:

- sonda a filo caldo realizzata appositamente, necessaria per rilevare le fluttuazioni di velocità all'interno dello strato limite;
- unità di controllo del filo caldo Dantec Streamline 90N10 Frame;
- Scheda di acquisizione National Instruments PXI 6284 (32 canali, 16 bit, 550 kHz), frequenza di acquisizione 100 kHz, filtro a 30 kHz;
- tubo di Pitot necessario a rilevare la velocità in galleria;
- barometro RPT 410 V, range 600-1100 mbar, output 0-5 V; accuratezza ± 1.0 , stabilità 0.1 mbar per anno;
- termometro con incertezza di 0.2K;
- trasduttore di pressione Ge DUCK LPM9481, range 0-50 mbar, output 0-10 V; accuratezza $\pm 0.1\%$ FS BSL, stabilità $\pm 0.1\%$ FS per anno;
- alimentatore Kert KAT 10VD PRI 230 V, SEL 1-15 V;



FIGURA 29 - DISPOSIZIONE STRUMENTAZIONE

3. RISULTATI OTTENUTI

ELABORAZIONE DEL SEGNALE

Il segnale della sonda, convertito direttamente in m/s tramite un'apposita taratura, è stato elaborato in fasi successive, al fine di ottenere uno spettro pulito e leggibile.

Il segnale è stato privato della media, in modo da eliminare, nello spettro di frequenza, il picco posto in corrispondenza di 0 Hz e irrilevante ai fini dell'analisi. Si è quindi passati alla trasformazione in frequenza mediante la FFT. Questa routine lavora tuttavia su segnali discreti e utilizza la serie di Fourier, che restituisce risultati attendibili soltanto con un segnale periodico nel tempo. Dato che l'output della sonda non presenta tale caratteristica, è stato necessario fare una finestrazione dello stesso: in particolare si è sovrapposta al segnale (di cui si prende il modulo) la finestrazione di Hanning.

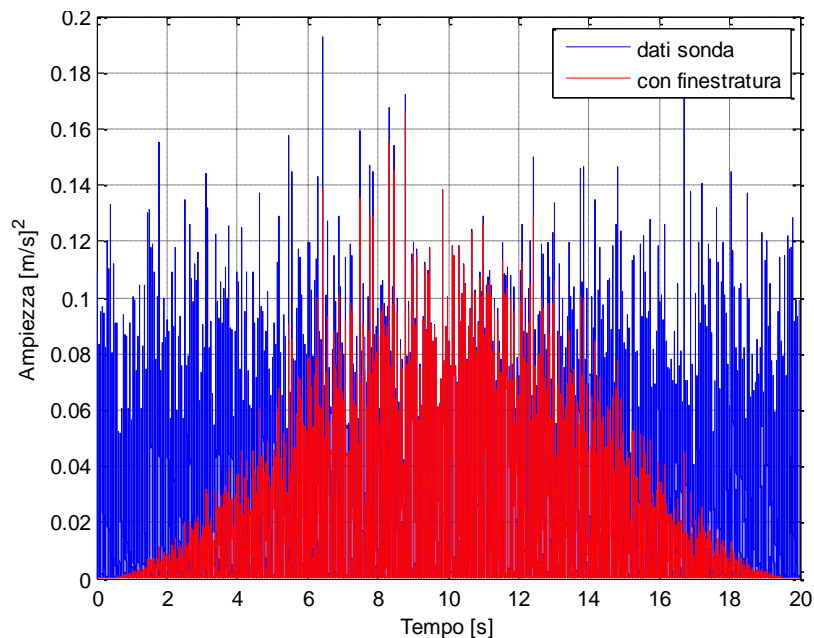


FIGURA 30 - DATI SONDA E DATI FINISTRATI

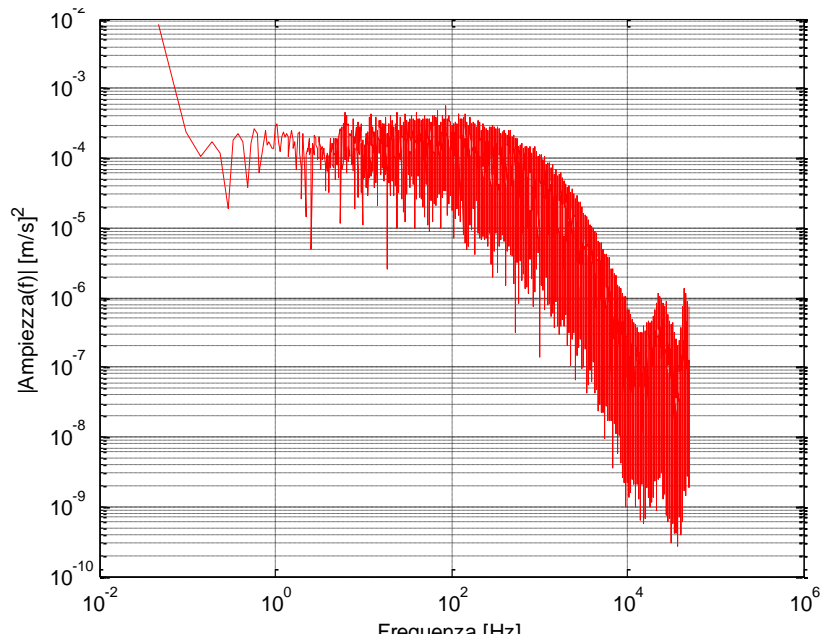


FIGURA 31 - SPETTRO NON MEDIATO

Per ottenere spettri più leggibili si è proceduto con medie effettuate sulle trasformate di piccoli intervalli temporali del segnale originario, suddividendolo in finestre di frazioni di secondo e scegliendo tali finestre in modo che si sovrappongano (ciò è stato possibile anche grazie al tempo di campionamento abbastanza lungo, 30 s).

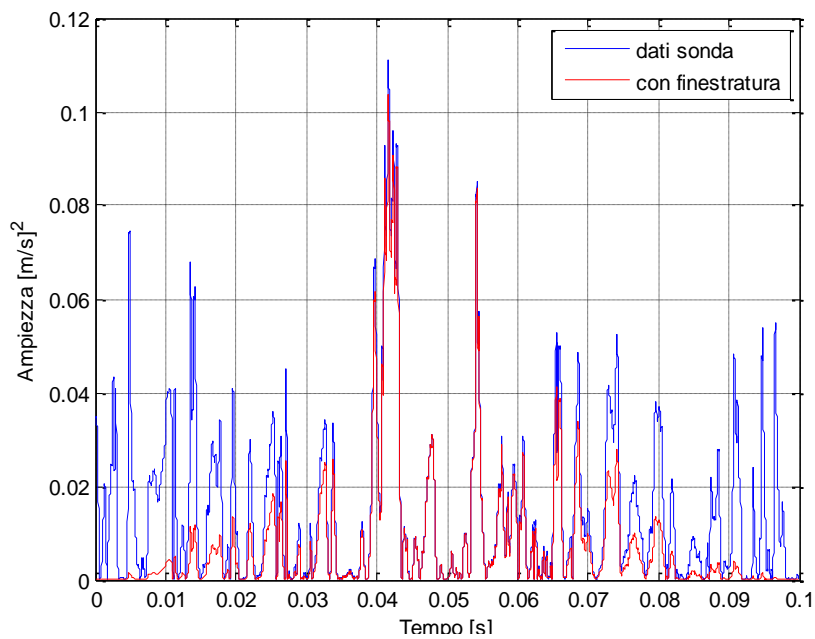


FIGURA 32 - SEGNALE DI UN INTERVALLO FILTRATO

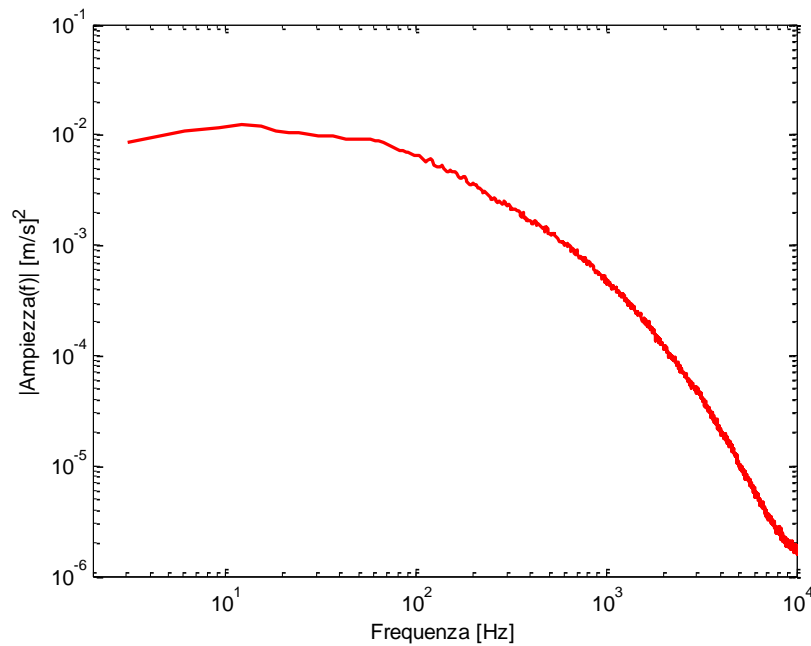


FIGURA 33 - SPETTRO MEDIATO

L'acquisizione è stata effettuata ad una frequenza di 100 kHz con un filtro passabasso alla frequenza di 30 kHz.

PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

Sono state svolte diverse prove in differenti posizioni e assetti del piano. Quelle presentate in questa sezione si riferiscono al piano posto a incidenza negativa -7° , con striscia di transizione dentellata posizionata a 4 cm dal bordo di attacco. In questa configurazione si è potuta osservare la transizione dello strato limite. Gli spettri sembrano avere andamenti abbastanza simili in due zone distinte: in particolare si nota come tendano a sovrapporsi oltre i 190 cm, quando lo strato limite diviene completamente turbolento, mentre si mantengono un po' più bassi e con un differente andamento per posizioni più a monte, quando lo strato limite si mantiene laminare. Queste curve sono strettamente connesse agli indicatori statici legati allo strato limite medesimo ed in particolare alla deviazione standard, indice del grado di turbolenza e calcolabile proprio come area sottesa dalle curve stesse. Infatti prima della transizione e a transizione avvenuta i valori di deviazione

standard e di energia si mantengono praticamente costanti, mentre subiscono un considerevole salto a cavallo di essa.

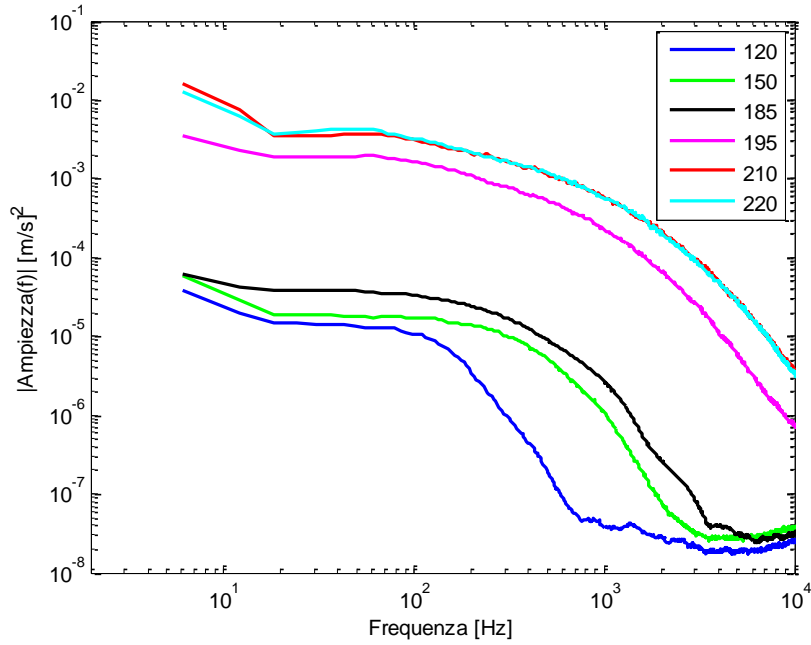


FIGURA 34 - SPETTRI IN POSIZIONI DIFFERENTI LUNGO LA CORDA

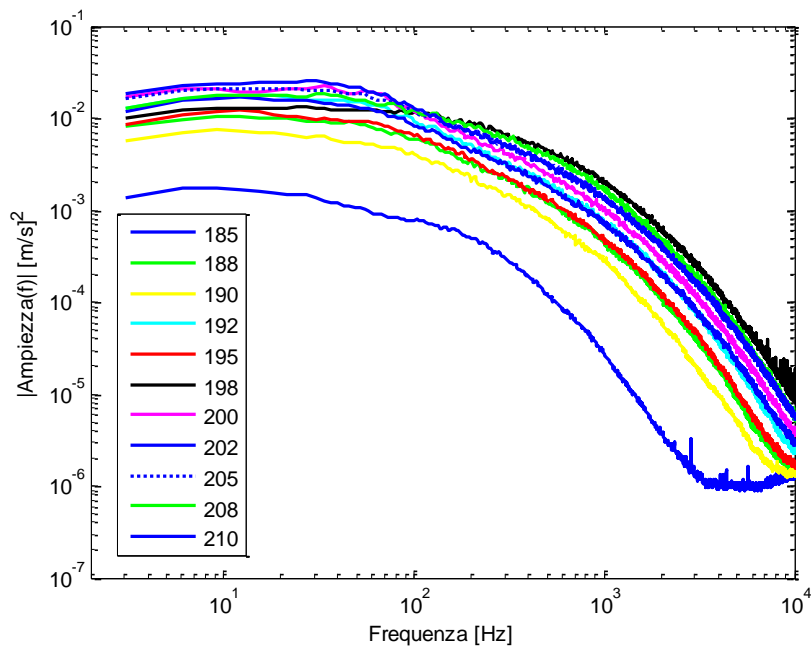


FIGURA 35 - SPETTRI IN PROSSIMITÀ DELLA TRANSIZIONE

Una indicazione più precisa del punto di transizione ci viene fornita proprio dall'andamento della deviazione standard calcolata lungo il piano. Questa grandezza rappresenta lo scarto quadratico medio della velocità locale, scalata sulla velocità asintotica. Si nota come tra i 18 e i 20 cm sia presente un vero e proprio salto di tale grandezza, che consente l'individuazione della zona di transizione. Dal momento che questo è l'indicatore più attendibile, nelle prove sulla vettura verrà utilizzato unicamente questa informazione.

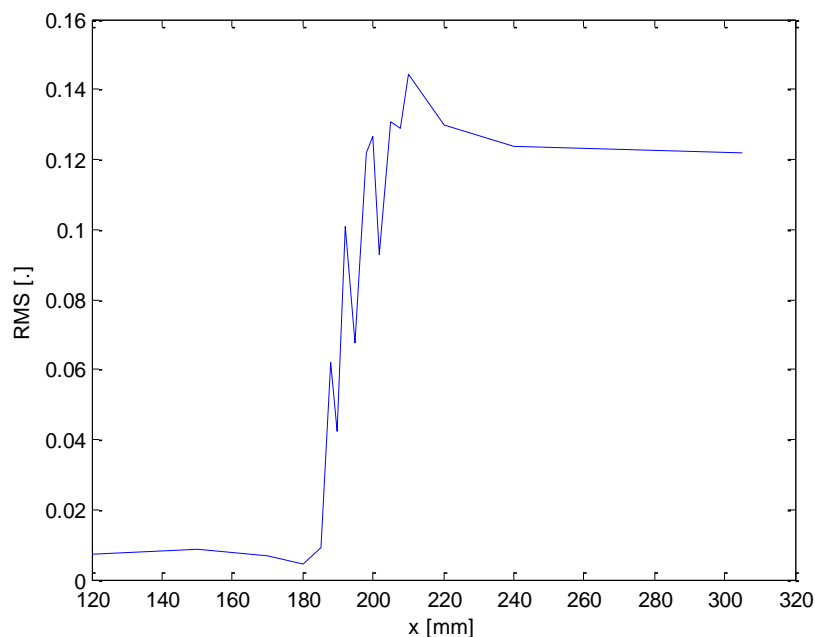


FIGURA 36 - ANDAMENTO DELLA DEVIAZIONE STANDARD LUNGO IL PIANO

Viene riportato anche l'andamento della velocità media, necessario per verificare il buon funzionamento della sonda che, per valori di velocità prossimi a 0.2 m/s, non funziona correttamente. Il valore minimo di velocità è $0.15 \cdot U_\infty$ che corrisponde a 1.5 m/s, ampiamente superiore al limite di 0.2 m/s. Si evince inoltre un andamento di velocità crescente con la corda: questo perché avvicinandosi al regime turbolento, le velocità a parete tendono a crescere a causa del differente andamento del profilo di velocità per lo strato limite turbolento. Questo fenomeno è comunque in parte attenuato dal fatto che, procedendo lungo la corda e misurando sempre alla medesima quota, si misura ad unità di parete sempre

inferiori. Nonostante ciò è comunque evidente un deciso aumento in corrispondenza della zona di transizione.

