

Scuola di ingegneria e architettura, sede di Forlì
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale · Classe L-9

Il ruolo dell'aerodinamica sulle prestazioni di vetture Solar Challenge

Elaborato finale in Aerodinamica degli Aeromobili

Relatore:
Prof. Alessandro Talamelli

Studentessa:
Caterina Solombrino

Anno Accademico 2015/2016 · III sessione

Ai miei genitori

Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutti coloro che mi hanno permesso di raggiungere questo importante traguardo.

Ringrazio anzitutto il relatore Alessandro Talamelli per avermi aiutata, con critiche ed osservazioni, nella stesura della tesi e per avermi affidato un progetto che mi ha permesso di conoscere il mondo estremamente interessante della vetture solar challenge. Un ringraziamento particolare va ai membri del team Onda Solare, in particolare a Stefano Maglio, per la loro disponibilità e per avermi permesso di condividere la loro esperienza col mondo delle auto solari. Infine, vorrei ringraziare i miei genitori, a cui questo lavoro è dedicato, per avermi dato la possibilità di intraprendere questo percorso di studi e per avermi supportato e sopportato nel corso di questi tre anni e, in particolare, nell'ultimo periodo.

Sommario

Le prestazioni di una vettura solar challenge sono influenzate dalla sua efficienza energetica. Circa il 70% dell'energia disponibile è utilizzata per vincere la resistenza all'avanzamento, il cui maggior contributo è fornito dalla resistenza aerodinamica. Quindi, per ottimizzare le prestazioni di un'auto da corsa alimentata ad energia solare, è estremamente importante ridurre la resistenza aerodinamica. In questo elaborato verranno presentati gli aspetti aerodinamici che maggiormente incorrono nel progetto di un'auto da corsa a propulsione solare che concorrerà alla *Worlds Solar Challenge*, con particolare riferimento a Emilia III e alle auto solari "vincenti" delle edizioni del 2011 e 2013.

Abstract

The performance of a solar challenge car is strongly influenced by its energy efficiency. About 70% of the available energy is spent to overcome running resistance, mainly given by aerodynamic drag. Therefore, to be able to optimize performance, drag must be reduced. The present work gives an overview of the main aerodynamic factors at the design basis of a solar race car competing in the World Solar Challenge, with particular attention to the Emilia III model and the winning designs of the 2011 and 2013.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	The World Solar Challenge	1
1.2	Onda Solare	2
1.3	Prefazione	2
2	Aerodinamica: Concetti base	5
2.1	Principio di reciprocità	5
2.2	Fluidi e loro proprietà	5
2.3	Numero di Reynolds	8
2.4	Strato limite	9
2.5	Teorema di Bernoulli	9
2.6	Coefficiente di pressione	10
2.7	Andamento Velocità e Pressioni	11
2.8	Forze aerodinamiche agenti sul corpo	13
3	Aerodinamica & auto solari	15
3.1	Tipi di resistenza agenti sull'auto	15
3.1.1	Resistenza aerodinamica	15
3.1.2	Ventilazione	17
3.1.3	Resistenza al rotolamento	17
3.2	Potenza necessaria a vincere la resistenza aerodinamica	18
3.3	Coefficiente di resistenza e Drag Area	18
3.4	L'impatto dell'aerodinamica	20
3.4.1	Premessa	20
3.4.2	Corpo principale della vettura	22
3.4.3	Effetto suolo e altezza ottimale da terra	33
3.4.4	Cupolino	36
3.4.5	Carenature delle ruote	42
3.4.6	Configurazione del telaio: tre ruote vs quattro ruote	47
3.5	Accoppiamento ottimale	48
3.5.1	Accoppiamento del cupolino	49

3.5.2	Geometria e accoppiamento del cupolino non ottimale: un esempio di studio	52
3.5.3	Variazione del C_D e C_L con la posizione del cupolino: un esempio di studio	55
3.5.4	Accoppiamento delle carene	55
3.5.5	Accoppiamento relativo delle parti: un esempio di studio	57
3.5.6	Ulteriori accorgimenti per la riduzione della resistenza di interferenza	58
3.6	Momenti aerodinamici	59
3.6.1	Momento di imbardata	59
3.6.2	Momento di rollio	60
3.6.3	Momento di Beccheggio	61
3.6.4	Un esempio di studio: Stabilità della IK3 in presenza di venti laterali	62
3.7	L'effetto della presenza dei venti trasversali	64
4	Emilia III: le basi di un progetto efficiente	69
4.1	Introduzione	69
4.2	Il raggiungimento dell'efficienza	71
4.2.1	Scheda tecnica	71
4.2.2	Ottimizzazione energetica	72
4.2.3	Ottimizzazione aerodinamica	74
4.2.4	Riduzione resistenza al Rotolamento	83
4.2.5	Stabilità della vettura	84
4.2.6	Vettura completa	85
5	Conclusioni	89
	Bibliografia	91

Elenco delle figure

1.1	<i>Percorso della World Solar Challenge</i> ^[5]	1
2.1	<i>Viscosità in funzione della temperatura per liquidi e gas.</i> ^[22]	7
2.2	<i>Effetto della viscosità in un fluido.</i> ^[4]	7
2.3	<i>Velocità e Pressioni attorno al corpo: in virtù del teorema di Bernoulli vediamo che, laddove vi è una accelerazione del flusso, si ha una diminuzione della pressione e, viceversa, laddove vi è un decelerazione si ha un aumento di pressione.</i> ^[4]	11
2.4	<i>Diagrammi di velocità all'interno dello strato limite.</i> ^[23]	12
2.5	<i>Componenti della forza aerodinamica</i> ^[3]	13
3.1	<i>Andamento del coefficiente di resistenza lungo l'auto per flusso laminare e turbolento</i> ^[1]	19
3.2	<i>Valori del coefficiente di resistenza per un corpo tridimensionale, calcolati per numeri di Reynolds tra 10^4 e 10^6.</i> ^[4]	23
3.3	<i>Variazione del coefficiente di resistenza con il rapporto $\frac{l}{d}$.</i> ^[4]	24
3.4	<i>Torpedo with a flat tail. D è il diametro massimo del torpedo, L la lunghezza e x_t è la posizione del punto di transizione a partire dal bordo d'attacco.</i> ^[2]	25
3.5	<i>Penalizzazione in termini di resistenza percentuale a seguito del troncamento del profilo in funzione dello spessore del bordo d'uscita.</i> ^[2]	26
3.6	<i>Bordo d'uscita Nuna 6, seconda classificata WSC 2011</i> ^[6]	27
3.7	<i>soluzioni alternative al profilo troncato:</i> <i>a. Vista dall'alto:profilo dal muso arrotondato</i> <i>b. Vista frontale rettangolo con bordi curvi</i> ^[1]	27
3.8	<i>Vista in pianta '11 Tokai Challenger</i> ^[9]	28
3.9	<i>Vista in pianta Nuna 6</i> ^[6]	28
3.10	<i>Due profili NACA a confronto: NACA 0010 un generico profilo simmetrico e NACA 66-010 progettato per avere un'estensione del flusso laminare.</i> ^[2] .	30
3.11	<i>Fenomeno di cross-flow su un auto solare dal muso eccessivamente curvo.</i> ^[2]	31