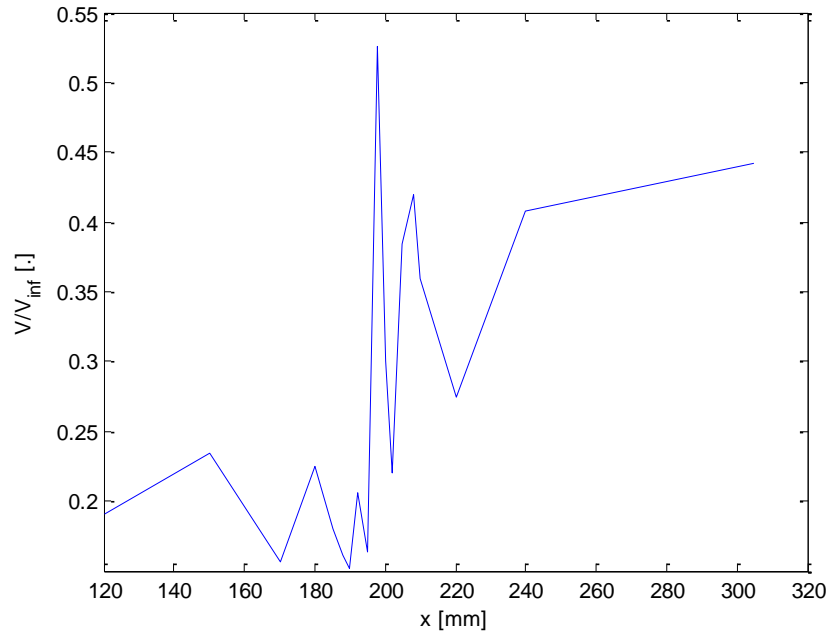


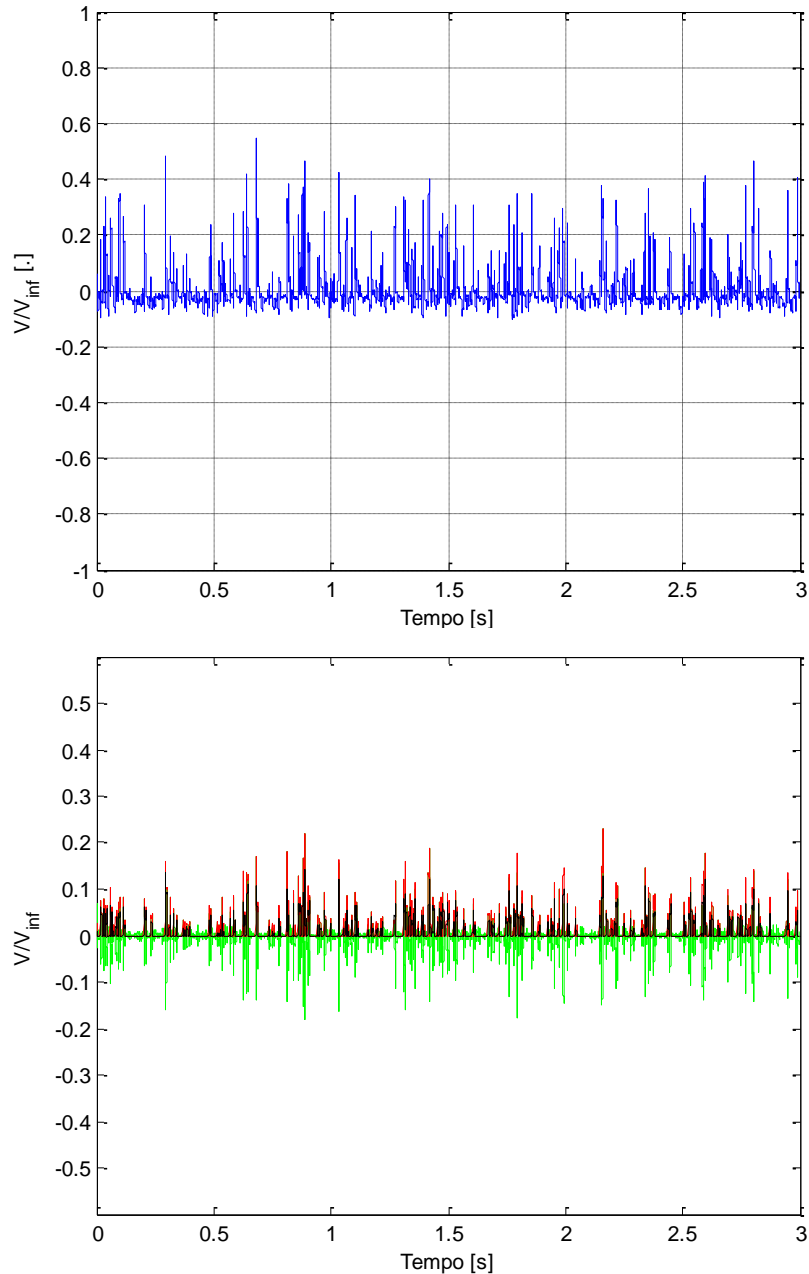
FIGURA 37 - VELOCITÀ MEDIA DEL SEGNALE LUNGO LA CORDA

INTERMITTENZA

A completamento dello studio svolto è stata fatta una analisi di intermittenza percentuale sulle indicazioni fornite dal Bruun⁹. Il segnale è stato quindi elaborato opportunamente con una serie di operazioni atte a far emergere maggiormente gli istanti con un alto contenuto energetico. Quanto viene esposto in seguito si riferisce ad una finestra temporale di 3 s per garantire una maggiore chiarezza grafica.

Il segnale, privato della media, va filtrato mediante un filtro passa-alto ed uno passa-basso; se ne prende poi il valore assoluto, ottenendo ciò che segue:

⁹ H. Bruun, "Hot wire anemometry", Oxford University Press, New York, 1995

**FIGURA 38 - SEGNALE ORIGINARIO E FILTRATO**

Il segnale va quindi rettificato, mandando a zero tutti gli istanti in cui il valore scende al di sotto di una soglia, che è stata scelta essere pari al 10% della variazione di velocità massima registrata dalla sonda durante la prova. In questo modo si inizia ad avere una sorta di funzione a gradini.

Il passaggio successivo consiste nell'applicare uno smoothing filter, ovvero un particolare sistema di filtraggio che tende a smorzare i gradienti: in questo modo se

sono presenti più picchi molto vicini l'uno all'altro, questi vengono unificati in un unico gradino. Il risultato è chiaro guardando uno zoom del segnale, come mostrato nel grafico successivo:

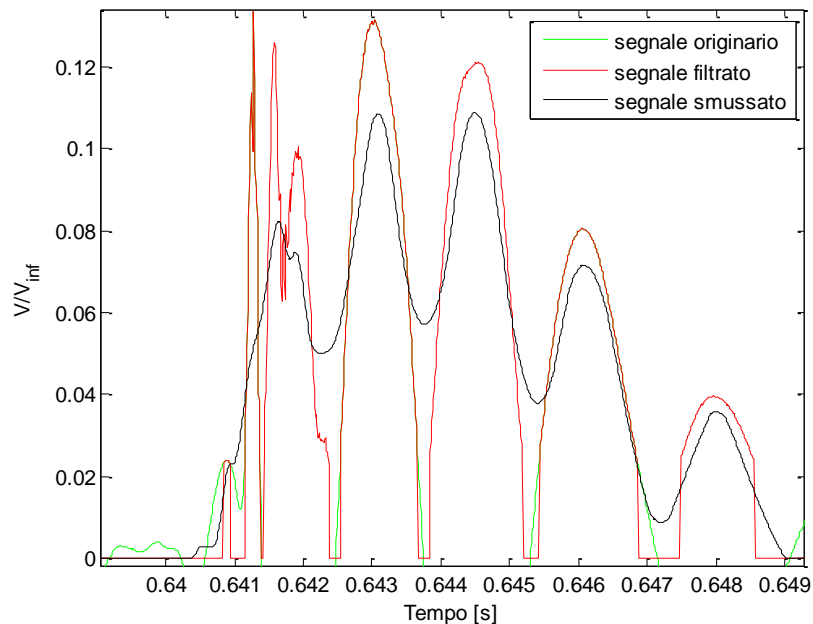


FIGURA 39 - SEGNALE ELABORATO, ZOOM

È ora necessario scegliere la soglia che funge da discriminante per i valori del segnale, stabilendo quindi cosa deve rientrare nell'intermittenza. Il limite minimo è stato stabilito in base al segnale relativo allo strato limite completamente turbolento, ovvero come quel valore che mostrasse una intermittenza molto forte in questa situazione. Fissando questa come soglia oltre la quale lo strato limite si può dire che sia sufficientemente energizzato, è possibile giudicare l'andamento dell'intermittenza al variare della corda e in particolare durante la transizione.

Per ottenere un risultato maggiormente accurato non si effettua direttamente la discriminazione come descritto in precedenza; si esegue invece una prima selezione basata sul 50% del valore di variazione di velocità massima del segnale turbolento, dopodiché si applica nuovamente la smooth function, con un'azione più intensa rispetto a prima, in quanto questa ora lavora su dei veri e propri gradini. A

questo punto si applica una discriminazione definitiva nella quale si scelgono, come valori di intermittenza, quelli superiori a 0.3.

Spostandosi lungo la corda si ottiene quanto segue:

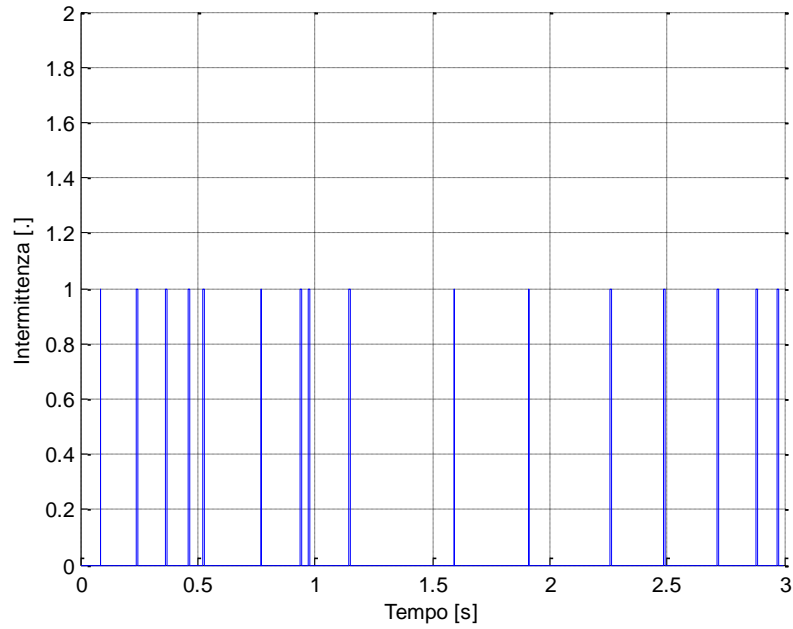


FIGURA 40 – SEGNALE DELLA SONDA A FILO CALDO, INTERMITTENZA A 190 MM

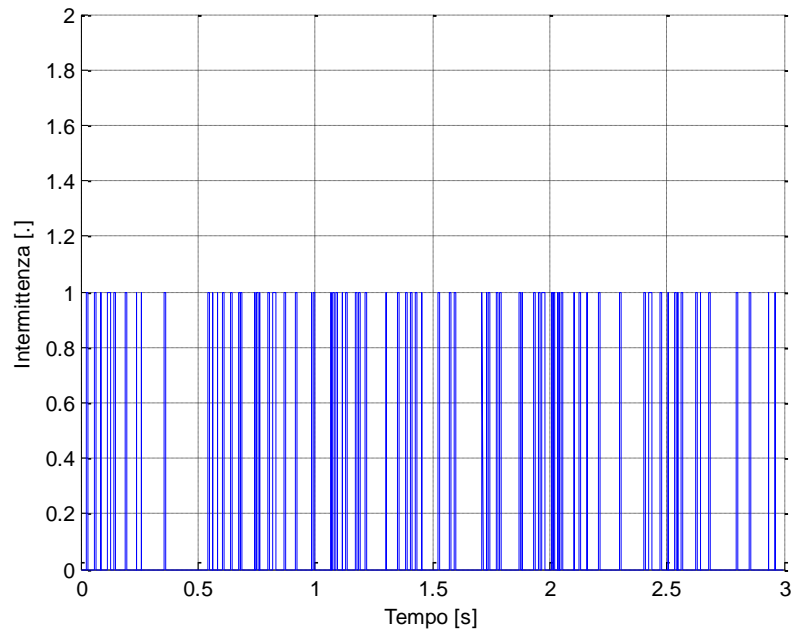


FIGURA 41 - SEGNALE DELLA SONDA A FILO CALDO, INTERMITTENZA A 198 MM

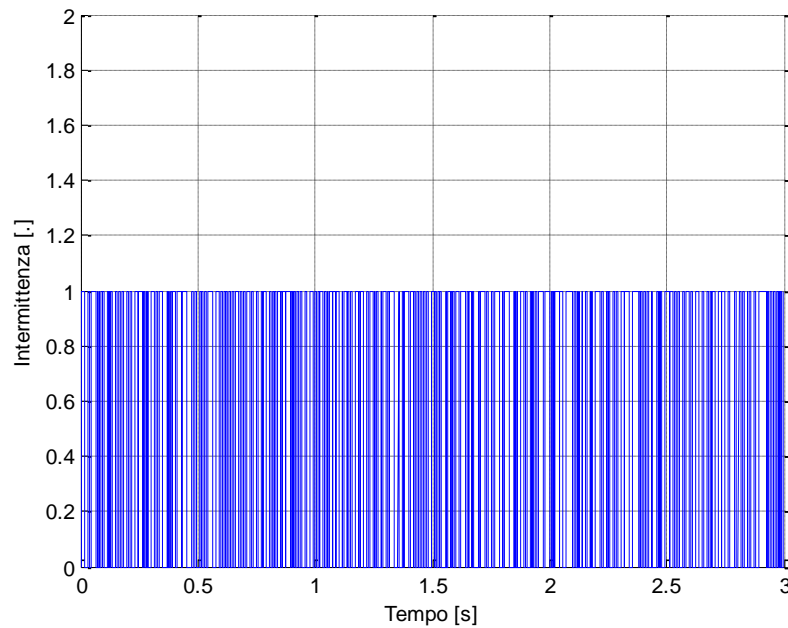


FIGURA 42 – SEGNALE DELLA SONDA A FILO CALDO, INTERMITTENZA A 208 MM

Avvicinandosi alla transizione completa dello strato limite, la percentuale di istanti in cui il segnale supera la soglia dell'intermittenza è sempre maggiore, fino ad occupare buona parte della finestra temporale per uno strato limite turbolento completamente sviluppato. Queste rappresentazioni sono fortemente influenzate dalla soglia scelta e dai parametri dei filtri utilizzati per elaborare il segnale, ma forniscono comunque una buona indicazione di come stia evolvendo la corrente.

È possibile infine visualizzare la percentuale di intermittenza lungo la corda, rendendo ancor più visibile l'evoluzione di cui si è detto in precedenza. In questo caso il salto è meno netto rispetto alla deviazione standard, ma è immediato vedere che il valore di intermittenza per lo strato limite laminare è nullo.

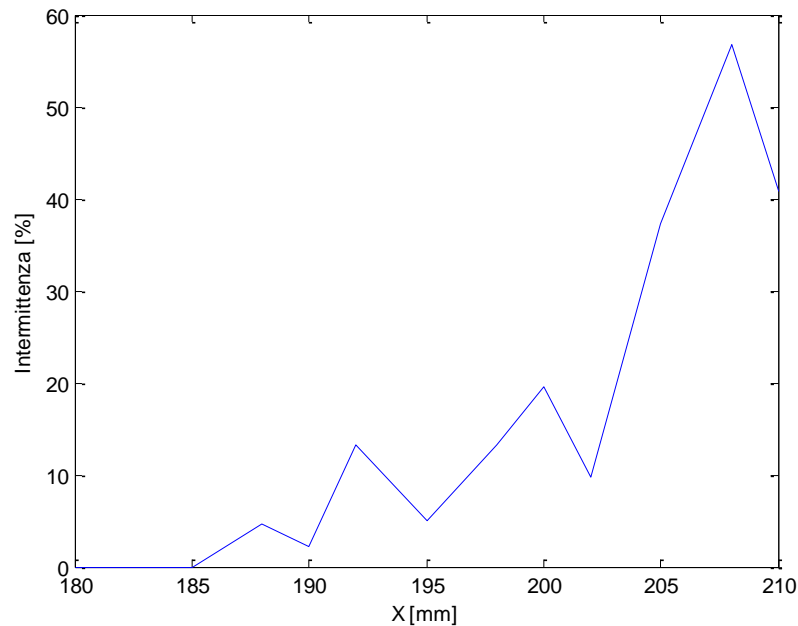


FIGURA 43 - INTERMITTENZA PERCENTUALE

ULTERIORI CONSIDERAZIONI

I risultati proposti evidenziano il passaggio dal regime laminare a quello turbolento. Si è verificato che la sonda fosse abbastanza bassa da rimanere all'interno dello strato limite, ma non tanto da entrare nel substrato viscoso. Si è quindi proceduto ad un confronto tra la velocità misurata e quella calcolata a potenziale con X-Foil, ricavando così l'altezza dal suolo in unità di parete.

In particolare si è verificato che il punto più avanzato in cui sono state eseguite le misurazioni non fosse al di fuori dallo strato limite, e quello maggiormente arretrato non si trovasse all'interno del substrato viscoso. Ragionevolmente nelle stazioni intermedie si avranno condizioni intermedie tra queste due limite.

L'altezza della sonda deve essere superiore alle 10 unità di parete, limite sotto il quale essa si troverebbe nel substrato viscoso e, al tempo medesimo, inferiore alle 500 unità di parete, per evitare di essere al di fuori dello strato limite. Questa seconda condizione è stata in realtà verificata di volta in volta rilevando il valore di velocità media dalla sonda a filo caldo e constatando che tale valore fosse nettamente inferiore a quello calcolato a potenziale nel punto di misurazione.

Per calcolare le unità di parete¹⁰ si è proceduto nel modo seguente:

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{C_f}{2}$$

$$\tau_w = \rho U_0^2 \frac{d\theta}{dx}$$

$$\delta_v = \nu \sqrt{\frac{\rho}{\tau_w}} = \frac{\nu}{u_\tau}$$

$$y^+ = \frac{y}{\delta_v}$$

In cui C_f e U_0 sono stati ricavati direttamente dai grafici di X-Foil.