3.12	<i>Velocità critica di transizione del flusso indisturbato a causa del cross-flow in funzione del nose-sweep angle. Il grafico si riferisce a un corpo il cui muso dalla vista laterale ha un raggio di 10 cm.</i> ^[2]	32
3.13	<i>Superficie bagnata di corpi aerodinamici di diversa lunghezza in funzione dell'area trasversale massima della sezione ellittica.</i> ^[2]	32
3.14	<i>Drag area in funzione dell'area frontale per corpi di diversa lunghezza (L) e con diverso punto di transizione (x_t).</i> ^[2]	33
3.15	a. <i>Linee di flusso attorno a un torpedo in un flusso libero.</i> b. <i>Linee di flusso attorno a un torpedo in prossimità del suolo.</i> ^[4]	34
3.16	<i>Andamento del coefficiente di resistenza in funzione della distanza dal suolo h relativa alla lunghezza l del corpo e effetto della curvatura del profilo.</i> ^[2]	35
3.17	<i>Altezza minima dal suolo raccomandata. L è la lunghezza del corpo, t il suo spessore e b la sua larghezza.</i> ^[2]	36
3.18	<i>Illustrazione della norma 2.17 del regolamento della WSC 2013.</i> ^[7]	38
3.19	<i>MIT Manta GT 1997.</i> ^[10]	39
3.20	<i>Andamento del coefficiente di resistenza, basato sulla superficie frontale, in funzione del rapporto L/h.</i> ^[2]	40
3.21	<i>Andamento del coefficiente di resistenza, basato sulla superficie frontale, in funzione del rapporto L/h.</i> ^[2]	41
3.22	<i>Vista dall'alto della vettura '13 Tokai Challenger che evidenzia la vista in pianta a forma di profilo alare del cupolino.</i> ^[9]	42
3.23	<i>Taco fairings.</i> ^[1]	43
3.24	<i>Carena con vista in pianta ellittica e tabella con relativa drag area a confronto con quella per carena con vista in pianta a forma di profilo alare.</i> ^[1]	44
3.25	<i>Illustrazione delle geometrie ideali per carene parziali e complete.</i> ^[2]	45
3.26	<i>Inclinazione del bordo inferiore della carena al fine di ridurre la resistenza di ventilazione.</i> ^[1]	45
3.27	<i>Carene Nuna 6. Si noti come esse si conformino alla forma ideale per carene totali illustrate in figura 3.25</i> ^[6]	46
3.28	<i>Diverse configurazioni del telaio per tre e quattro ruote.</i> ^[2]	47
3.29	<i>Drag area della configurazione a tre ruote a confronto con la sua controparte a quattro ruote.</i> ^[2]	48
3.30	<i>Andamento del coefficiente di pressione lungo il corpo dell'auto.</i> ^[2]	49
3.31	<i>Honda Dream 1996. L'allineamento del bordo d'attacco del cupolino con il corpo principale elimina le giunzioni anteriori e, quindi, la separazione del flusso.</i> ^[11]	50
3.32	<i>Sunswift IV, sesta classificata alla WSC 2011.</i> ^[12]	50
3.33	<i>Nuna 7, vincitrice WSC 2013.</i> ^[6]	51

3.34	<i>'13Tokai Challenger, seconda classificata alla WSC 2013.</i> ^[13]	51
3.35	<i>Distribuzione di pressione lungo un cupolino dalla forma non ideale. Le pressioni riportate sono pressioni relative.</i> ^[14]	53
3.36	<i>In alto: parametri per lo studio della posizione del cupolino. In basso: Coefficienti di resistenza e portanza e efficienza per una data configurazione del cupolino.</i> ^[15]	55
3.37	<i>Fillet di raggio R_j lungo i bordi laterali dell'appendice.</i> ^[2]	56
3.38	<i>Parametri che intervengono nel posizionamento ottimale delle carene.</i> ^[15]	57
3.39	<i>Coefficiente di portanza e resistenza in funzione della posizione delle carene ad una velocità di 35 m/s.</i> ^[15]	58
3.40	<i>Esempio di auto con specchietti retrovisori del team Solaris della Dokuz Eylül University, tra le ultime in classifica alla WSC 2013.</i> ^[16]	59
3.41	<i>Illustrazione dell'effetto della posizione del centro di pressione rispetto al centro di gravità.</i> ^[2]	60
3.42	<i>L'influenza dell'altezza del centro di pressione sulla stabilità attorno all'asse di rollio</i> ^[2]	61
3.43	<i>Forze in N e momenti in Nm sulla IK3 in presenza di venti laterali:(a) da ovest a est (b) da est a ovest.</i> ^[17]	62
3.44	<i>Direzione e valore del vento alla World Solar Challenge in Australia a: (a) Darwin, (b) Alice Springs, (c) Adelaide.</i> ^[17]	63
3.45	<i>Illustrazione della generazione di portanza in caso di vento trasversale e di come le carene delle ruote enfatizzano l'effetto</i> ^[2]	64
3.46	<i>"Rounded aftbody" e "spined aftbody" a confronto</i> ^[2]	65
3.47	<i>Vista in pianta di una "vela" a forma di profilo alare verticale in grado di sviluppare una forza di spinta T.</i> ^[2]	66
3.48	<i>Manta La, auto progettata per sfruttare i venti trasversali.</i> ^[18]	67
3.49	<i>La Santa Cruz Pumpkin Seed ha con corpo principale aerodinamico con "vele" removibili e orientabili.</i> ^[19]	67
4.1	<i>Emilia I.</i> ^[5]	69
4.2	<i>Emilia II.</i> ^[5]	70
4.3	<i>Emilia III.</i> ^[20]	70
4.4	<i>Nuna 7, vincitrice WSC 2013.</i> ^[6]	74
4.5	<i>'13 Tokai challenger, seconda classificata WSC 2013.</i> ^[9]	75
4.6	<i>Superficie del ventre di Emilia III.</i>	76
4.7	<i>Dettaglio Emilia III: Adesivi aeronautici utilizzati per la decorazione.</i>	77
4.8	<i>Dettaglio Emilia II: rivestimento celle non perfettamente inglobato nella superficie del corpo principale.</i>	77
4.9	<i>Vista frontale cupolini Emilia III, a sinistra, Nuna 7, a destra.</i>	78