A tal proposito, si riporta l'andamento del coefficiente di attrito, ricordando che la lunghezza del piano è di 40 cm.

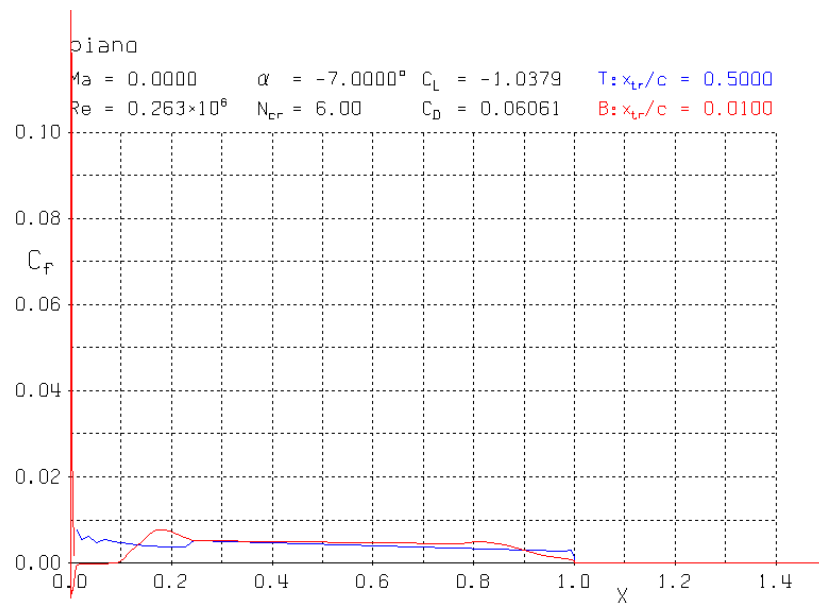


FIGURA 44 - ANDAMENTO DEL C_f LUNGO IL PIANO

Si è visto che, sino dai primi centimetri fino alla fine del piano, ci si trova a poco meno di 30 unità di parete. Le misure effettuate risultano quindi valide dato che la

¹⁰ S. B. Pope, "Turbulent flows", Cambridge University Press, 2000.

sonda non si viene mai a trovare nelle condizioni limite descritte in precedenza, ovvero all'interno del substrato viscoso o al di fuori dallo strato limite.

4.

CONFIGURAZIONE DI PROVA

Per allestire la prova in modo adeguato si sono analizzate le problematiche più comuni che si affrontano nelle prove sperimentali su veicoli a terra.

1. PROVE AUTOMOBILISTICHE

Per studiare un fenomeno in galleria è necessario innanzitutto basarsi sui principi di similitudine aerodinamica e geometrica. Avendo a disposizione la vettura reale da provare a pressione e temperatura ambiente, è sufficiente produrre un vento incidente con una velocità pari a quella media in gara, ovvero circa 30 km/h. È necessario invece porre maggiore attenzione alle correzioni degli effetti dati dalle pareti, come il bloccaggio e la presenza dello strato limite. Un importante indice della bontà delle prove sperimentali è la qualità di vena fluida, che tiene conto di diversi aspetti, quali l'intensità e le dimensioni caratteristiche della turbolenza, l'omogeneità della corrente e i gradienti di velocità e di pressione, nonché degli altri parametri caratteristici della prova. La galleria del vento Politecnico di Milano ha un livello di turbolenza inferiore allo 0.1%.

PROBLEMATICHE TIPICHE DELLE PROVE AUTOMOBILISTICHE

La principale difficoltà nelle prove automobilistiche in galleria del vento è legata alla presenza di uno strato limite sul pavimento che va ad investire il modello. Essendo nella realtà l'aria ferma con la vettura in movimento, tale gradiente di velocità non esiste. Studi condotti da Wiedemann¹¹ hanno tuttavia mostrato che è possibile la comparsa di uno strato limite indotto dalla presenza del corpo a seconda del rapporto tra altezza dal suolo e lunghezza caratteristica (h/c).

La trattazione proposta è puramente qualitativa, ma aiuta a comprendere come modificare la configurazione di prova per cercare di riprodurre l'effetto al vero. Per capire meglio le diverse situazioni si tenga presente, riferendosi all'immagine sottostante, che le automobili di serie vengono collocate principalmente nella seconda categoria, mentre quelle sportive nella terza. Il modello di veicolo esaminato nel corso di questo lavoro si può dunque pensare come appartenente alla seconda categoria di veicoli.

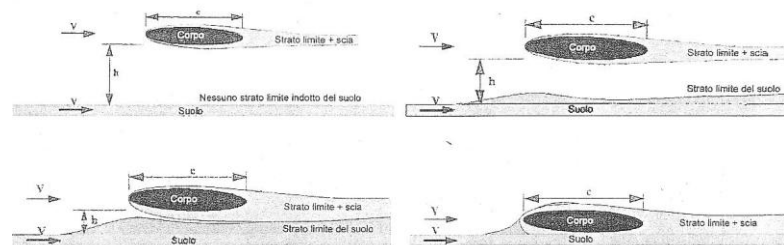


FIGURA 45 - COMPORTAMENTO DEL FLUSSO IN RELAZIONE ALL'ALTEZZA DAL SUOLO

CONFIGURAZIONI DI GALLERIA

In una camera di prova in configurazione “pulita”, ovvero senza nessun corpo in grado di modificarne il campo di moto si genera sul pavimento uno strato limite che investe il corpo. Quando tale strato limite è grande rispetto alla dimensione caratteristica del modello, esso modifica il flusso attorno al corpo.

¹¹ M. Bianchi, L. Marchesini, “Progettazione e realizzazione di un veicolo per la competizione Shell Eco-Marathon”, Tesi conseguita presso il Politecnico di Milano nell'a.a. 2004-2005

Per evitare questo fenomeno son state sviluppate, nel corso degli anni, diverse tecniche più o meno efficienti, sintetizzate in figura:

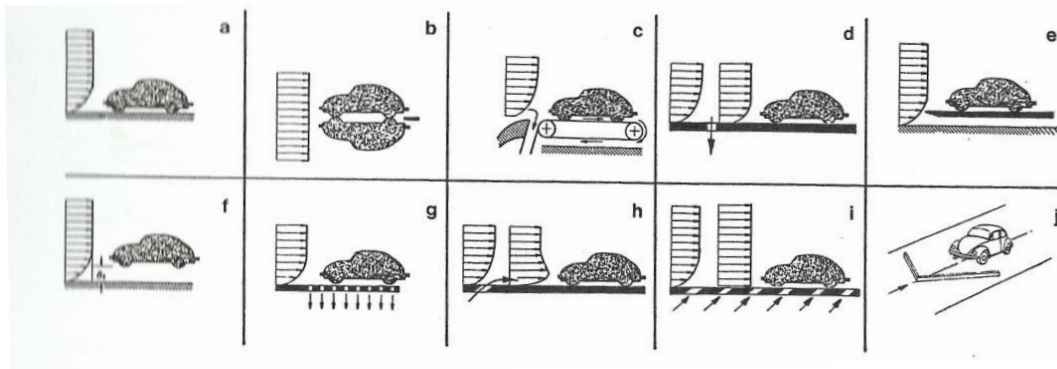


FIGURA 46 - TECNICHE DI SIMULAZIONE PER PROVE AUTOMOBILISTICHE

- simmetria: consiste nell'utilizzare due modelli identici posizionati in modo specchiato l'uno sopra all'altro: così facendo il piano di simmetria che si viene a creare rappresenta l'effetto del terreno, evidentemente privo dello strato limite presente sulle pareti della camera di prova. Tuttavia non si può garantire che per flussi non completamente stazionari il campo di moto che si genera sia effettivamente simmetrico;
- piano rialzato: consiste nel disporre un piano di spessore relativamente ridotto, parallelamente al pavimento della camera di prova e rialzato rispetto ad esso di una altezza variabile tra tre e cinque volte lo spessore dello strato limite, su cui posizionare il modello, come mostrato nella figura e. In questo modo lo strato limite che investe l'oggetto della prova è appena generato e ha una dimensione ortogonale al piano ridotta;
- aspirazione dello strato limite: prevede l'aspirazione dello strato limite attraverso un fondo perforato come mostrato nell'immagine g. È poi possibile utilizzarla assieme alla tecnica precedente;
- soffiamento tangenziale: in questo caso, invece che aspirare una quantità d'aria si immette un flusso parallelo alla vena fluida a monte del modello per

energizzare lo strato limite. Studi effettuati a tal proposito¹² hanno dimostrato che si possono ottenere risultati, per ciò che riguarda la misura della resistenza, prossimi a quelli visti con un tappeto mobile;

- tappeto mobile: questa tecnica infine è quella che riesce a simulare meglio la condizione di manto stradale, utilizzando un nastro che viene fatto muovere idealmente alla stessa velocità dell'aria. Gli svantaggi principali sono legati all'alto costo di realizzazione e alle difficoltà di ancoraggio del modello, che non potrà essere sostenuto dal basso come usuale.

CONSIDERAZIONI AGGIUNTIVE

Per effettuare una prova maggiormente realistica può essere importante studiare l'effetto delle ruote in movimento, in quanto queste vanno a modificare il flusso d'aria principalmente al di sotto della vettura. Si dovrebbero in questo caso tuttavia progettare dei meccanismi per la rotazione delle ruote, che comporterebbero una crescita di tempi e costi della prova.

Si ricorda che nelle prove automobilistiche, principalmente di veicoli da competizione, una parte importante della progettazione riguarda il cosiddetto effetto suolo, ovvero la deportanza garantita da una corretta modellazione del fondo della vettura che genera una zona di depressione. Nel caso in esame però le velocità modeste, l'altezza da terra e l'assenza di una necessità di forte aderenza al terreno, hanno incanalato gli studi in altra direzione. Per approfondimenti è possibile riferirsi a letture specializzate¹³.

In uno studio sperimentale, i parametri importanti da studiare sono i coefficienti di resistenza, essenziali per quanto riguarda il consumo di combustibile. Naturalmente anche le componenti di forza su assi diversi da quello longitudinale

¹² E. Mercker, J. Wiedemann "Comparison of different ground simulation techniques for use in automotive wind tunnels", SAE Paper No. 900321, Feb. 1990.

¹³ J. E. Hackett, J. B. Baker, J. E. Williams, S. B. Wallis "On the influence of ground movement and wheel rotation in tests on modern car shapes", SAE Paper No. 870245, Feb. 1995.

hanno la loro importanza, in particolare per quanto riguarda la controllabilità e la stabilità del veicolo. Oltre a ciò, è bene poter effettuare degli studi sul flusso per vedere se sono presenti zone di ricircolo, distaccamenti dello strato limite o altro che possa concorrere ad un aumento della resistenza complessivo, mediante sistemi di visualizzazione o studio delle fluttuazioni di velocità con sonde a filo caldo, ponendo particolare attenzione ai dettagli del veicolo, come le giunzioni tra i pezzi.

2. STRUMENTAZIONE

GALLERIA DEL VENTO

Le prove sono state effettuate all'interno della galleria del vento del Politecnico di Milano, operativa dal settembre 2001 e pensata per svolgere ricerca in molteplici campi quali l'ingegneria aerospaziale e l'ingegneria civile.

La galleria, subsonica e a circuito chiuso, si dispone su due piani:

- il piano superiore è lungo circa 35 m a sezione costante 13.84 m x 3.84 m ed è costituito da camera di tranquillizzazione e camera di prova, ad uso civile-ambientale. Nella camera di tranquillizzazione è posizionato lo scambiatore di calore e sono presenti i dispositivi mobili indispensabili per generare la turbolenza per le prove civili e o ambientali;
- al piano inferiore invece vi sono un'altra camera di tranquillizzazione con nido d'ape a celle esagonali e uno schermo a rete con distribuzione non omogenea di porosità β , quindi il convergente e la camera di prova ad uso aeronautico e veicolistico con sezione 4 m x 3.84 m e lunghezza 5.99 m. Questa camera non è a sezione costante ma leggermente divergente per correggere i problemi di bloccaggio legati alla crescita dello strato limite. Grazie ad un progetto accurato è stato possibile raggiungere un'elevata qualità di vena, sia in termini di uniformità sulla sezione che in termini di basso livello di turbolenza.

Il flusso d'aria è generato da 14 ventilatori con un diametro di 1.8 m, disposti su due file da 7 a valle del divergente, per un totale di 1.4 MW di potenza installata. È possibile raggiungere nella camera aeronautica velocità circa 55 m/s.

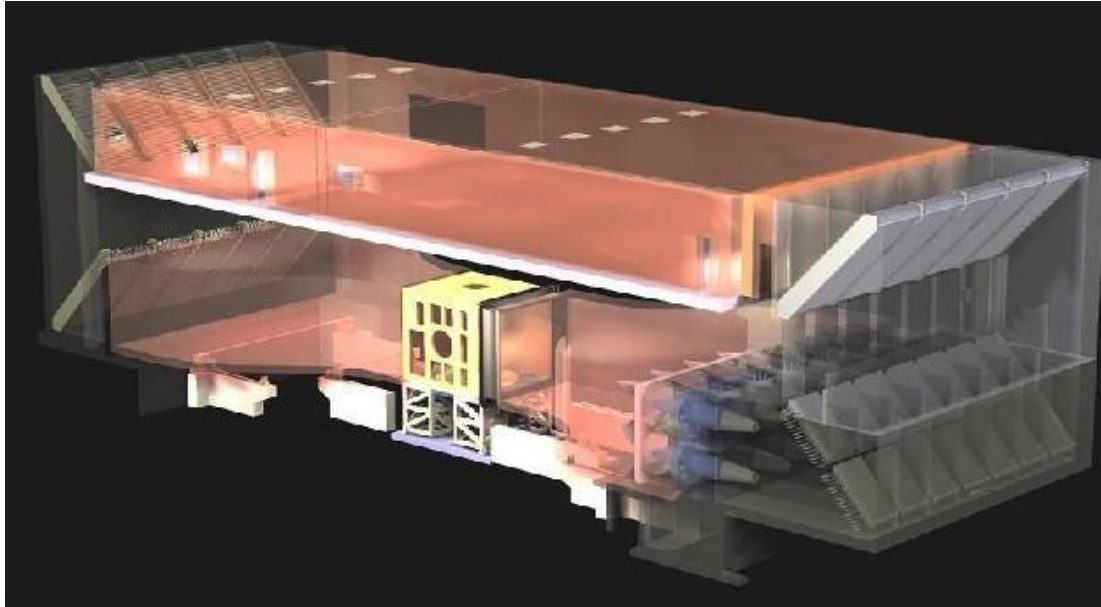
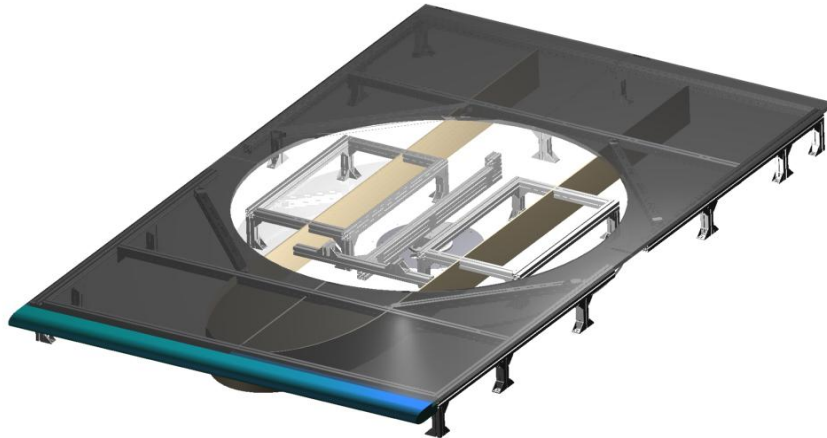


FIGURA 47 - GALLERIA A VENTO, POLITECNICO DI MILANO

PIANO DI APPOGGIO

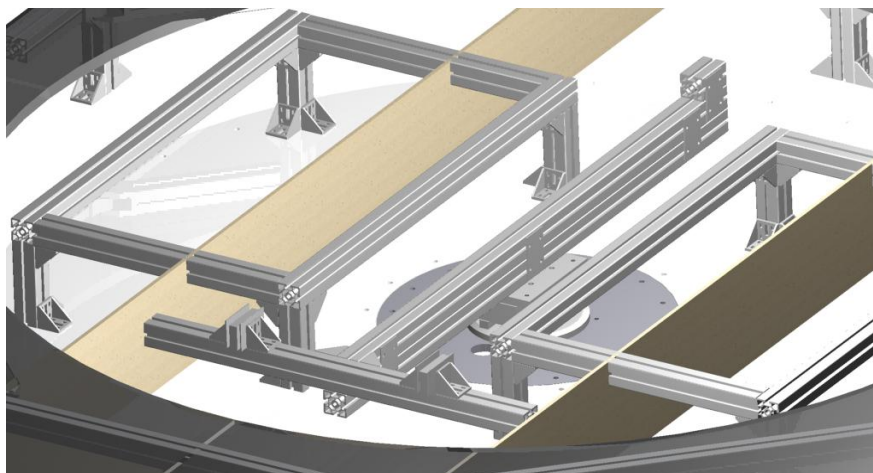
Per il posizionamento del veicolo in galleria si è utilizzata l'attrezzatura standard che viene impiegata nella galleria a vento del Politecnico di Milano per lo studio di corpi allungati e posizionati sul terreno. Tale strumentazione è nata per una campagna di prove sperimentali sul bob della nazionale italiana partecipante alle olimpiadi del 2006 ed è stata poi utilizzata con successo in campo ciclistico.

Per ragioni di costi si è deciso di evitare complessi sistemi di aspirazione, soffiaggio o tappeto mobile e si è utilizzato un piano rialzato. L'altezza a cui è stato posto il piano è pari a 300 mm, in modo da poter consentire l'alloggio della strumentazione che è stata poi carenata con apposite superfici in modo da non disturbare eccessivamente il flusso di aria nel corso della prova. Questa configurazione, come detto in precedenza, permette di avere uno strato limite che si genera sul bordo di attacco del piano risultando così molto sottile.

**FIGURA 48 - PIANO CON SUPPORTO GIREVOLE**

Al centro del piano è stato realizzato un supporto girevole circolare di 2500 mm di diametro, il quale consente ruotare il modello solidamente con le bilance, al fine di effettuare agevolmente prove con angolo di imbardata rispetto al vento relativo.

Per ancorare la vettura alla bilancia è stato realizzato appositamente un braccio metallico a T che si vede in figura, posto al di sotto del piano rotante circolare. Per vincolare le ruote a questo braccio è stato realizzato un sistema di ganasce mediante delle squadrette metalliche e dei supporti di alluminio, come illustrato nell'immagine seguente. Si è cercato di rendere il sistema meno iperstatico possibile, evitando così di introdurre reazioni vincolari aggiuntive: per questo motivo sono state bloccate soltanto le ruote anteriori, mentre quella posteriore è semplicemente appoggiata.

**FIGURA 49 - SUPPORTO DELLA VETTURA**

SENSORI

Per le misure di forza è stata utilizzata una bilancia a sei componenti, la SG-Balance 192-61 della RUAG Aerospace, con le seguenti caratteristiche:

F_x	± 1500 N
F_y	± 1000 N
F_z	± 1500 N
M_x	± 500 Nm
M_y	± 100 Nm
M_z	± 600 Nm

La bilancia è stata posizionata al di sotto del braccio metallico a cui è vincolata la macchina, perfettamente allineata con il braccio stesso e con la corrente.

La pressione dinamica di riferimento è stata rilevata tramite le prese di pressione statica poste a monte e a valle del convergente, dalla cui differenza è possibile ricavare il valore di interesse con un errore molto piccolo. Il barometro utilizzato è il seguente:

- Mensor 6100, FS 2500 Pa, accuratezza dello 0.01% del FS.

Per l'acquisizione e la gestione dei restanti segnali si è fatto invece uso dei seguenti componenti:

- Scheda di acquisizione National Instruments PXI 6284 (32 canali, 16 bit, 550 kHz) nel modulo PXI 1010, frequenza di acquisizione 100 kHz, filtro a 30 kHz per la sonda a filo caldo;
- unità di controllo del filo caldo Dantec Streamline 90N10 Frame;
- sonde a filo caldo illustrate nel precedente capitolo;
- compact DAQ NI 9237, 4 canali, range ± 25 mV/V, 24 bit, per le misure di forza;
- barometro RPT 410V per la misura della pressione totale, range 600-1100 mbar, output 0-5 V; accuratezza ± 1.0 , stabilità 0.1 mbar per anno;
- termoresistenza PT100 con incertezza di 0.2K per la temperatura;
- filtro di Butterworth dell'ottavo ordine, Alligator Technologies SCS-816;
- sensore di umidità Rens;

- alimentatori Elind lineari, stabilizzati.

3. CORREZIONI

Le correzioni da apportare alle misure ottenute sono principalmente due: la prima dovuta al bloccaggio solido e la seconda al galleggiamento longitudinale¹⁴.

Il galleggiamento fornisce una componente aggiuntiva di C_x , stimabile nel modo seguente:

$$\Delta C_x = -\frac{1}{A} \left(V \frac{dc_p}{dx} \right) = 0.0058$$

in cui $A = 0.28 \text{ m}^2$ è l'area della sezione frontale del corpo, $V = 0.405 \text{ m}^3$ il volume della vettura e $\frac{dc_p}{dx} = -0.004 \text{ m}^{-1}$ è il gradiente longitudinale di galleria. Essendo in presenza di un gradiente di pressione negativo, i valori di C_x hanno questa componente aggiuntiva di cui è necessario tener conto.

L'effetto sulla pressione dinamica dovuto al bloccaggio solido del piano di prova è stato corretto mediante l'utilizzo di un opportuno coefficiente durante le misurazioni. La correzione relativa alla vettura invece si calcola come segue:

$$\varepsilon_B = \frac{K\tau}{C^{3/2}} = 0.006$$

dove K è un fattore di forma del corpo pari a 0.935, τ è un indice geometrico legato alla camera di prova e al modello che vale 0.82, mentre C è la superficie della sezione frontale della camera di prova, pari a 15.36 m^2 . Questo coefficiente viene poi utilizzato per correggere il valore di pressione dinamica:

$$q_c = q_u (1 + \varepsilon_B)^2$$

L'effetto sul valore del C_x è dell'1.2%; il valore di bloccaggio solido della vettura è infatti 0.018 e la correzione è di piccola entità.

¹⁴ W. Rae, A. Pope, "Low speed wind tunnel testing", John Wiley & Sons, 1984.

5.

DATI SPERIMENTALI

Sono state effettuate principalmente due tipologie di prove sperimentali: ricerca della transizione mediante sonde a filo caldo sulla superficie della vettura e pesate con la bilancia. Le sonde sono state posizionate sulla superficie del corpo cercando di limitare gli effetti di interferenza reciproca, con l'obiettivo di rilevare la transizione in differenti posizioni. A causa della curvatura del modello e quindi delle linee di corrente infatti non è possibile trovare un'unica ascissa di transizione sul corpo ma questa varia con la posizione e con la velocità.

1. PROVE SUL CORPO DELLA VETTURA

FILO CALDO

In primo luogo si è ricercato il punto di transizione sulla vettura per diverse velocità (4, 6.6, 8.3, 10.1 e 11.9 m/s) e posizioni. È ben noto dalla teoria che vi è uno stretto legame tra punto di transizione e numero di Reynolds. Effettivamente si è verificato nel corso delle prove come, all'aumentare del Reynolds, la transizione sia anticipata e come da questo derivi anche una scelta differente di forme qualora si volesse ricorrere ad una ottimizzazione volta alla riduzione della resistenza.

In primo luogo è stata effettuata una ricerca del punto di transizione sul dorso della vettura, in corrispondenza del suo piano di simmetria verticale. Successivamente si sono studiati i fianchi della carrozzeria, per poter individuare l'andamento della linea di transizione sull'intera superficie del corpo in esame.



FIGURA 50 - VETTURA CON SONDE A FILO CALDO

Per l'allineamento e il posizionamento delle sonde si è utilizzato un dispositivo di puntamento laser posto su una squadra metallica, la quale veniva di volta in volta spostata sul pavimento della galleria su cui erano stati segnati i riferimenti delle quote di interesse, con delle linee perpendicolari al piano di simmetria. Ci si è in questo modo riferiti alla coordinata x in direzione longitudinale, con origine in corrispondenza del punto più avanzato della vettura, a cui si farà riferimento in seguito.

Per cercare di limitare al minimo l'intrusività della strumentazione si è cercato di disporre i cavi lungo ideali linee di corrente, come mostrato nelle fotografie presentate.



FIGURA 51 - DISPOSIZIONE DEI CAVI

Non si è potuta realizzare una mappatura completa dei punti di transizione della vettura per motivi di tempo; ci si è dovuti limitare pertanto a studiare principalmente tre valori di y , pari rispettivamente a 0, 12 e 45 cm, in cui y rappresenta la coordinata curvilinea che parte dalla mezzeria del corpo. Nonostante i non molti punti si è comunque ottenuta una indicazione attendibile sul comportamento dello strato limite sulla superficie della vettura.

Vengono innanzitutto illustrati i punti sulla macchina in cui sono state effettuate le misure:

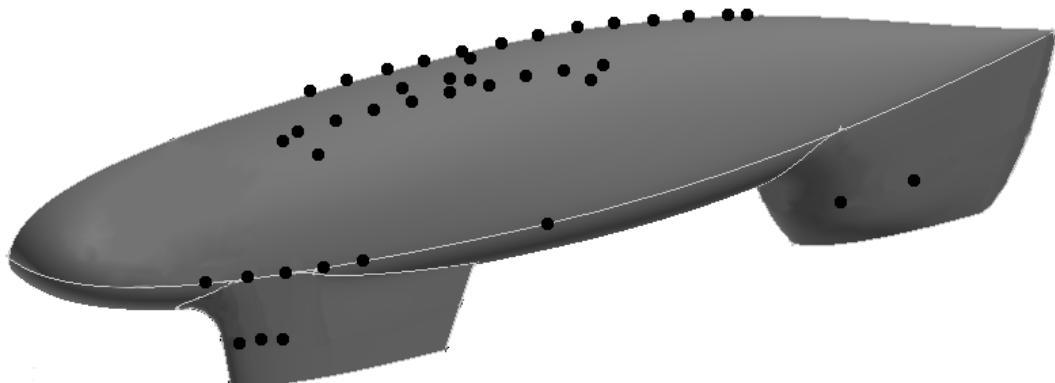


FIGURA 52 - PUNTI DI POSIZIONAMENTO DELLE SONDE

Le prove effettuate con le sonde hanno restituito delle variazioni dei segnali abbastanza differenti rispetto a quelle ottenute con il piano, in particolare si sono trovate regioni di transizione molto più estese. Questo è probabilmente legato ad alcuni importanti aspetti: innanzitutto lo strato limite ha una velocità asintotica inferiore, avendo provato a velocità più basse di quelle viste sul piano; inoltre la velocità esterna è moderatamente accelerante e lo strato limite è più spesso rispetto al caso precedente. Infine bisogna considerare che la superficie della macchina è molto meno rugosa di quella di piano. Questi aspetti comportano che lo strato limite si mantenga laminare più a lungo e la transizione avvenga in una zona più estesa.

Vengono riportati a titolo di esempio i segnali rilevati sull'asse di simmetria del corpo, per 3 secondi, alla velocità di 8.3 m/s in differenti posizioni longitudinali:

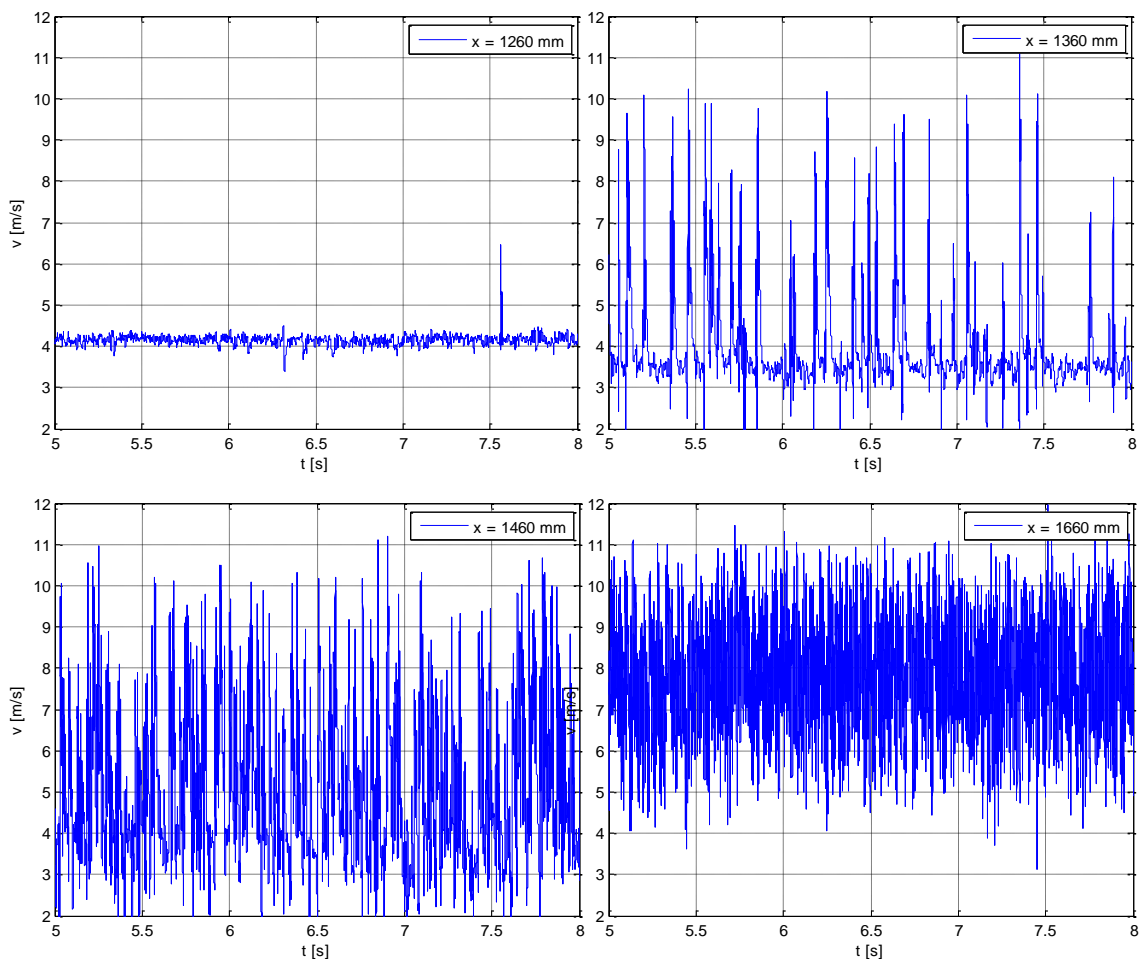


FIGURA 53 - SEGNALI DELLE SONDE A FILO CALDO, $V=8.3$ m/s, $Y=0$ MM

Si nota come la completa transizione al regime turbolento avvenga lentamente in una regione decisamente ampia, pari a circa 20 cm. Infatti a 126 cm dal punto di attacco della corrente sul corpo si ha un segnale abbastanza piatto, in cui si iniziano ad intravedere le prime instabilità, ma soltanto 10 cm più tardi si ha una vera e propria transizione in cui risulta evidente il fenomeno dell'intermittenza. Gli spettri divengono poi completamente turbolenti 10 cm più avanti; a 1660 cm è evidente infatti come la turbolenza sia completamente sviluppata.

Si è quindi proceduto all'elaborazione del segnale e se ne è calcolato il valore di deviazione standard per le cinque velocità di prova, in corrispondenza dei tre valori di y curvilinea illustrati in precedenza:

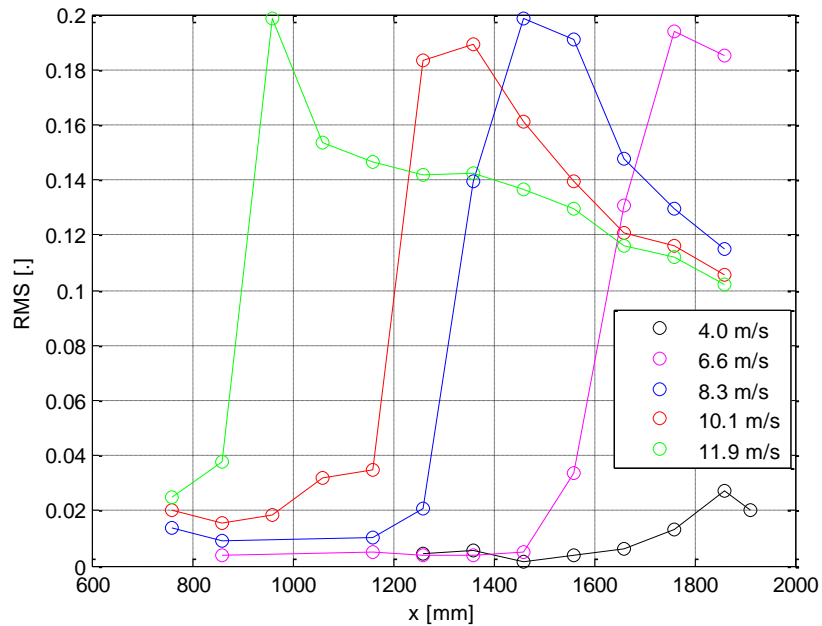


FIGURA 54 – DEVIAZIONE STANDARD, MEZZERIA

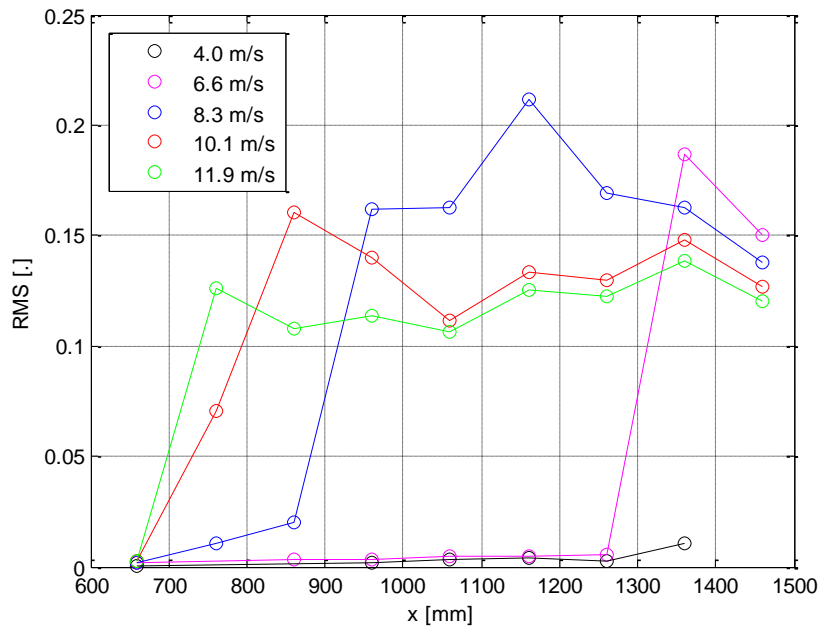


FIGURA 55 – DEVIAZIONE STANDARD, Y = 120 MM

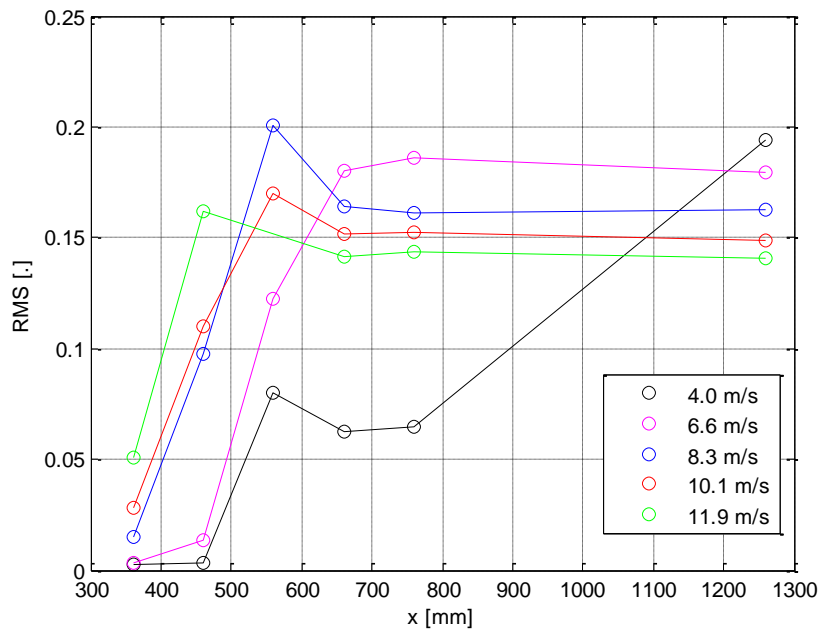


FIGURA 56 – DEVIAZIONE STANDARD, Y = 450 MM

Appare evidente come, all'aumentare delle velocità e quindi del Reynolds, la transizione si sposti in avanti, coerentemente con la teoria, passando, per quanto riguarda le misure in mezzeria, da una coordinata x di 1900 mm per la velocità più

bassa, all'altezza del cupolino posteriore, ad una di 900 mm per la velocità più elevata, prima del vetro anteriore. A 4 m/s la transizione è determinata dalla presenza di un foro presente sul cupolino trasparente posteriore, obbligatorio da regolamento quando la vettura è alimentata a idrogeno, oltre il quale si è deciso non effettuare ulteriori misurazioni.