4.10	<i>Posizionamento del cupolino di Emilia III per rispettare i vincoli di visibilità: visibilità garantita anche nel caso di pilota inclinato di -25° ^[20]</i>	78
4.11	<i>In alto: cupolino Emilia II. In basso: cupolino Emilia III, progetto vs realtà</i>	79
4.12	<i>Carene e Vasca Emilia III.</i> ^[20]	80
4.13	<i>Variazione dell'andamento del coefficiente di pressione nei tre casi: a. configurazione originale, b. carene anteriori modificate, c. con ruote.</i> ^[21]	81
4.14	<i>Luci anteriori a confronto: Emilia III, Nuna 7, '13 Tokai Challenger</i>	82
4.15	<i>Luci posteriori a confronto: Emilia III, Nuna 7, '13 Tokai Challenger</i>	82
4.16	<i>Illustrazione di alcuni elementi in fibra di carbonio di Emilia III</i>	84
4.17	<i>Configurazione sospensione Anti-Rollio</i> ²⁰	84
4.18	<i>Configurazione sospensione Anti-Beccheggio</i>	85
4.19	<i>Linee di flusso lungo la superficie del corpo con transizione libera</i> ^[20]	86
4.20	<i>Coefficiente di resistenza e portanza in condizioni di incidenza e vento laterale.</i> ^[21]	86

Capitolo 1

Introduzione

1.1 The World Solar Challenge

La *World solar Challenge* è la competizione più famosa dedicata alle auto alimentate ad energia solare. Tenuta in Australia ogni due anni, vede la partecipazione di numerosi teams provenienti da tutto il mondo, molti dei quali costituiti principalmente da studenti. I concorrenti partono da Darwin con l'obiettivo di arrivare per primi ad Adelaide, circa 3000 chilometri più a Sud. Il percorso è mostrato in figura 1.1. La competizione è nata nel 1987 per opera dell'avventuriero danese Hans Tholstrup con lo scopo di promuovere il trasporto sostenibile.



Figura 1.1: *Percorso della World Solar Challenge* ^[5]

L'evento prevede, dal 2013, tre classi:

-*Challenger Class*: questa categoria è pensata anzitutto per l'efficienza più che per il comfort o la praticità. Essa richiede un solo pilota e consiste in un'unica grande tappa in cui, dopo la partenza col pacco batterie carico, le batterie possono essere ricaricate esclusivamente dai pannelli solari montati sull'auto. Una volta partiti da Darwin, è consentito

guidare dalle 8:00 alle 17:00. Nei check-point le uniche operazioni di manutenzione permessi sono il controllo della pressione degli pneumatici e la pulizia del veicolo. Il vincitore è chi arriva per primo ad Adelaide.

-*Cruiser Class*: questa categoria è stata istituita per sviluppare un'auto solare all'insegna della praticità e del trasporto sostenibile. Essa deve infatti poter trasportare un pilota e un passeggero. Nei check-point è consentita la ricarica notturna delle batterie. Saranno giudicati l'energia esterna utilizzata, il tempo impiegato a completare la gara, la praticità e il carico trasportato.

-*Adventure Class*: questa categoria permette di far gareggiare anche a coloro che hanno partecipato alle edizioni passate ma che non hanno avuto i mezzi per costruire una vettura conforme al nuovo regolamento.

In questa trattazione ci soffermeremo esclusivamente sulla categoria Challenger, definita come "*aerodynamic master pieces*"^[7] e sugli anni in cui il team Onda solare vi ha partecipato, 2011 e 2013.

Nel 2011, il team giapponese *Tokai University solar team* con la loro *Tokai Challenger*, conquista la sua seconda vittoria con una velocità media di circa 91 km/h, seguita, a solo un'ora di distanza, da Nuna 6 del team olandese *Nuon solar team* dell'Università di Delft. Nel 2013, invece, il team olandese conquista la sua quinta vittoria, seguita, a pochi minuti di distanza, dal team giapponese.

1.2 Onda Solare

Onda solare è l'unico team italiano che partecipa alla World solar Challenge. Esso è costituito da tecnici, ingegneri, docenti, studenti e ricercatori dell'Università di Bologna e dell'Istituto di Istruzione Superiore Ferrari di Maranello. Molti di essi, spinti dall'entusiasmo e dalla passione, lavorano ai progetti come volontari dopo il normale orario di lavoro. Sono inoltre sostenuti da ditte grandi e piccole che offrono loro materiali e componenti tecnologici. Nonostante la mancanza di finanziamenti consistenti, questo team è riuscito nella progettazione di due auto solari, l'ultima delle quali, Emilia III, ha conquistato il decimo posto alla World Solar Challenge del 2013.

1.3 Prefazione

L'energia a disposizione di una vettura solar challenge è estremamente modesta dal momento che essa, per la categoria *challenger*, è fornita esclusivamente dalle celle solari, la cui produzione di energia è limitata dalla loro efficienza e dal regolamento per via

dei vincoli sulla superficie pannellabile.

Circa il 70% di questa energia, viene speso per vincere la resistenza all'avanzamento la quale, per una vettura solar challenge, è principalmente costituita dalla resistenza al rotolamento dalla resistenza aerodinamica. Quest'ultima, viste le velocità sostenute da questi veicoli, costituisce il maggior contributo alla resistenza all'avanzamento. La velocità sostenibile in una competizione è, certamente, un fattore importante. Il bilancio tra l'energia prodotta dalle celle solari e l'energia spesa per vincere la resistenza all'avanzamento determina la velocità di crociera della vettura. Pertanto, le prestazioni di un'auto da corsa a propulsione solare sono determinate dalla sua efficienza energetica. Ora, dal momento che l'energia a disposizione è limitata e, dal momento che la resistenza all'avanzamento è costituita per il 75% dalla resistenza aerodinamica, ecco che l'aerodinamica, nel progetto di una vettura da corsa a propulsione solare, riveste un ruolo estremamente importante. In questa trattazione, verranno introdotte le considerazioni aerodinamiche che intervengono nel progetto di una vettura che concorre alla competizione australiana, soffermandoci sulle edizioni in cui il team italiano vi ha preso parte, ovvero del 2011 e del 2013. Si illustreranno, quindi, le geometrie che da letteratura permettono di ridurre la resistenza aerodinamica sul veicolo per ogni suo componente, tenendo conto dei vincoli imposti dal regolamento della WSC e confrontandole con le soluzioni adottate dai team "vincenti" delle suddette edizioni. Le norme che, nel corso della loro evoluzione, sono divenute più restrittive per motivi di sicurezza, ma anche per incentivare i progettisti a ottenere l'efficienza con meno energia a disposizione, sono però penalizzanti per l'aerodinamica. Ma, sebbene il maggior consumo di energia è da imputare alla resistenza aerodinamica, nel progettare un veicolo in cui si cerca di ridurla al minimo, non si deve dimenticare che l'auto, oltre che efficiente, debba essere affidabile e stabile. Pertanto, anche questo aspetto, verrà trattato e studiato.

Infine, verranno presentate le soluzioni adottate dal team Onda solare per Emilia III per l'implementazione di un progetto efficiente, esaminando se queste si conciliano con quelle suggerite da letteratura e paragonandole a quelle adottate dai team Nuon e Tokai.

La possibilità di vedere dal vicino le vetture Emilia II ed Emilia III e l'incontro con alcune dei membri del team, ha permesso di scorgere utili particolari presentati in questa trattazione e di constatare quanto studiato in letteratura.

Capitolo 2

Aerodinamica: Concetti base

Prima di intraprendere una discussione sull'aerodinamica delle auto da corsa solari verranno , in questo capitolo, esposti alcuni dei concetti base di tale disciplina .

2.1 Principio di reciprocità

Le azioni aerodinamiche generate su un corpo in movimento immerso in un fluido in quiete sono le medesime di quelle generate su un corpo fermo, immerso in un fluido in moto con la stessa velocità relativa. In virtù del principio di reciprocità, nel corso della trattazione, si parlerà talvolta di velocità del fluido e talvolta di velocità del corpo , a seconda di cosa è più pratico ai fini della spiegazione.

2.2 Fluidi e loro proprietà

L'aerodinamica è un ramo della fluidodinamica che studia l'interazione tra un fluido e un corpo immerso in esso. Un fluido è una sostanza che, se sottoposta ad un'azione tangenziale esterna, si deforma e la tensione interna è proporzionale alla velocità di deformazione. Nello studio dell'aerodinamica del veicolo il fluido in questione è l'aria. Per trattarla la consideriamo come se fosse un continuo, ovvero assumendo che una qualsiasi parte di esso contenga un numero elevato di molecole.

Vediamo alcune delle proprietà e grandezze principali di cui faremo uso nel corso della trattazione.

Pressione

La Pressione è definita come il rapporto tra la forza agente su una superficie in direzione perpendicolare ad essa e la superficie stessa. L'unità di misura della pressione, nel Sistema Internazionale è il Pascal , dove $1Pa = \frac{1N}{1m^2}$.

Densità

La Densità è la caratteristica del fluido che misura la massa per unità di volume. Essa, nel Sistema Internazionale si misura in kg/m^3 .

Comprimibilità

La comprimibilità è la capacità di un fluido di modificare il suo volume (e quindi la sua densità) quando viene sottoposto a una pressione esterna. Un fluido si definisce incomprimibile quando la sua densità è costante. Nel caso di moto isoentropico vale la seguente relazione:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\gamma}{2}M^2 \quad (2.1)$$

Dove:

- γ è il rapporto tra calore specifico a pressione costante e calore specifico a volume costante. ($\gamma = \frac{C_P}{C_V}$). Nel caso dell'aria il suo valore è circa 1.4.
- M è il numero di Mach, definito come il rapporto tra la velocità V di un corpo in moto in un fluido e la velocità del suono a nel fluido stesso ($M = \frac{V}{a}$).

Dalla relazione si può vedere che per numeri di Mach bassi, in particolare per $M < 0.3$, si può trascurare la variazione percentuale di densità e, quindi, considerare $\rho = cost$, ovvero l'aria come fluido incomprimibile.

Viscosità

Indicata col simbolo μ , essa indica la resistenza incontrata tra strati di fluido adiacenti nello scorrere l'uno rispetto all'altro. Ciò è connesso allo scambio di quantità di moto tra strati di fluido dovuto all'agitazione termica. A livello molecolare, quindi, la viscosità può essere vista come una misura della diffusione di quantità di moto. Dal grafico in figura 2.1 si può vedere come essa dipenda dalla temperatura.

Nei gas la viscosità aumenta con la temperatura, in quanto aumenta lo scambio di quantità di moto dovuto all'aumento dell'agitazione termica. Nei liquidi invece accade l'opposto. L'unità di misura della viscosità è $Nsec/m^2$. Spesso si fa uso della viscosità cinematica definita come $\nu = \mu/\rho$ e misurata in m^2/s . L'effetto della viscosità in un fluido può essere dimostrato in figura 2.2, in cui un fluido viscoso scorre sopra una superficie solida.

Dalla figura 2.2 si osserva un importante fenomeno denominato "no slip condition", ovvero la condizione di aderenza, causa dello sviluppo di un gradiente di velocità. Le particelle di fluido adiacenti alla superficie solida hanno velocità tangenziale nulla in quanto

aderiscono ad essa. Allontanandoci dalla parete solida, la velocità aumenta fino ad eguagliare la velocità del flusso indisturbato. In altre parole, gli strati del fluido più veloce vengono rallentati a causa degli sforzi tangenziali dagli strati più lenti, mentre questi ultimi vengono trascinati a velocità maggiori. La regione fluida adiacente alla parete in cui gli effetti viscosi sono significativi è chiamata strato limite (*boundary layer*), di cui si tratterà in seguito.

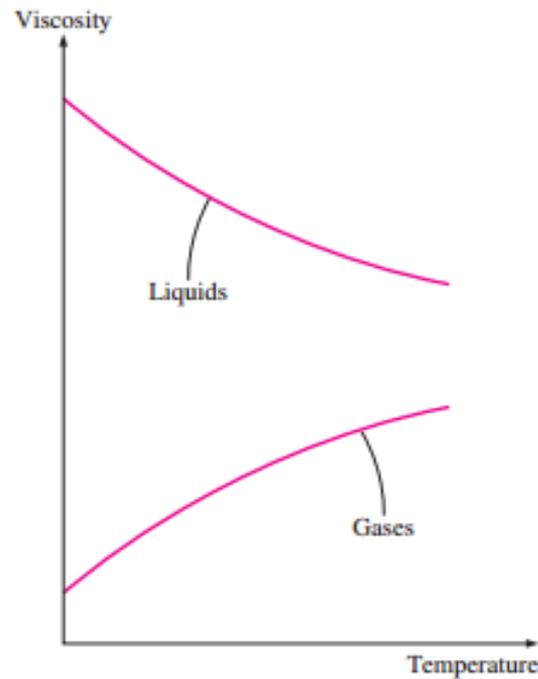


Figura 2.1: Viscosità in funzione della temperatura per liquidi e gas. [22]