Si nota inoltre che, per valori crescenti di y , il punto di transizione è sempre più anticipato a causa della curvatura più accentuata delle linee di corrente. Osservando la geometria della vettura, in pianta e dal lato, si possono notare dei risultati in accordo con la teoria dei corpi assialsimmetrici: infatti se dal lato si vede come il punto di massimo spessore sia molto spostato all'indietro andando a generare un'estesa zona di laminarità, effettivamente presente da letteratura per bassi Reynolds, dalla vista in pianta si capisce il perché della transizione molto più avanzata. La presenza del triciclo anteriore obbliga infatti ad avere un'elevata curvatura nella parte anteriore della vettura, con un punto di massimo spessore attorno al 20% del corpo: questo genera una rapida accelerazione ed una successiva decelerazione tale da produrre una transizione molto rapida. Bisogna inoltre tenere presente che la presenza delle carenature delle ruote stesse accentua questo fenomeno e che la turbolenza è molto diffusiva, espandendosi rapidamente fino alla parte superiore della vettura.

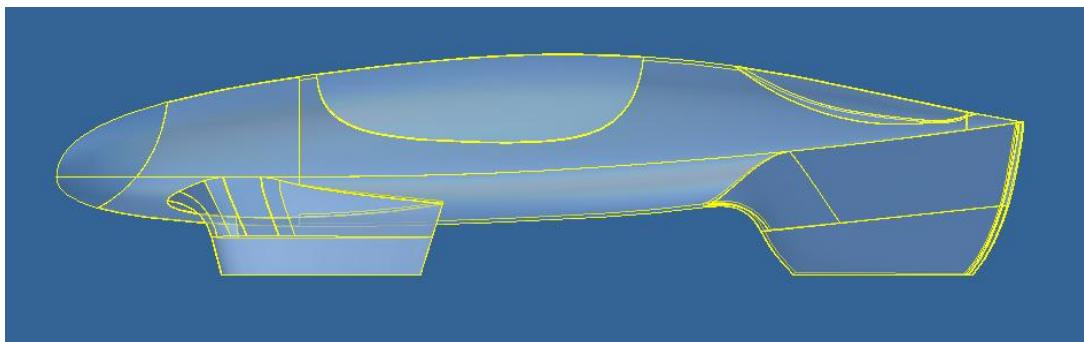


FIGURA 57 - VISTA LATERALE DEL VEICOLO

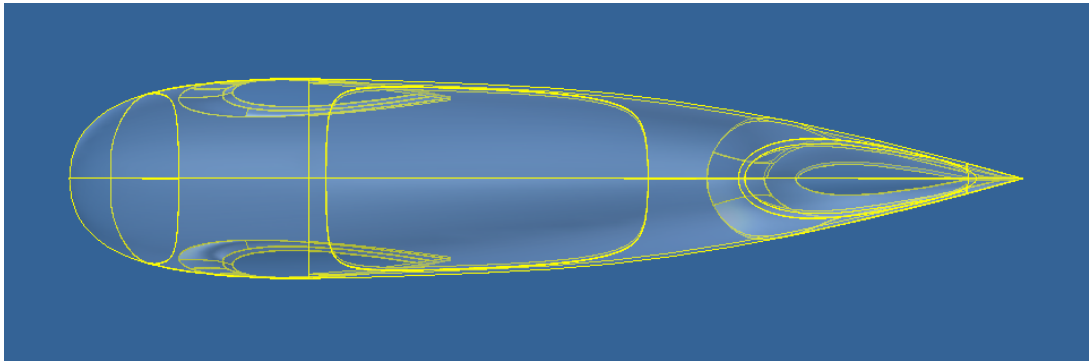


FIGURA 58 - VISTA DALL'ALTO DEL VEICOLO

Si sono infine tracciati, in base ai dati ottenuti nelle prove, le linee indicative congiungenti i punti di transizione sulla superficie della macchina al variare della velocità: si è così verificato come tali linee tendano ad avanzare all'aumentare della velocità. Per individuare la transizione, si è scelto un punto all'interno della zona corrispondente al massimo gradiente di deviazione standard.

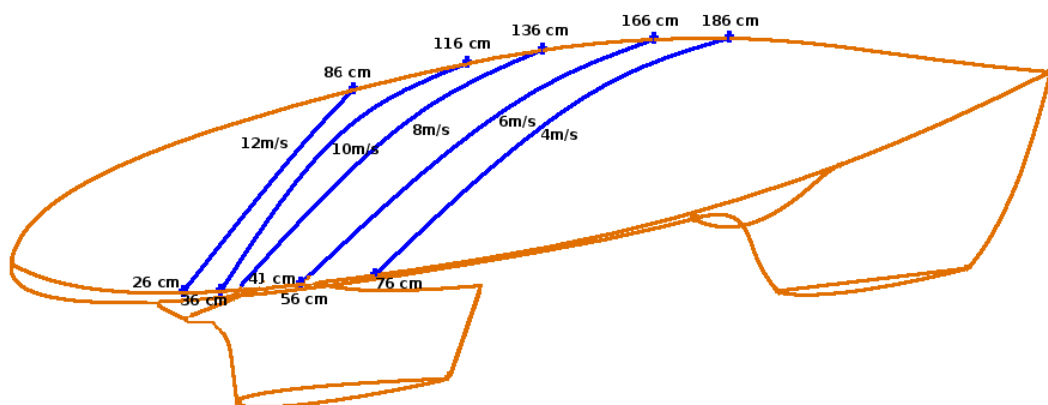


FIGURA 59 - CURVE DI TRANSIZIONE

Si osserva pertanto come le curve di transizione si avvicinino rapidamente alla parte più avanzata della vettura spostandosi lungo y . Per esempio, alla velocità di 8 m/s, il punto di transizione sul dorso si trova al 50% della lunghezza totale della vettura, mentre è solo al 15% sulle pance laterali. Evidente è inoltre la forte dipendenza dal numero di Reynolds.

BILANCIA

Sono state effettuate misurazione della resistenza aerodinamica con la bilancia di galleria in differenti configurazioni della vettura per valutare le variazioni di C_x ed avere un'ulteriore conferma delle ipotesi fatte. La macchina è stata inizialmente provata in configurazione pulita e se ne è confrontato il valore di SC_x così ottenuto, con quello relativo alla precedente vettura del Politecnico per quantificare i miglioramenti ottenuti con la nuova geometria:

Velocità 8.3 m/s	
Vettura	SC_x
Artemide	0.0399
Why not	0.0495
Miglioramento SC_x	19.39%

Si nota un netto miglioramento rispetto a Why not, anche se inferiore a quello atteso. La superficie frontale è stata infatti ridotta del 28%: questo significa che i progressi ottenuti sono dovuti unicamente a questo aspetto, mentre il C_x è aumentato rispetto alla vecchia configurazione. Se da un lato questo fatto è comunque accettabile nell'ottica di un miglioramento generale delle prestazioni, dall'altro probabilmente un così netto incremento di coefficiente di resistenza non è del tutto veritiero. Le prove su Why not infatti erano state effettuate nella galleria del Politecnico di Milano quando ancora non era presente il piano a sbalzo ma soltanto una rampa di accelerazione. In questo modo la vettura, essendo molto bassa, si ritrovava ad essere investita fortemente dallo strato limite della galleria stessa: i valori di forza misurati dalle bilance erano quindi sicuramente più bassi, essendo il veicolo immerso in un fluido a velocità inferiore. Inoltre era stata in quel caso utilizzata una configurazione a due bilance, non ideale per questo tipo di prove.

Per quanto riguarda invece la campagna sperimentale a cui fa riferimento il presente lavoro, ogni pesata è stata effettuata più volte ed il valore presentato è

quello relativo alla media tra quelli trovati. I valori restituiti dalla bilancia relativi agli altri assi e ai momenti non sono particolarmente indicativi poiché molto piccoli e quindi non misurabili con buona precisione dalla bilancia, realizzata per misure di tipo aeronautico e in ogni caso non significativi ai fini delle analisi svolte.

Dopo aver provato la vettura in configurazione pulita, è stata posizionata una striscia di transizione sulla parte anteriore della vettura per forzare la transizione e verificare un peggioramento delle prestazioni. Essendo presente infatti un'ampia zona di laminarità sul dorso della vettura, è lecito aspettarsi che la presenza di uno strato limite turbolento forzato vada ad incrementare in modo consistente la resistenza d'attrito, componente predominante della resistenza totale. Per evitare possibili riattacchi laminari di strato limite la striscia è stata posizionata a circa 50 cm dal punto di ristagno, in una zona in cui l'accelerazione della corrente risulta essere moderata.

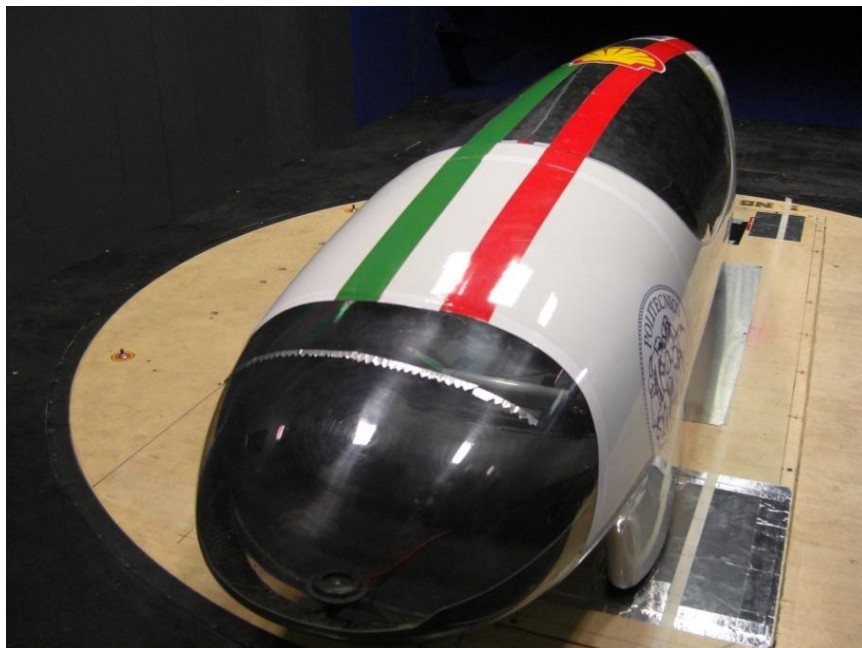


FIGURA 60 - VETTURA CON STRISCIA SULLA PARTE ANTERIORE

I risultati ottenuti sono i seguenti:

Velocità	4 m/s	8.3 m/s	12 m/s
	SC_x	SC_x	SC_x
Configurazione pulita	0.0395	0.0399	0.0396
Configurazione con striscia	0.0431	0.0420	0.0411
Peggioramento SC_x	9.1%	5.26%	3.79%

I valori più bassi di SC_x si riferiscono alla configurazione pulita. Nel caso invece di striscia di transizione posta sulla parte anteriore della vettura, i risultati hanno ulteriormente validato le analisi effettuate con il filo e confermato quanto trovato in letteratura al riguardo; effettivamente in tale zona lo strato limite si mantiene laminare per tutti i valori di velocità provati e forzare la transizione, anticipandola, significa innalzare inevitabilmente la resistenza e quindi anche il C_x . È infine interessante segnalare come l'effetto peggiorativo della striscia in termini di C_x diminuisca con l'aumentare della velocità, in quando ad alti Reynolds il punto di transizione naturale è comunque spostato verso la parte anteriore della vettura. I coefficienti di resistenza sono invece molti simili al variare del Reynolds. Questo potrebbe far pensare che la resistenza complessiva della vettura non dipenda particolarmente dall'attrito e dunque dalla transizione. Bisogna tuttavia sottolineare che si hanno regioni di ampia laminarità solamente in una zona di superficie ristretta: per questo motivo è ipotizzabile che gli effetti legati alla riduzione di tale zona con l'aumentare della velocità, che porterebbero a dei C_x maggiori, siano compensati dalla riduzione dello spessore di strato limite e dalla scomparsa delle bolle di separazione laminare oggetto del prossimo capitolo.

2. PROVE SU ALCUNI DETTAGLI

Sono state poi effettuate anche alcune prove in zone particolari della vettura. Si è dapprima posta l'attenzione sulle carenatura delle ruote anteriori, sulle quali è stata posizionata la sonda a filo caldo. Nello specifico il filo caldo si trova a 14 cm da terra e a 12 cm dal bordo di attacco della carenatura.



FIGURA 61 - SONDA SULLA CARENATURA DELLA RUOTA ANTERIORE

In tale punto si sono riscontrati con la sonda valori prossimi allo zero per tutte le velocità di prova; come visto per il piano questo è spesso indice della presenza di bolle di ricircolo.

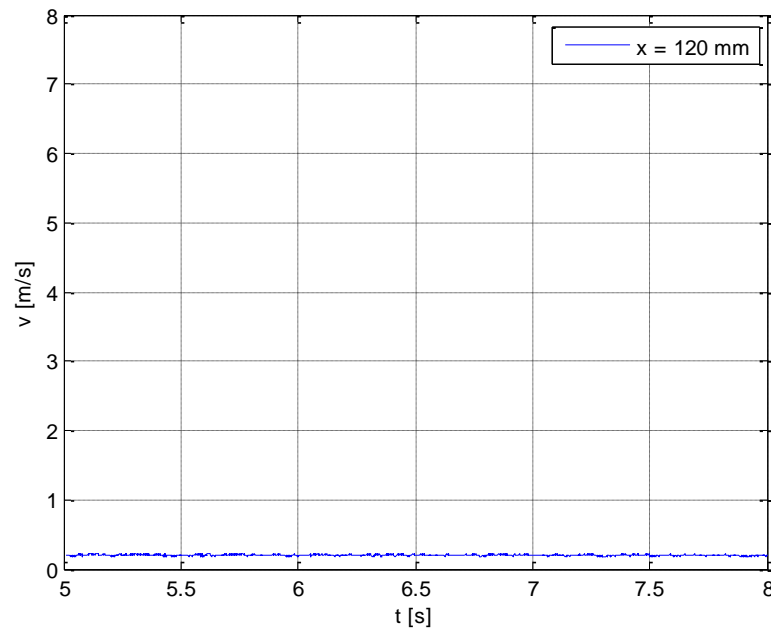


FIGURA 62 - SEGNALE SULLA CARENATURA DELLA RUOTA, $H=140$ MM, $V=8.3$ M/S

Spostandosi di pochi centimetri lungo la coordinata longitudinale all'interno di tale regione si sono registrati cambiamenti significativi. In particolare a 9 cm dal bordo di attacco delle carene, lo strato limite si presentava laminare per ogni velocità, mentre a 17 cm si è riscontrata la presenza della bolla fino a 8.3 m/s; per valori di velocità più elevati si è invece ottenuto un segnale tipicamente turbolento, dettato probabilmente dal riattacco della bolla stessa. Si è deciso quindi di ricorrere ad una visualizzazione con dei fili di cotone alle varie velocità per studiare meglio il fenomeno.