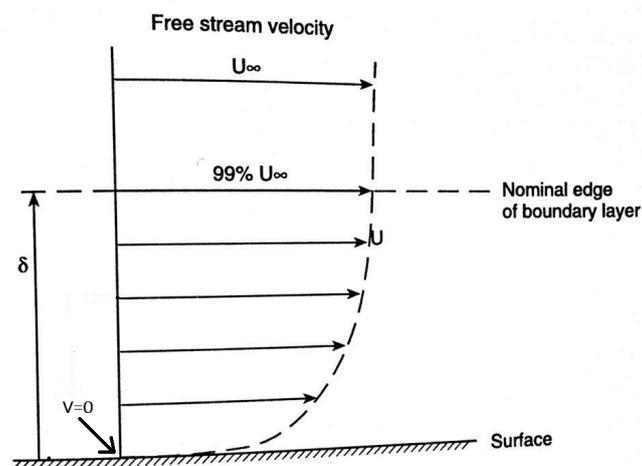


Figura 2.2: Effetto della viscosità in un fluido. [4]

Vorticità

A differenza dei solidi, un fluido reale, non può rimanere in equilibrio statico sotto l'azione di sforzi tangenziali e si genera, grazie alla viscosità e alla necessità di soddisfare la condizione di aderenza, un flusso rotazionale. La grandezza fisica che caratterizza la rotazione degli elementi fluidi è la vorticità. Il vettore vorticità ($\vec{\omega}$) è definito matematicamente come il rotore del vettore velocità:

$$\vec{\omega} = \text{rot}\vec{v} \quad (2.2)$$

La vorticità è poi collegata alla velocità di rotazione (Ω) di un elemento di fluido:

$$\Omega = \frac{1}{2}\omega \quad (2.3)$$

2.3 Numero di Reynolds

Molte sono le variabili che influenzano le caratteristiche del flusso attorno a un determinato corpo come ad esempio la distribuzione della pressione lungo il corpo nella direzione del flusso. Altri fattori importanti sono la velocità, la densità e la viscosità del fluido e, per una data forma geometrica, la dimensione del veicolo. La dipendenza da questi parametri può essere espressa tramite un'unica quantità, il numero di Reynolds (Re), un numero adimensionale definito come:

$$Re = \frac{VL\rho}{\mu} \quad (2.4)$$

Dove:

- ρ : densità del fluido [kg/m^3]
- μ : viscosità del fluido [kg/ms]
- V : velocità del fluido [m/s]
- L : lunghezza caratteristica del corpo [m]

Il numero di Reynolds misura il rapporto tra le forze d'inerzia e quelle viscosi per un dato flusso. Se esso è molto alto le forze d'inerzia sono prevalenti rispetto alle forze viscosi. In tal caso possono verificarsi due eventualità. La prima è che il flusso rimanga attaccato al corpo. Di conseguenza l'effetto dei termini viscosi è confinato a un sottile strato di fluido in prossimità del corpo e che quindi non sono più in grado di limitare le fluttuazioni casuali e rapide della velocità. La seconda è che il flusso distacchi dal corpo e quindi la regione di flusso influenzata dalla viscosità si estenda anche lontano dal corpo. In entrambi i casi, quando le forze d'inerzia prevalgono su quelle viscosi, si ha il passaggio da moto laminare, ossia un moto caratterizzato da linee di corrente tra loro parallele in cui i diversi

strati di fluido scorrono l'uno sull'altro senza mescolarsi, a turbolento, un moto caotico e irregolare. Reynolds osservò che il flusso rimaneva laminare se esso era caratterizzato da un numero di Reynolds inferiore a un certo valore detto Reynolds critico mentre, al di sopra di tale valore il moto assumeva un comportamento turbolento. Un altro importante aspetto del numero di Reynolds è la legge di similarità secondo cui correnti fluide intorno a oggetti geometricamente simili, ma con stesso numero di Reynolds, soddisfano la stessa equazione. Ciò permette di studiare il flusso attorno a un corpo e simularne l'andamento costruendo un modello in scala ridotta. Essa è pertanto un mezzo molto potente per esperimenti di fluidodinamica come, ad esempio, i test in galleria del vento.

2.4 Strato limite

Lo scorrimento di un fluido viscoso su un corpo, determina uno strato limite. Abbiamo visto come, a causa della viscosità del fluido e, quindi, della condizione di aderenza, la velocità tangenziale delle particelle di fluido adiacenti alla superficie del corpo sia nulla mentre, allontanandoci dalla parete, tale velocità aumenta sino ad eguagliare la velocità del flusso indisturbato. La regione di campo di moto immediatamente adiacente alla superficie di un corpo all'interno della quale si verifica questo rapido cambiamento della velocità tangenziale è chiamato strato limite. Per valori sufficientemente alti del numero di Reynolds, la presenza del corpo viene percepita solamente dal fluido che si trova all'interno dello strato limite sottile che si sviluppa nei pressi di esso. In altri termini, in quasi tutto il campo attorno al corpo, la velocità del fluido coincide con quella della corrente indisturbata. Per analizzare la struttura dello strato limite consideriamo il moto di una particella di fluido che entra in esso. Fintanto che essa è all'esterno dello strato limite mantiene la sua configurazione originaria, assunta ad esempio di forma rettangolare. Una volta all'interno dello strato limite, invece, essa viene gradualmente distorta dall'azione del gradiente di velocità, venendo quindi messa in rotazione dalle azioni viscosi. Le particelle all'esterno dello strato limite, invece, non hanno alcuna rotazione. Si ha quindi, all'esterno dello strato limite, un moto irrotazionale, ovvero privo di vorticità, mentre all'interno si ha un moto rotazionale. Si definisce spessore dello strato limite δ , la distanza dalla superficie del corpo in cui le particelle fluide si muovono con velocità paragonabile alla velocità del flusso indisturbato. Lo spessore dello strato limite cresce muovendoci lungo la lunghezza del corpo. Inoltre, tale spessore, aumenta man mano che si passa da moto laminare a turbolento.

2.5 Teorema di Bernoulli

Il teorema di Bernoulli mette in relazione la velocità del fluido e la pressione. Prima di enunciare tale teorema, verranno date qui di seguito alcune definizioni.

Linea di corrente: linea che punto per punto è tangente al vettore velocità della particella che occupa la linea stessa in quell'istante. Essa fornisce quindi istante per istante la direzione della velocità. Inoltre, quando il fluido è incomprimibile, è possibile desumere il modulo della velocità a livello qualitativo: se le linee di flusso tendono ad infittirsi, la velocità tende ad aumentare. Viceversa se le linee di flusso tendono a divergere, la velocità tende a diminuire.

Moto stazionario: moto in cui tutte le grandezze che lo caratterizzano sono indipendenti dal tempo.

Moto irrotazionale: il moto è detto irrotazionale se la vorticità è nulla.

Passiamo ora al teorema. Nell'ipotesi di moto stazionario, irrotazionale e fluido incomprimibile vale la seguente equazione:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} = cost \quad (2.5)$$

Dove:

- P : è la pressione statica locale
- ρ : è la densità del fluido
- V : è la velocità del flusso

Il teorema stabilisce che ad un aumento della pressione corrisponde una diminuzione della velocità e viceversa. Si ha quindi che, laddove la velocità è nulla la pressione avrà il suo massimo valore, nota come pressione di ristagno. Nel caso in cui il moto sia invece rotazionale e debolmente viscoso, si ha che il binomio è costante lungo una linea di corrente.

2.6 Coefficiente di pressione

La pressione, in tutti i punti del fluido, può essere espressa tramite un coefficiente adimensionale, il coefficiente di pressione (C_P), considerando la differenza tra la pressione nel punto (P) e la pressione in un punto sufficientemente lontano dal corpo (P_∞), dove la velocità è uguale alla velocità del flusso indisturbato (V_∞).

Esso è definito come:

$$C_P = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}V_\infty^2\rho} \quad (2.6)$$

Di seguito alcuni valori tipici del coefficiente di pressione:

-Nel punto di ristagno, dove la velocità è nulla, $C_P = 1$

-A una certa distanza dal veicolo, in cui $V = V_\infty$ e $P = P_\infty$, $C_P = 0$

-Se la velocità del flusso è maggiore della velocità del flusso indisturbato (V_∞), C_P diventa negativo.

2.7 Andamento Velocità e Pressioni

Analizziamo ora l'andamento delle velocità e, quindi, delle pressioni attorno ad un'auto. Il flusso ha inizialmente la velocità della corrente libera e decelera fino a fermarsi su un punto detto punto di ristagno. Da questo punto, il flusso segue la superficie del corpo e la sua velocità aumenta rispetto a quella della corrente indisturbata fino ad un massimo in corrispondenza del massimo spessore percentuale. Dopodiché il flusso decelera.

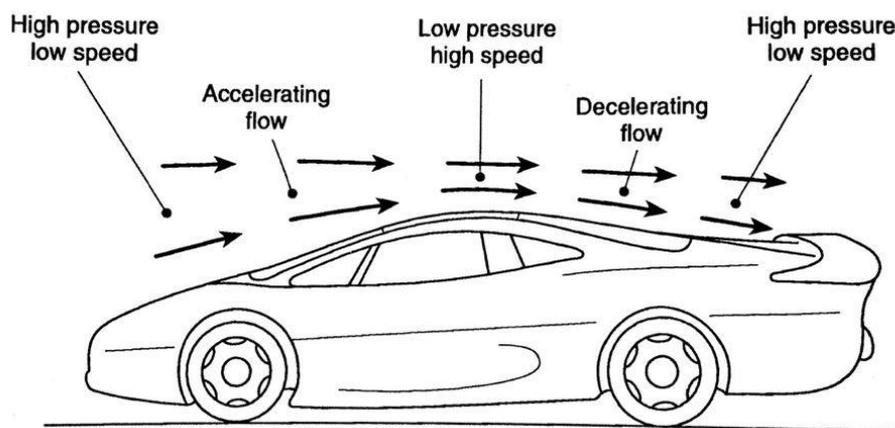


Figura 2.3: *Velocità e Pressioni attorno al corpo: in virtù del teorema di Bernoulli vediamo che, laddove vi è una accelerazione del flusso, si ha una diminuzione della pressione e, viceversa, laddove vi è un decelerazione si ha un aumento di pressione.*^[4]

Ciò significa che l'aria deve viaggiare da una zona a bassa pressione a una zona ad alta pressione e ciò può essere fatto decelerando e perdendo parte della sua energia cinetica. Ma, nello strato limite, il flusso viene frenato dalla viscosità dell'aria e quindi parte dell'energia disponibile verrà dissipata in attrito. Di conseguenza l'aria non potrà più tornare ad avere la pressione e la velocità iniziali di flusso indisturbato. L'analisi dei diagrammi di velocità in figura 2.4 evidenzia la progressiva perdita di energia delle particelle, causando un gradiente positivo di pressione che si oppone all'avanzamento del fluido. Se la zona caratterizzata da gradiente positivo di pressione si estende ancora, può accadere che le particelle non solo non riescano a proseguire ma addirittura invertano il moto.

Quindi, basandoci sulle distribuzioni di pressione e velocità possiamo identificare sul veicolo una zona in cui si ha un gradiente di pressione negativo e una zona in cui si ha gradiente di pressione positivo. Analizziamole nel dettaglio:

1. $\text{grad}P < 0$: questa condizione è chiamata "Gradiente di pressione favorevole". Le particelle accelerano, le linee di corrente si infittiscono e lo strato limite tende a

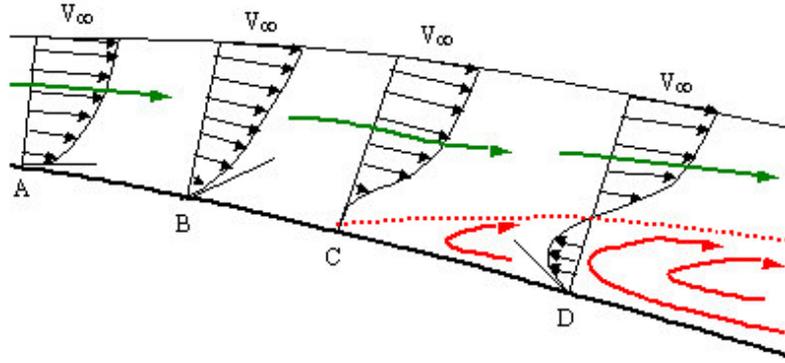


Figura 2.4: *Diagrammi di velocità all'interno dello strato limite.*^[23]

“schiacciarsi” sulla superficie. Le azioni tangenziali aumentano, in quanto aumenta $\frac{\partial(u)}{\partial(y)}$, la variazione della componente tangenziale della velocità in direzione perpendicolare alla direzione della deformazione (dalla formula $\tau = \mu \frac{\partial(u)}{\partial(y)}$ e avendo posto $V = (u, v, w)$). La pressione diminuisce fino a un minimo (zona di massimo spessore percentuale in cui la velocità ha valore massimo) per poi aumentare.