FIGURA 63 - VISUALIZZAZIONE CON FILI DI LANA A 6M/s

Non si sono notate zone di controcorrente in quanto i fili seguono la direzione del flusso di aria; alcuni di essi tuttavia sembrano evidenziare regioni a velocità più bassa in prossimità della parete a causa della differente inclinazione rispetto agli altri. Considerando che i fili con tale comportamento sono quelli nel punto di maggior spessore, dove dovrebbe essere più elevata la velocità, questo porta a pensare che sia presente effettivamente una bolla piuttosto ampia ma sottile per cui i fili non rimangono totalmente immersi nello strato in controcorrente. Questo fenomeno è stato visibile fino a 8.3 m/s, mentre oltre tale velocità i fili paiono decisamente allineati al vento.

Si è quindi proceduto alla realizzazione e posizionamento di una striscia di transizione a monte della regione di interesse che permettesse di scongiurare la presenza di bolle e garantire un flusso attaccato, anche se ovviamente turbolento.



FIGURA 64 - STRISCIA SULLA CARENATURA DELLE RUOTE ANTERIORI

Si sono a questo punto fatte nuovamente rilevazioni con il filo caldo nella medesima posizione vista in precedenza (12 cm dall'inizio della carenatura delle ruote anteriori) e si sono ottenuti segnali tipici di uno strato limite turbolento per tutte le velocità analizzate.

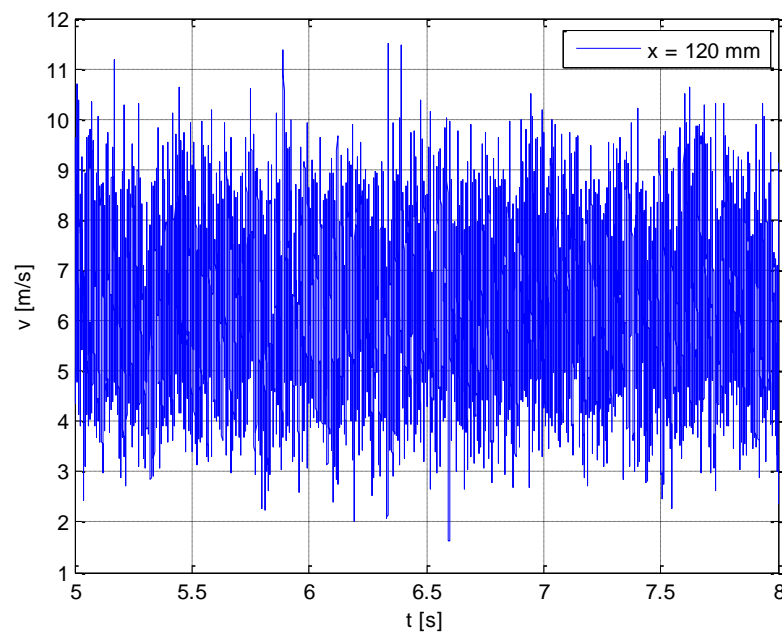


FIGURA 65 - SEGNALE SULLA CAR. DELLA RUOTA CON STRISCIA, H=140 MM, V=8.3 M/S

Si è deciso pertanto di effettuare delle pesate con due strisce di transizione poste in corrispondenza delle carenature, per verificare se queste portassero un effettivo miglioramento dal punto di vista del C_x . I risultati ottenuti vengono esposti nella tabella sottostante:

Velocità	4 m/s	8.3 m/s	12 m/s
	SC_x	SC_x	SC_x
Configurazione pulita	0.0395	0.0399	0.0396
Configurazione con striscia	0.0393	0.0402	0.0401
Peggioramento SC_x	-0.51%	0.75%	1.26%

Ponendo le strisce sulle carenature delle ruote si sono ottenuti risultati molto vicini a quelli della configurazione pulita. Avendo individuato una zona con bolla di separazione ci si attendeva un leggero miglioramento, ma del resto la striscia è stata realizzata a mano, è molto spessa e non è certamente quella ottima per garantire una transizione con il minimo di resistenza possibile. Inoltre per motivi di tempo non è stato possibile indagare circa la sua lunghezza, andando probabilmente a toccare zone che non necessitavano di tale trattamento. La striscia non è stata poi posizionata ad una ascissa molto arretrata, al limite della zona laminare, poiché non si conosceva esattamente la posizione di quest'ultima avendo potuto fare solo poche rilevazioni. Pertanto è probabile che, se da un lato si è risolto il problema della bolla con questo artificio, come suggerito dal segnale rilevato dalle sonde, di contro le forme poco accurate dei denti della striscia e la sua lunghezza non studiata nel dettaglio abbiano annullato i benefici effetti di cui sopra. Tuttavia posizionando la striscia non si registrano evidenti peggioramenti nella resistenza; ciò dimostra che il fenomeno visto con le sonde è effettivamente presente e che in futuro si potranno migliorare le carenature della vettura tenendo conto di questo aspetto.

Infine sono state effettuate delle pesate con l'alettone realizzato per alimentare il veicolo anche ad energia solare.

Velocità 8.3 m/s	
	SC _x
Configurazione pulita	0.0399
Configurazione con alettone	0.0522
Peggioramento SC_x	30.83%

Il peggioramento è parso in questo caso subito evidente. Il C_x inoltre, oltre ad essere decisamente più elevato a causa della forma poco aerodinamica del corpo, oscilla in un range di valori decisamente ampio. Ciò non è dovuto ad errori di ripetibilità legati alla bilancia, quanto piuttosto alle oscillazioni dell'alettone durante le prove a causa dei vincoli che presentavano parecchio gioco.



FIGURA 66 - VEICOLO CON ALETTONE

3. ANALISI DELL'ERRORE

I principali contributi all'errore nel calcolo del C_x sono legati alle forze e alla pressione dinamica. Quest'ultima è stata rilevata mediante il barometro Mensor, con fondo scala pari a 2500 Pa e accuratezza dello 0.01% del FS; è quindi possibile calcolare gli errori relativi sulla pressione dinamica alle tre velocità come:

$$\varepsilon_{rel\,din} = \frac{1 \cdot 10^{-4} FS}{\bar{q}_u}$$

in cui \bar{q}_u è la dinamica di riferimento ottenuta come media delle pressioni dinamiche rilevate alle diverse prove per il medesimo valore di velocità.

Nelle forze invece le componenti principali dell'errore sono ripetibilità, accuratezza e non linearità. Gli errori legati alla non linearità sono solitamente piccoli e pertanto trascurabili, mentre per ciò che riguarda l'accuratezza bisogna considerare che la bilancia è stata realizzata per misurare forze decisamente maggiori di quelle rilevate durante le prove e per questo motivo non esiste, nella documentazione relativa alla bilancia, una fascia di carico corrispondente a quella di interesse. Le stime degli errori sarebbero state pertanto eccessivamente conservative e poco realistiche. Di conseguenza si è deciso di analizzare solamente gli errori di ripetibilità, in ogni caso ottimo indice dell'incertezza:

$$\varepsilon_{rel\,F} = \left(\frac{F}{q_u} \bar{q}_u - \bar{F} \right) / \bar{F}$$

L'errore relativo sul C_x sarà la somma in quadratura dei due.

Velocità	4 m/s	8.3 m/s	12 m/s
$\varepsilon_{rel\,din}$	0.0128	0.0030	0.0015
$\varepsilon_{rel\,F}$	0.0344	0.0158	0.0135
$\varepsilon_{rel\,C_x}$	0.0367	0.0161	0.0136

Si nota come gli errori siano abbastanza contenuti e diminuiscano all'aumentare del valore di velocità, variando dal 3.7% a 4 m/s al 1.36% a 12 m/s. Si possono pertanto ritenere attendibili i valori di C_x fino alla terza cifra significativa.

Per le sonde a filo caldo invece l'errore più grande è dovuto al posizionamento, pertanto non si è ritenuto opportuno effettuare analisi più approfondite.

6.

SIMULAZIONI NUMERICHE

Per completare lo studio della fenomenologia connessa alla vettura sono state effettuate delle simulazioni numeriche. Per fare ciò si è ricorsi all'utilizzo di Fluent come codice di calcolo e Gambit come preprocessore. Fluent risolve l'equazione di Navier Stokes con una discretizzazione ai volumi finiti: la tecnica consiste nell'integrare le equazioni in ogni volume di controllo ottenendo equazioni discrete che rispettano la conservazione di ogni quantità nel volume di controllo medesimo. Fluent utilizza elementi tetraedrici, esaedrici, piramidali o con una combinazione di questi. La griglia viene generata esternamente al programma di calcolo in Gambit e poi adattata in modo opportuno da Fluent per tener conto delle zone a elevato gradiente di velocità.

Per imporre il punto di transizione è necessario suddividere il volume di aria attorno alla vettura in differenti regioni in modo da poter scegliere di volta in volta condizioni differenti di laminarità o turbolenza del flusso.¹⁵

¹⁵ Fluent manual, 2008

1. BASI TEORICHE E MODELLI DI TURBOLENZA

I flussi turbolenti, caratterizzati da un elevato numero di Reynolds, presentano un moto irregolare tridimensionale ed instazionario in cui le grandezze tipiche, quali ad esempio massa, quantità di moto ed energia variano nel tempo e nello spazio generando mutamenti casuali delle proprietà del fluido. Il calcolo completo e dettagliato di queste grandezza richiederebbe costi computazionali troppo elevati, pertanto solitamente si ricorre a dei modelli di turbolenza semplificati che costituiscono una approssimazione della realtà ma consentono la chiusura del problema fornendo le equazioni sufficienti all'identificazione delle nuove variabili introdotte.

Si ricorre solitamente ai modelli RANS, basati sulle equazioni mediate di Navier-Stokes, note come equazioni di Reynolds. Per ricavare le equazioni mediate le variabili vengono scomposte in una componente media ed una fluttuante,

$$u = \bar{u} + u'$$

Sostituendo ciò nelle equazioni di continuità e di quantità di moto ed eseguendo una media temporale si ottengono le equazioni di Navier-Stokes mediate alla Reynolds:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \\ \rho \frac{\bar{D} \bar{u}_j}{\bar{D} t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \bar{p} \delta_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \end{array} \right.$$

dove $\frac{\bar{D}}{\bar{D} t}$ è l'operatore di derivata sostanziale mediata, definito come

$$\frac{\bar{D}}{\bar{D} t} = \frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla.$$

Tali equazioni presentano i valori mediati di velocità, più dei termini aggiuntivi rappresentativi della turbolenza, detti sforzi di Reynolds ($-\rho \overline{u'_i u'_j}$). Questi ultimi devono essere modellati per ottenere la chiusura della seconda equazione. Il

metodo più comune per fare ciò è ricorrere all'ipotesi di Boussinesq, che ci consente di correlare gli sforzi di Reynolds con i gradienti della sola velocità media:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) = 2\mu_t \bar{S}_{ij}$$

in cui lo scalare $\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho}$ prende il nome di viscosità turbolenta. Se ne deduce che l'anisotropia degli sforzi di Reynolds $a_{ij} = \overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$ si determina unicamente tramite i gradienti della velocità media $\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$ (ipotesi intrinseca) e inoltre che si può anche definire a_{ij} come $a_{ij} = -2\nu_t \bar{S}_{ij}$ (ipotesi specifica). Per il calcolo della viscosità turbolenta esistono modelli algebrici, validi per una limitata tipologia di flussi come flussi 2D turbolenti o strati limite liberi, e modelli differenziali decisamente più accurati. I modelli differenziali a loro volta si suddividono in quelli a una equazione e in quelli a due equazioni. I modelli di tipo RANS a disposizione in Fluent sono lo Spalart-Allmaras (modello differenziale a una equazione), il k- ϵ (modello differenziale a due equazioni) in versione standard, realizable e RNG, e il k- ω , analogo al precedente ma con l'incognita ω a sostituire ϵ .

SCELTA DEL MODELLO DI CALCOLO

In Fluent sono presenti anche modelli più accurati di quelli RANS: è infatti possibile utilizzare la Large Eddy Simulation (LES). Questo metodo risolve le equazioni di Navier-Stokes mediate nello spazio, in cui le strutture turbolente più grandi vengono risolte direttamente, mentre quelle più piccole, al di sotto di una soglia opportunamente stabilita, vengono modellate. In questo caso tuttavia i costi computazionali sono molto elevati e la scelta del modello di calcolo è rimasta così all'interno dei modelli RANS.

Modello	Punti di forza	Difetti
Spalart-Allmaras	Economico; ottimo per strati limite non complessi	Non ancora ben testato e carente di sottomodelli
STD k-ε	Robusto, economico, abbastanza accurato, e di provata affidabilità dato che molto utilizzato	Risultati mediocri per flussi abbastanza complessi tra cui quelli aventi elevati gradienti di pressione, curvatura delle linee di corrente o rotazione
RNG k-ε	Buono per flussi abbastanza complessi presentanti separazioni, rotazioni e flussi secondari	Limitazioni legate al fatto che la viscosità turbolenta è assunta come isotropa
Realizable k-ε	Offre in modo leggermente più esteso i vantaggi dell'RNG e funziona bene anche per i round-jet	Limitazioni legate al fatto che la viscosità turbolenta è assunta come isotropa
RSM	È il modello più complesso e tiene conto della storia, del trasporto e dell'anisotropia degli sforzi turbolenti	Richiede mezzi di calcolo particolarmente potenti, essendo il costo computazionale molto elevato

Per la scelta del modello è stata svolta una ricerca sui modelli presentati circa lo stato dell'arte delle prove automobilistiche. Si è alla fine optato per il modello k-ε "realizzabile", il quale consente rispetto ad un modello standard una predizione più accurata di zone di separazione e bolle di ricircolo e quindi una valutazione più precisa del campo di sforzi e di pressione sulla superficie del veicolo.

Per modellare il flusso vicino a parete si è ricorsi all'utilizzo delle wall functions. Tali funzioni vengono attivate per circa $11 y^+$: al di sotto di tale soglia il flusso è considerato laminare, al di sopra completamente turbolento. In questo modo è

stato possibile risparmiare celle e tempo di calcolo. Del resto la realizzazione di una discretizzazione fine anche per il substrato viscoso avrebbe comportato un numero di celle troppo elevato per i mezzi a disposizione. Mediante invece l'utilizzo delle wall function è possibile generare elementi in prossimità della parete di grandezza variabile compresa tra le 50 e le 500 y^+ .

Il metodo di calcolo di fluent utilizza due differenti approcci, solutore segregato e accoppiato. Il solutore segregato è realizzato per flussi incomprimibili, mentre l'aggregato è adatto per flussi ad alta velocità caratterizzati da forze a modulo elevato: pertanto si è deciso di utilizzare il primo.

2. MODELLO DEL VEICOLO

Il modello del veicolo è stato realizzato con Inventor.

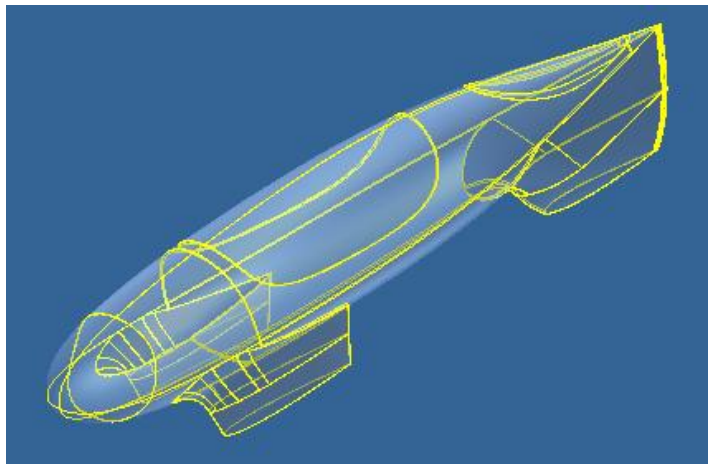


FIGURA 67 - MODELLO CAD DELLA MACCHINA

Tale modello è stato poi importato in Gambit per poter realizzare una discretizzazione opportuna. In primo luogo la vettura è stata suddivisa lungo il suo piano di simmetria verticale per dimezzare il costo computazionale.

Il modello è stato poi semplificato, unendo alcune superfici di piccole dimensioni, presenti soprattutto in corrispondenza degli spigoli della vettura, per evitare di dover ricorrere ad elementi di dimensioni troppo piccole.

Il volume di aria intorno al corpo è stato quindi simulato come in figura:

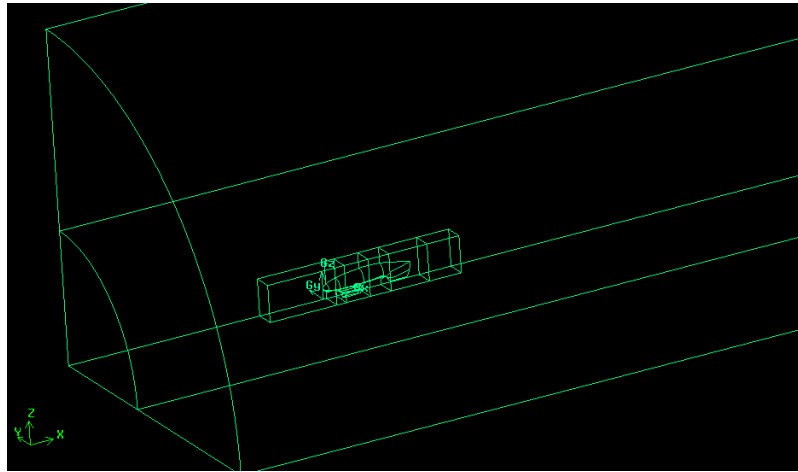


FIGURA 68 - VETTURA E CAMERA DI PROVA

Il dominio è stato suddiviso quindi in sette zone:

- dominio cilindrico esterno caratterizzato da un raggio di 10 m, una superficie di ingresso posta 8 m davanti al corpo ($x=-8m$) e una superficie di uscita collocata 30 m dopo l'origine dell'asse x: la lunghezza totale è quindi di 38 m.
- dominio cilindrico interno al primo, caratterizzato da un raggio di 4 m e dalla medesima lunghezza.
- dominio del veicolo, a forma di parallelepipedo, caratterizzato da una superficie di ingresso posta 2 m davanti al corpo e una superficie di uscita collocata a 4 metri dopo l'origine dell'asse x; lo spostamento laterale y è di 0.6 m. Tale dominio è stato suddiviso in cinque zone differenti per poter studiare meglio il veicolo e imporre le condizioni di laminarità o turbolenza del flusso attorno alla superficie.
- dominio della scia, necessario per modellare correttamente il flusso d'aria dietro al veicolo: si estende dalla fine del dominio del veicolo, 4 m, fino alla fine del dominio ($x=30 m$); lo scostamento laterale è di 0.6 m.