2. $\text{grad}P > 0$: condizione denominata “Gradiente di pressione sfavorevole”. Le particelle decelerano, le linee di corrente divergono. Le azioni tangenziali diminuiscono. Se la pressione aumenta ancora, accade che la velocità delle particelle diminuisce ulteriormente, in particolare, la particella a contatto con la superficie del corpo, si ferma (si veda il punto C in figura 2.4). La curvatura del profilo di velocità alla parete è direttamente collegata al gradiente di pressione. Qui la tangente al profilo delle velocità è verticale. Il profilo delle velocità a parete è concavo ma, poiché il profilo di velocità deve raccordarsi con quello all'esterno dello strato limite, si ha un punto di flesso. L'esistenza di tale flesso denuncia l'avvenuto distacco dello strato limite. Il punto di separazione, P_S , è così definito:

$$P_S \equiv \frac{\partial(u)}{\partial(y)}_{wall} \quad (2.7)$$

In questo punto $\tau = 0$. Se la pressione continua ad aumentare si ha un'inversione del flusso del fluido attorno al corpo (si veda il punto D in figura 2.4) con conseguente generazione di turbolenza e inspessimento dello strato limite.

2.8 Forze aerodinamiche agenti sul corpo

Quando un corpo è investito da un fluido, le azioni di pressione (normali alla superficie) e attrito (tangenti alla superficie) che le particelle fluide che scorrono sulla superficie del corpo applicano su esso, determinano una forza chiamata risultante aerodinamica. Convenzionalmente questa forza viene scomposta in tre componenti secondo tre assi (assi vento): portanza, resistenza e devianza.

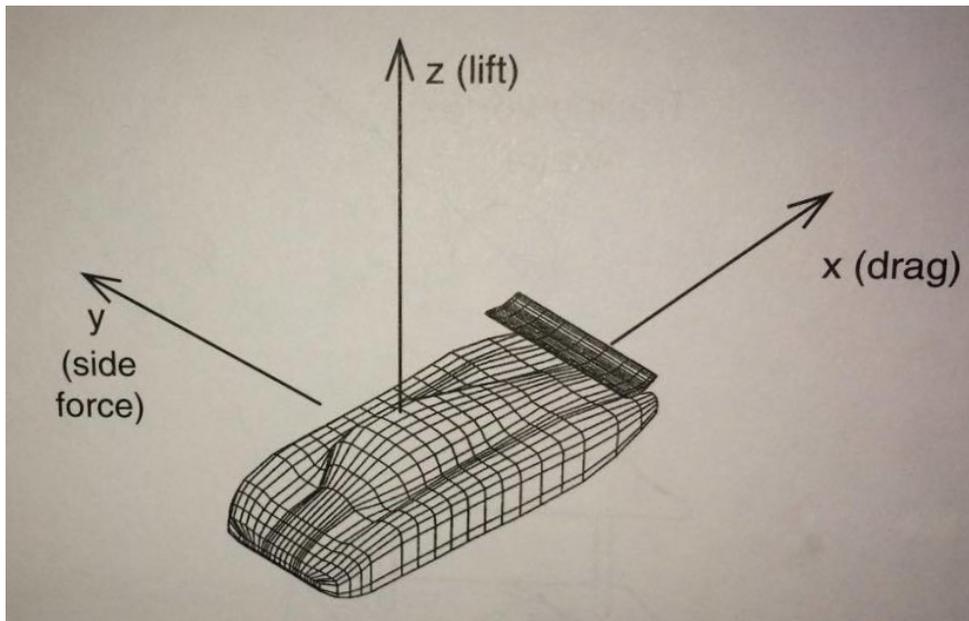


Figura 2.5: Componenti della forza aerodinamica ^[3]

La portanza è definita come la componente della forza aerodinamica in direzione perpendicolare alla velocità del flusso.

$$L = \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 S C_L \quad (2.8)$$

La resistenza è definita come la componente della forza aerodinamica in direzione parallela alla velocità del flusso (in particolare stessa direzione, verso opposto).

$$D = \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 S C_D \quad (2.9)$$

Dove :

- ρ : densità del fluido
- V_{∞}^2 : velocità asintotica del flusso
- S: superficie di riferimento
- C_L : coefficiente di portanza

- C_D : coefficiente di resistenza

La devianza è perpendicolare alle altre due forze.

Nella nostra trattazione ci focalizzeremo solo sulle prime due.

Capitolo 3

Aerodinamica & auto solari

L'energia a disposizione di un'auto solare è limitata, dal momento che essa è fornita esclusivamente dalle celle solari, le quali hanno un'area limitata da regolamento. Per poter avere una determinata velocità di crociera è necessario quindi, in fase di progetto, stabilire un bilancio tra l'energia disponibile e quella consumata. L'aerodinamica, nel progetto di un'auto solare, riveste un ruolo estremamente importante dal momento che circa il 70% della perdita di potenza è da imputare alla resistenza all'avanzamento. Quest'ultima, per un auto solare, include la resistenza al rotolamento e la resistenza aerodinamica.

3.1 Tipi di resistenza agenti sull'auto

3.1.1 Resistenza aerodinamica

Per essere competitiva un'auto solare deve poter sostenere una velocità media di almeno 90 km/h e, a tale velocità, il maggior contributo alla resistenza all'avanzamento del veicolo è dato dalla resistenza aerodinamica. In questo paragrafo verranno analizzate le possibili "sorgenti" di tale resistenza, conoscenza fondamentale per capire come poter ridurre il loro contributo.

1. Resistenza d'attrito

È la resistenza legata alle azioni tangenziali τ che il fluido esercita sul corpo in movimento a causa della sua viscosità.

$$\tau = \mu \frac{\partial(u)}{\partial(y)} \quad (3.1)$$

Dove:

- μ : è la viscosità del fluido.
- u : è la componente del vettore velocità del corpo in direzione tangente alla traiettoria.

Tale resistenza deriva dalla presenza dello strato limite, zona in cui gli effetti della viscosità dell'aria non sono trascurabili ed il suo contributo è tanto maggiore quanto più è ritardato il distacco del flusso.

Essa è quindi il tipo di resistenza predominante su un corpo aerodinamico come le auto solari dal momento che esse sono progettate in modo da mantenere l'aderenza del flusso al corpo.

Inoltre, la resistenza d'attrito risulterà tanto maggiore quanto maggiore sarà la superficie del corpo esposta al flusso ("superficie bagnata") e la rugosità della superficie stessa.

Infine, è proporzionale alla velocità del corpo e alla viscosità del fluido e il suo effetto è più marcato negli strati limiti turbolenti che in quelli laminari.