3. CONDIZIONI AL CONTORNO

La simulazione numerica effettuata comprende il volume di un parallelepipedo attorno alla vettura, uno rappresentante la scia e un volume molto più grande circostante, che vuole rappresentare una zona di corrente irrotazionale. Il fluido è ritenuto incomprimibile a causa delle basse velocità a cui si è analizzata la vettura in galleria. Per ottenere risultati realistici è stato necessario imporre condizioni al contorno:

- parete solida: utilizzata per definire le regioni solide immerse nel fluido su cui viene imposta la condizione di non scorrimento, ovvero sul corpo della vettura. Per evitare l'insorgere di uno strato limite non presente nella realtà, sul suolo è stata data una condizione di scorrimento pari a 8.3 m/s;
- velocità in ingresso: condizione valida solo per flussi incomprimibili, utilizzata per definire la velocità e alcune proprietà scalari del fluido di ingresso. Le proprietà del flusso non sono fisse ma si adattano in modo da mantenere la distribuzione di velocità richiesta. Il valore dato sull'intera superficie di ingresso è pari a 8.3 m/s;
- simmetria: utilizzata sul piano di simmetria in modo da dimezzare la griglia di calcolo. Fluent assume come nulli i gradienti di tutte le variabili e la velocità in direzione normale al piano: di conseguenza si annulla lo sforzo d'attrito sul piano di simmetria e si ha così una parete con condizione di scorrimento.
- flusso in uscita: da utilizzarsi quando non si conoscono a priori i dettagli della velocità e della pressione del flusso all'uscita del dominio di calcolo. Questa condizione è adatta solamente quando il flusso in uscita è completamente sviluppato, cioè quando il profilo di velocità non varia nella direzione del moto.

4. DISCRETIZZAZIONE DEL MODELLO

Per definire la dimensione delle celle sulla parete solida è stata effettuata una stima preliminare dello spessore dello strato limite turbolento lungo il corpo della vettura, utilizzando la formula empirica valida anche per corpi leggermente arrotondati:

$$\delta(x) = 0.368 \left(\frac{\nu}{U_0} \right)^{1/5} x^{4/5}$$

Si nota come la crescita dello strato limite turbolento sia decisamente più elevata rispetto a quella dello strato limite laminare, proporzionale a $x^{1/2}$. Supponendo di posizionarsi a un metro dal bordo di attacco della macchina si ricavano valori di δ pari a circa 2.6 cm. Questo valore è una indicazione di quanto sia necessario infittire la discretizzazione in prossimità del corpo per avere risultati attendibili e valori di y^+ adeguati, compresi tra 50 e 500. Come stima preliminare si è scelto di stimare la grandezza minima degli elementi prossimi alla superficie, una volta noto il coefficiente di attrito (circa 0.005), a 100 unità di parete:

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{C_f}{2}$$

$$\tau_w = \rho U_0^2 \frac{d\theta}{dx}$$

$$\delta_v = \nu \sqrt{\frac{\rho}{\tau_w}}$$

$$y = y^+ \delta_v$$

Si è ricavata una dimensione per le celle più piccole non superiore ai 4 mm. Tutte le superfici sono state pertanto modellate con elementi triangolari di 4mm, mentre i volumi con elementi tetraedrici. Non si sono utilizzati elementi quadrati in quanto poco adatti a superfici a elevata curvatura come quelle presenti nel nostro modello.

A titolo d'esempio viene presentata la discretizzazione realizzata sul piano di simmetria verticale della vettura:

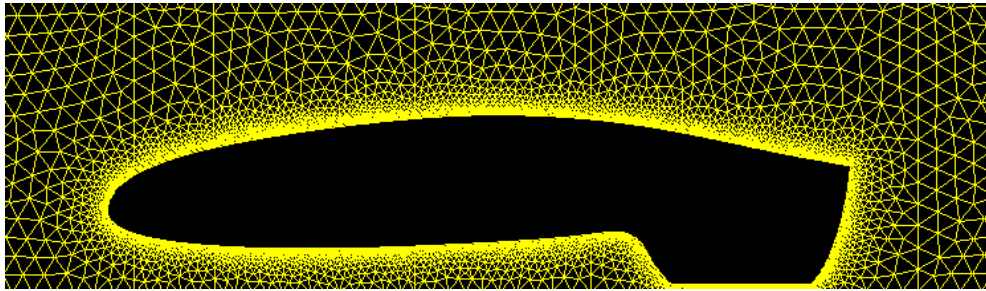


FIGURA 69 - MESH REALIZZATA SUL PIANO DI SIMMETRIA DELLA VETTURA

Si è poi andati a verificare che i valori di unità di pareti fossero coerenti con quanto desiderato:

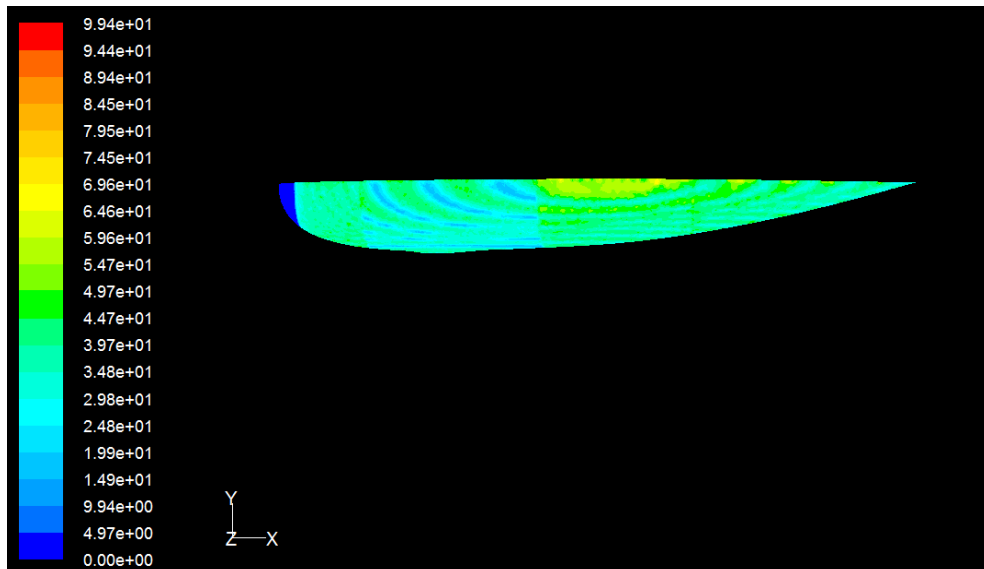


FIGURA 70 - VALORI DI UNITÀ DI PARETE SULLA SUPERFICIE DELLA VETTURA

Si nota come non vengano superate le 100 unità di parete e si riesca quindi a rimanere ben oltre al sotto del limite prefissato di 500. Sul naso della vettura si nota inoltre una zona blu a cui corrisponde un valore nullo di unità di parete; ciò accade perché è stata in questo caso imposta la condizione di laminarità su di esso.

Per ciò che riguarda invece i parametri di ingresso si sono imposti per l'energia cinetica turbolenta k il valore di 10^{-6} mentre per ϵ il valore di 1, valori tipici di una galleria con buona qualità di vena.

5. INFLUENZA DEL PUNTO DI TRANSIZIONE

Per comprendere l'importanza del punto di transizione sulla resistenza è stato svolto uno studio preliminare imponendo differenti condizioni di laminarità in corrispondenza di ciascuna delle suddivisioni del volume circostante la vettura viste in precedenza.

Il campo di velocità sul piano verticale di simmetria è quello rappresentato in figura:

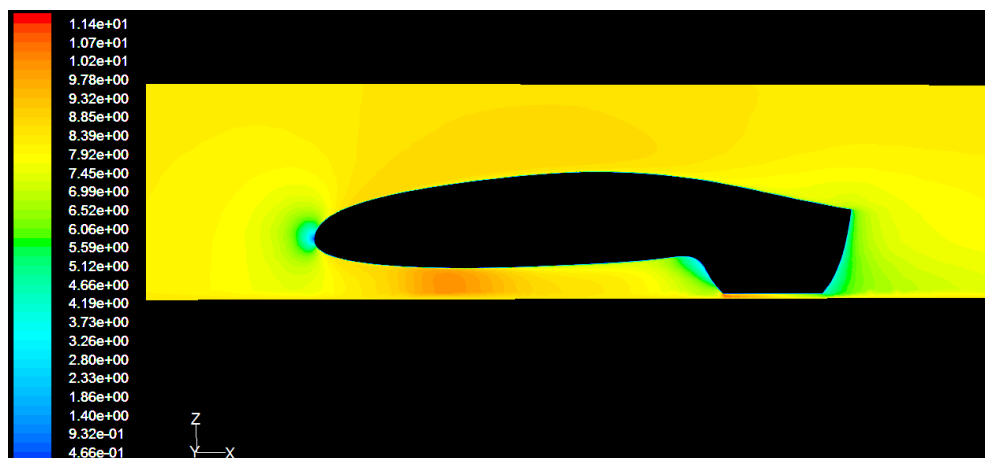


FIGURA 71 - CAMPO DI VELOCITÀ SUL PIANO DI SIMMETRIA DELLA VETTURA

Si vede chiaramente come sia presente la zona di ristagno in corrispondenza del naso della vettura e del bordo d'attacco della carenatura della ruota posteriore. Inoltre sono presenti zone ad elevata velocità in corrispondenza della ruota anteriore e nella piccola fessura presente tra il pavimento e la copertura della ruota posteriore. Infine si può notare come nella parte posteriore al corpo la scia non presenta zone di ricircolo, caratterizzate da valori negativi di velocità.

Si riportano in tabella i valori di pressione e forze viscosse nelle diverse configurazioni. Si è adimensionalizzato prendendo come riferimenti la velocità asintotica a monte, 8.3 m/s, e l'area frontale di metà vettura (0.14 m^2).

pressure Force [N]	viscous force [N]	total force [N]	Pressure coefficient	Viscous Coefficient	total coefficient	SCx [m ²]
Laminare: volume 1; x = 0-100 mm						
0.32516	0.50555	0.83072	0.0546	0.0850	0.1396	0.0391
Laminari: volumi 1 e 2; x = 0-400 mm						
0.33813	0.48100	0.81914	0.0568	0.0808	0.1377	0.0385
Laminari: volumi 1, 2 e 3; x = 0-1150 mm						
0.31127	0.39600	0.70728	0.0523	0.0666	0.1189	0.0333
Laminari: volumi 1, 2, 3 e 4; x = 0-1800 mm						
0.32606	0.34636	0.67243	0.0632	0.0582	0.1130	0.0316

Si vede come la forze viscoso costituiscono buona parte della resistenza complessiva e diminuiscono chiaramente imponendo crescenti zone di laminarità, mentre le forze di pressione si mantengono circa costanti. Per visualizzare meglio quanto detto si riporta il grafico con l'andamento dei coefficienti di resistenza rispetto alle zone di laminarità imposta.

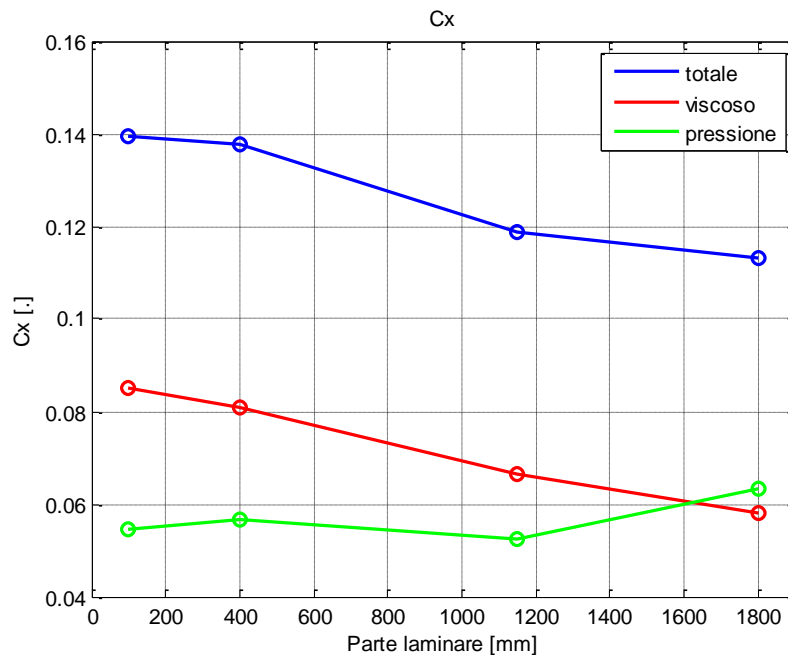


FIGURA 72 - ANDAMENTO DEL Cx AL VARIARE DELLE ZONE DI LAMINARITÀ

6. CONFRONTO CON I DATI SPERIMENTALI

Si è quindi effettuata una ultima simulazione in cui si è imposta una linea di transizione corrispondente a quella rilevata sperimentalmente con le prove in galleria del vento. Per fare ciò si è suddiviso ulteriormente il volume in modo da partizionare la superficie del corpo lungo la linea di transizione.

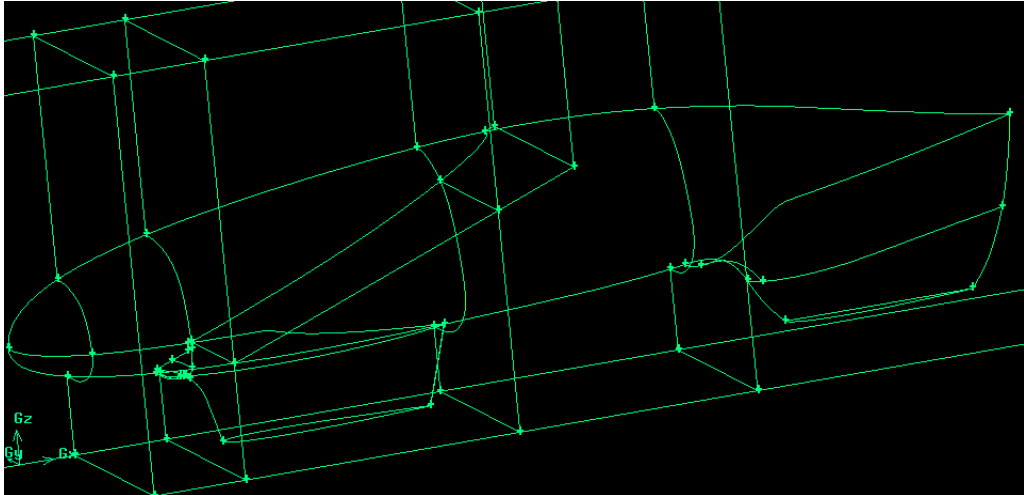


FIGURA 73 - NUOVA SUDDIVISIONE DEI VOLUMI

Si sono utilizzate anche in questo caso le size function, con una dimensione della prima cella di 4 mm. I risultati emersi dal confronto sono i seguenti:

Velocità 8.3 m/s	
	SC _x
Prove sperimentali	0.0399
Simulazione numerica	0.0366
Differenza SC _x	0.0033

Si nota come vi sia un buon accordo tra i valori sperimentali e quelli numerici. Le piccole differenze possono essere dovute a molteplici motivi: a parte gli errori intrinsecamente legati alle misurazioni ed alla tecnica numerica occorre ricordare che il modello sperimentale e quello numerico presentavano alcune diversità non

completamente trascurabili. Tra queste la più importante riguarda la modellazione del piano stradale, che in galleria risultava essere fisso rispetto alla vettura, mentre nella simulazione era correttamente fisso rispetto al vento incidente.

Per meglio comprendere quali siano le parti della vettura che maggiormente incidono sul valore di resistenza si è deciso di analizzarle singolarmente, evidenziando i vari contributi:

Zona	Pressione	SCx	
		Viscoso	Totale
Corpo laminare	-0,0330	0,0037	-0,0292
Corpo turbolento	0,0358	0,0104	0,0463
Gambe anteriori	0,0015	0,0038	0,0053
Gamba posteriore	0,0109	0,0032	0,0142
Totale corpo	0,0028	0,0142	0,0170
Totale	0,0152	0,0213	0,0366

La componente di resistenza legata all'attrito corrispondente alle gambe non contribuisce in maniera preponderante al totale. Al contrario è evidente come la gamba posteriore incida fortemente sulla resistenza di pressione, incrementando l' SC_x totale di quasi il 30%. Questo è indice di una cattiva progettazione del componente e della presenza di una scia estesa dietro di esso.

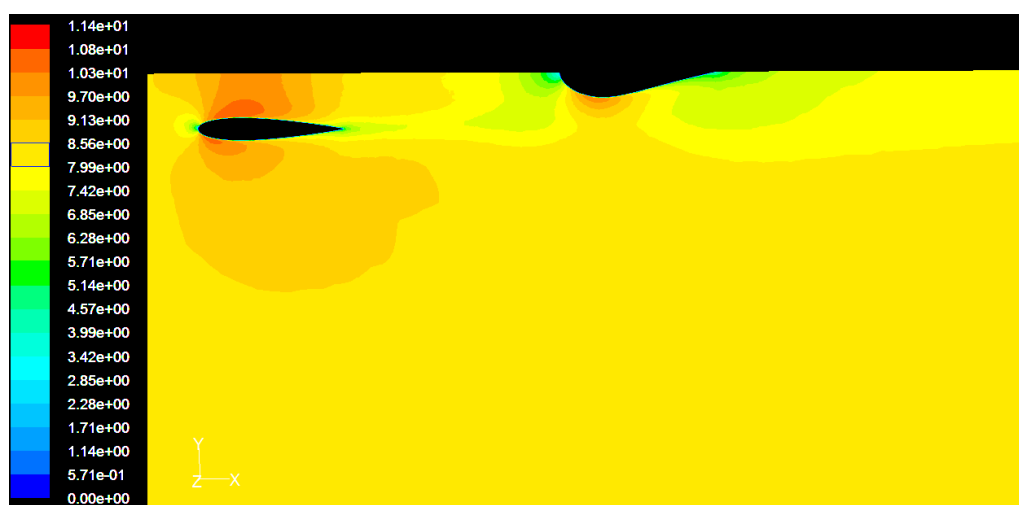


FIGURA 74 - CAMPO DI VELOCITÀ SU UN PIANO X-Y A UNA QUOTA DI 0.14 M

In figura 74 si nota il buon comportamento della carenatura della ruota anteriore. Sono evidenti le asimmetrie legate all'accelerazione del flusso al di sotto del corpo della vettura, nonostante ciò la scia si mantiene abbastanza ridotta. Questa tuttavia va ad influire in maniera significativa sul campo di moto in corrispondenza della carenatura posteriore, ampliando la zona a bassa velocità.

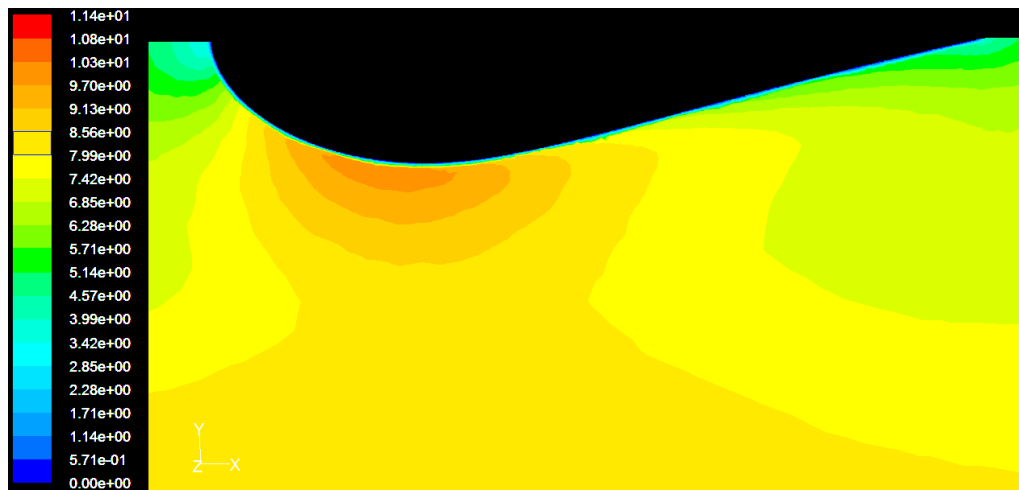


FIGURA 75 - CAMPO DI VELOCITÀ, DETTAGLIO DELLA CARENATURA POSTERIORE

Dai particolari della gamba posteriore si denota un deciso ispessimento dello strato limite conseguente alla forte decelerazione, con un principio di separazione. Questo comporta l'insorgere di una scia estesa e giustifica il mancato recupero di pressione e il conseguente elevato valore di resistenza.

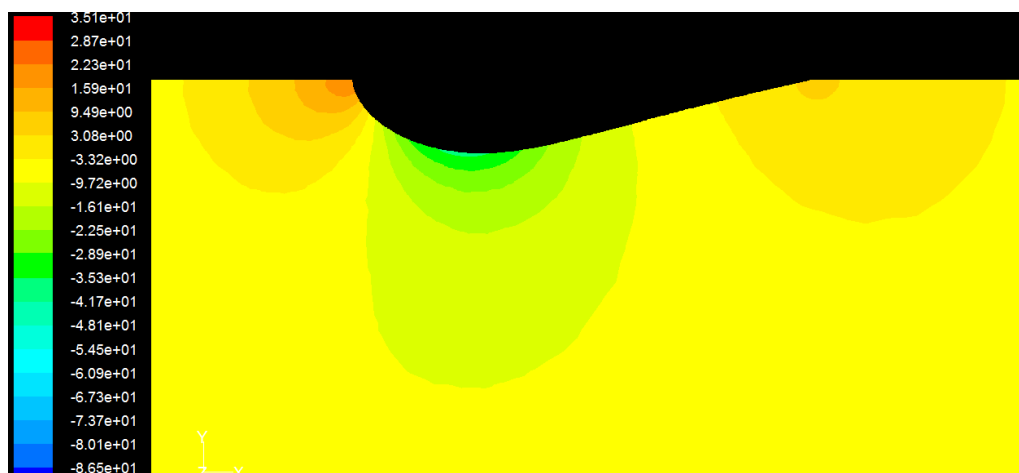


FIGURA 76 - CAMPO DI PRESSIONE, DETTAGLIO CARENATURA POSTERIORE

Per quello che invece riguarda il corpo, la parte turbolenta genera da sola la metà della resistenza d'attrito: è chiaro come limitando questa zona sia possibile migliorare le prestazioni in modo significativo. Se si confrontano questi valori con quelli visti nel secondo capitolo per corpi ideali assialsimmetrici, ottimizzati per il Reynolds di prova, si vede come siano nettamente superiori a quelli stimati.

	C_x
Hansen	0.031
Lutz	0.019
Corpo vettura	0.061
Totale vettura	0.131

Se si considera solamente il corpo, si vede come ci si avvicini maggiormente a tali valori, che indicano il limite progettuale della ricerca aerodinamica. La differenza attuale è imputabile sicuramente all'ampia zona turbolenta, ma anche all'interferenza generata dalle carenature delle ruote e alla non perfetta assialsimmetria del corpo. La differenza rispetto al caso ideale è comunque considerevole e pertanto è possibile pensare ci siano ampi margini di miglioramento.

7.

CONCLUSIONI

In una competizione come la Shell Eco-Marathon l'obiettivo della limitazione dei consumi ha condotto ad una ricerca approfondita anche in campo aerodinamico, al fine di minimizzare la resistenza. In quest'ottica lo studio svolto ha sicuramente contribuito a fornire un panorama abbastanza completo della fenomenologia in esame, andando ad analizzare il comportamento dello strato limite su buona parte della superficie della vettura. I risultati ottenuti hanno mostrato come sia presente una linea di transizione fortemente inclinata dal dorso verso le pance della vettura, pur evidenziando un'estesa zona di laminarità sul dorso della stessa. Sviluppi futuri in questo senso potrebbero condurre ad una mappatura più completa della superficie, che possa delineare in modo più completo le linee di transizione ed eventuali separazioni.

Per ciò che riguarda la vettura, a seguito delle prove effettuate, è possibile dare sin d'ora indicazioni su possibili miglioramenti e problematiche da risolvere. Sul mezzo attuale in primo luogo si è evidenziata la necessità di progettare nuovamente le carenature delle ruote anteriori, in quanto sedi di zone di ricircolo, e di studiare più accuratamente quella posteriore, priva di una forma ottimale e investita dalla scia distaccatasi dalla parte anteriore. Inoltre i vetri dovrebbero essere vincolati meglio al corpo della vettura in quanto si sono evidenziate, nel corso delle prove, forti vibrazioni con conseguente instabilità del flusso e aumento della resistenza.

Infine è parso evidente come l'alettone a pannelli solari debba essere rivisto completamente dal punto di vista della forma e dei vincoli con eccessive labilità.

In ottica futura sarebbe probabilmente opportuno pensare ad un nuovo veicolo, che cerchi di risolvere le problematiche attuali e possa portare ad un ulteriore diminuzione di SC_x . La configurazione a triciclo anteriore, con corpo vettura affusolato e rialzato da terra, è ormai soluzione adottata da tutti i top team in quanto più efficace. Tenendo presente questi vincoli e cercando al tempo medesimo di utilizzare le ricerche del presente lavoro si può pensare ad una geometria leggermente differente, in cui il corpo sia traslato in avanti il più possibile rispetto alle ruote a parità di superficie bagnata. Infatti, per i Reynolds di interesse, gli studi effettuati su corpi assialsimmetrici hanno dimostrato come il posizionamento del punto di massimo spessore attorno al 70% della lunghezza consenta di avere una estesa zona laminare, con i conseguenti benefici in termini di resistenza. Per cercare di ottenere questo obiettivo, tenendo in considerazione la presenza delle ruote anteriori, la soluzione più immediata sembra quindi il traslare in avanti il corpo vettura, ottenendo così uno spostamento all'indietro del massimo spessore sulle pance laterali e una minor inclinazione della curva di transizione. Le carenature delle ruote anteriori possono poi fornire ulteriori spunti di riflessione: si potrebbe infatti pensare non solo di mutarne la geometria, ma anche di inclinare leggermente le ruote verso l'interno al fine di ottenere una minore larghezza della vettura in corrispondenza di esse, andando a ricercare il migliore compromesso tra resistenza aerodinamica e resistenza al rotolamento data dall'angolo di camber. Infine sarebbe opportuno studiare l'altezza della vettura da terra in modo da limitare il più possibile la dimensione delle carenature stesse.

L'utilità del presente lavoro dunque non solo può trovare un riscontro immediato sulla vettura attuale, ma si inserisce anche in un contesto più ampio, volto alla realizzazione di un nuovo prototipo studiato secondo quelli che sono i criteri esposti di diminuzione di resistenza, grazie all'estensione delle zone di laminarità sulla superficie del corpo.

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Vettura Paccar, concorrente di Artemide	13
Figura 2 - Prototipo "Why not", foto	14
Figura 3 – Artemide	17
Figura 4 - Andamento dell'autonomia in funzione del coefficiente c_x	21
Figura 5 - Curva di resistenza al variare del Reynolds, Gertler 4154	22
Figura 6 - confronto tra curve di resistenza sperimentali, Gertler e Carmichael	23
Figura 7 - Stima del punto di transizione	23
Figura 8 - Curve di resistenza con e senza strisce di transizione	24
Figura 9 - Resistenza misurata e calcolata in funzione del Reynolds	25
Figura 10 - Curve di resistenza per i corpi ottimizzati	26
Figura 11 - Confronto tra C_x al variare del numero di Reynolds	28
Figura 12 - Confronto tra C_x al variare del numero di Reynolds	28
Figura 13 - Visualizzazioni, prima sonda e bloccaggio.....	30
Figura 14 - Visualizzazioni, sonda senza bloccaggio.....	31
Figura 15 - Sonda utilizzata	31
Figura 16 - Attrezzatura per la realizzazione della sonda a filo caldo	32
Figura 17 - Sonda, filo e saldatrice al microscopio.....	33
Figura 18 - Sezione del piano utilizzato	35
Figura 19 - C_p sul piano ad incidenza nulla.....	36
Figura 20 - C_f lungo il piano ad incidenza nulla	36
Figura 21 - Andamento dello spessore di strato limite sul naso.....	37
Figura 22 - Bolla di transizione al bordo di attacco	38
Figura 23 - Piano a -7°	38
Figura 24 - Andamento del c_f e degli spessori di strato limite	39
Figura 25 - velocità sul corpo a potenziale	40
Figura 26 - Risultato di uno studio di transizione con diverse rugosità superficiali	42
Figura 27 - Immagine cad della camera con piano e attacchi	43

Figura 28 - Configurazione di prova al vero	44
Figura 29 - Disposizione strumentazione	45
Figura 30 - Dati sonda e dati finestrati	46
Figura 31 - Spettro non mediato	47
Figura 32 - Segnale di un intervallo filtrato	47
Figura 33 - Spettro mediato	48
Figura 34 - Spettri in posizioni differenti lungo la corda	49
Figura 35 - Spettri in prossimità della transizione	49
Figura 36 - Andamento della deviazione standard lungo il piano	50
Figura 37 - Velocità media del segnale lungo la corda	51
Figura 38 - Segnale originario e filtrato	52
Figura 39 - Segnale elaborato, zoom	53
Figura 40 – Segnale della sonda a filo caldo, intermittenza a 190 mm.....	54
Figura 41 - Segnale della sonda a filo caldo, intermittenza a 198 mm	54
Figura 42 – Segnale della sonda a filo caldo, intermittenza a 208 mm.....	55
Figura 43 - Intermittenza percentuale	56
Figura 44 - Andamento del c_f lungo il piano	57
Figura 45 - Comportamento del flusso in relazione all'altezza dal suolo	60
Figura 46 - Tecniche di simulazione per prove automobilistiche	61
Figura 47 - Galleria a vento, Politecnico di Milano	64
Figura 48 - Piano con supporto girevole.....	65
Figura 49 - Supporto della vettura	65
Figura 50 - Vettura con sonde a filo caldo	69
Figura 51 - Disposizione dei cavi	70
Figura 52 - Punti di posizionamento delle sonde	70
Figura 54 - Segnali delle sonde a filo caldo, $V=8.3$ m/s, $Y=0$ mm	71
Figura 54 – Deviazione standard, mezzeria	72
Figura 55 – Deviazione standard, $Y = 120$ mm.....	73
Figura 56 – Deviazione standard, $Y = 450$ mm.....	73
Figura 57 - Vista laterale del veicolo	74

Figura 58 - Vista dall'alto del veicolo.....	75
Figura 59 - curve di transizione	75
Figura 60 - Vettura con striscia sulla parte anteriore.....	77
Figura 61 - Sonda sulla carenatura della ruota anteriore.....	79
Figura 62 - Segnale sulla carenatura della ruota, H=140 mm, V=8.3 m/s	80
Figura 63 - Visualizzazione con fili di lana a 6m/s	81
Figura 64 - Striscia sulla carenatura delle ruote anteriori	82
Figura 65 - Segnale sulla car. della ruota con striscia, H=140 mm, V=8.3 m/s	82
Figura 66 - Veicolo con alettone	84
Figura 67 - Modello CAD della macchina.....	90
Figura 68 - Vettura e camera di prova.....	91
Figura 69 - Mesh realizzata sul piano di simmetria della vettura	94
Figura 70 - Valori di unità di parete sulla superficie della vettura	94
Figura 71 - Campo di velocità sul piano di simmetria della vettura	95
Figura 72 - Andamento del Cx al variare delle zone di laminarità	96
Figura 73 - Nuova suddivisione dei volumi	97
Figura 74 - Campo di velocità su un piano x-y a una quota di 0.14 m	98
Figura 75 - Campo di velocità, dettaglio della carenatura posteriore	99
Figura 76 - Campo di pressione, dettaglio carenatura posteriore	99

BIBLIOGRAFIA

- [1] Baron, *“Alcune note sul corso di fluidodinamica”*, Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, 1998
- [2] J. B. Barlow, W. H. Rae, A. Pope, *“Low-speed wind tunnel testing”*, Wiley & Sons, 1999
- [3] M. Bianchi, L. Marchesini, *“Progettazione e realizzazione di un veicolo per la competizione Shell Eco-Marathon”*, Tesi conseguita presso il Politecnico di Milano nell’a.a. 2004-2005
- [4] E. Mercker, J. Wiedemann *“Comparison of different ground simulation techniques for use in automotive wind tunnels”*, SAE Paper No. 900321, Feb. 1990.
- [5] J. Berndtsson, J. E. Ackert, E. Mercker, *“The effect of Groundplane Boundary Layer control on Automotive Testing in a wind Tunnel”*, SAE Paper No. 880248, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., 1988
- [6] J. E. Hackett, J. B. Baker, J. E. Williams, S. B. Wallis, *“On the influence of ground movement and wheel rotation in tests on modern car shapes”*, SAE Paper No. 870245, Feb. 1995.
- [7] S. Watkins, J.W. Saunders, *“Turbulence experienced by road vehicles under normal driving conditions”*, SAE Paper No. 950997, Feb. 1995
- [8] Schulz-Hausmann, Vagt, *“Influence of Test-Section Length and Collector Area on Measurements in $\frac{3}{4}$ -open-jet Automotive wind Tunnels”*, SAE Paper no. 880251, society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., 1988
- [9] G. Lomas, *“Fundamentals of hot wire anemometry”*, Cambridge University Press, 1986.
- [10] Mark Drela, *“Xfoil 6.9”*, 2001
- [11] H. Bruun, *“Hot wire anemometry”*, Oxford University Press,. New York. , 1995
- [12] S. B. Pope, *“Turbulent flows”*, Cambridge University Press, 2000.

- [13] J. G. Hoyt, R. J. Hansenn, *“Laminar to turbulent transition on a body of revolution with an extended favorable pressure gradient forebody”*, Technical report, Journal of Fluids Engineering, 1984
- [14] M. Gertler, *“Resistance experiments on a systematic series of streamlined bodies of revolution – For application to the design of high speed submarines”*, Navy dpt, 1950
- [15] B. H. Carmichael, *“Underwater drag reduction through optimum shape”*, AIAA, New York, 1966
- [16] T. Lutz, S. Wagner, *“Drag reduction and shape optimization of airship bodies”*, Journal of aircraft, Vol. 35 No. 3, 1998
- [17] F. Bettinelli, *“Ottimizzazione aerodinamica di corpi assialsimmetrici”*, Politecnico di Milano, 2008