2. Resistenza di forma

È la resistenza legata all'andamento delle pressioni sul corpo a causa della presenza dello strato limite. Nel punto di ristagno anteriore, punto da cui esso si sviluppa, il flusso ha velocità nulla e pressione massima. Nell'aggirare il corpo il flusso accelera, per il Teorema di Bernoulli, la pressione diminuisce fino ad un minimo in corrispondenza della sezione di massimo spessore del corpo. Segue poi una zona di "recupero della pressione", che idealmente dovrebbe avvenire fino al punto di ristagno posteriore. Ma, lo spessore dello strato limite, aumenta lungo la lunghezza del corpo. Se il suo spessore è tale da non permettere una congiunzione del flusso in un altro punto di ristagno, si avrà separazione del flusso con conseguente creazione di vortici e, quindi, ulteriore resistenza all'avanzamento. Avremo quindi, a causa del mancato recupero completo della pressione, una pressione di ristagno a valle del corpo minore rispetto a quella a monte. Ciò causa una forza di resistenza. Essa è direttamente proporzionale all'area frontale del corpo ed è tanto più grande quanto è grande lo spessore dello strato limite.

È quindi necessario avere un corpo aerodinamico in cui la separazione del flusso avvenga più lontano possibile dal bordo d'attacco.

3. Resistenza Indotta

Prendendo in considerazione un'ala, se essa è portante, si ha che il flusso che scorre sul ventre si trova a una pressione maggiore rispetto a quello sul dorso. Dal momento che l'ala ha un'estensione finita, si ha un "contatto" tra ventre e dorso e, poiché per natura i fluidi tendono ad andare da zona a bassa pressione a zone a pressione maggiore, si ha una deviazione delle linee di corrente del ventre verso la zona a bassa pressione del dorso mentre, sul dorso, la deviazione avviene dall'estremità verso la radice dell'ala. Si crea quindi una vorticità tangenziale, la quale induce una velocità verso il basso, deviando così le linee di corrente. Tale deflessione viene detta "downwash". La portanza sarà quindi perpendicolare alla nuova direzione

della velocità. Avremo la nascita di una componente della portanza nella direzione originaria delle linee di corrente: la resistenza indotta.

Il coefficiente di resistenza indotta è proporzionale al quadrato del coefficiente di portanza. Pertanto, per ridurre questo contributo, occorrerà fare in modo che il corpo non generi portanza, sia essa positiva o negativa e, quindi, l'angolo d'attacco del corpo deve essere pari a quello di portanza nulla.

4. Resistenza di Interferenza

È dovuta a imperfezioni di fabbricazioni sul corpo, giunzioni, elementi di collegamento e all'accoppiamento del cupolino e delle carenature delle ruote al corpo.

3.1.2 Ventilazione

Il pilota, le apparecchiature elettriche, batterie e motore necessitano di un flusso d'aria dall'esterno per evitare il surriscaldamento. Tale ventilazione aumenta la resistenza sull'auto. È quindi estremamente importante controllare la portata di ventilazione che entra all'interno del veicolo, fornendo solo quella necessaria.

Ricerche approfondite sulla riduzione della resistenza di ventilazione furono effettuate negli anni '30 e '40 per gli aerei da combattimento. I risultati di queste ricerche possono essere così riassunti:

- Minimizzare la velocità nel sistema, quindi l'area del condotto di ingresso deve essere massimizzata. Inoltre, l'apertura deve essere arrotondata.
- La velocità d'uscita deve essere massimizzata, quindi l'area del condotto di uscita deve essere minimizzata.
- I diagrammi del coefficiente di pressione devono essere utilizzati per posizionare il condotto d'ingresso nella zona di alta pressione (per esempio al punto di ristagno del muso del corpo principale o alla base del cupolino) e quello d'uscita in corrispondenza delle zone di bassa pressione. L'uscita del condotto, inoltre deve essere posizionata in modo tale che il flusso di scarico sia espulso con direzione il più possibile parallela alla direzione del flusso indisturbato.

3.1.3 Resistenza al rotolamento

È un tipo di resistenza strettamente legata allo pneumatico, in particolare alla sua deformazione durante il rotolamento e allo schiacciamento nel punto di contatto. L'energia utilizzata per deformarli, viene in parte dispersa in calore con conseguente riscaldamento dello pneumatico. Questa perdita di energia corrisponde alla resistenza al rotolamento. Tale resistenza dipende da:

- Diametro dello pneumatico : maggiore è il diametro minore sarà la resistenza, in quanto

si deforma meno.

- Pressurizzazione dello pneumatico: se sotto-gonfiato consuma più energia.

- Tipo di asfalto : sarà maggiore su un asfalto ruvido.

- Peso dell'auto: maggiore è il peso maggiore sarà la resistenza al rotolamento. Per conferire all'auto un peso minore viene usata la fibra di carbonio per buona parte della struttura di essa.

- Velocità del veicolo: aumenta linearmente con essa

(Michelin e Bridgestone hanno progettato pneumatici specifici per le auto da corsa solari)

Il contributo della resistenza al rotolamento alla resistenza totale su un'auto la cui velocità media è di circa 90 km/h, anche se non trascurabile, è secondario. Pertanto, essa non verrà approfondita in questa trattazione.

3.2 Potenza necessaria a vincere la resistenza aerodinamica

La potenza necessaria (P) a vincere la resistenza aerodinamica è data dal prodotto della velocità del veicolo (V) e la resistenza aerodinamica (D).

$$P = DV \quad (3.2)$$

Come detto in precedenza, la potenza disponibile su un'auto solare è limitata. È quindi estremamente importante ridurre al minimo la resistenza aerodinamica. Ma non solo, è altrettanto importante mantenere una velocità costante. Il consumo di potenza con una velocità di 80 km/h per un'ora è minore rispetto al consumo con una velocità nella prima mezz'ora di 60 km/h e una velocità di 100 km/h nella seconda mezz'ora, nonostante la velocità media sia la stessa.

Pertanto, un'auto in grado di mantenere una velocità costante e una bassa resistenza aerodinamica anche in caso di venti frontali e laterali, massimizzerà la potenza disponibile lungo il percorso.

3.3 Coefficiente di resistenza e Drag Area

Il coefficiente di resistenza aerodinamica è un coefficiente adimensionale utilizzato per misurare la resistenza aerodinamica di un corpo in moto in un fluido. Esso è definito come:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 S} \quad (3.3)$$

Dove:

- D : Forza di resistenza aerodinamica
- ρ : densità del fluido
- V_∞^2 : velocità asintotica del flusso
- S : superficie di riferimento

Come si può notare dalla definizione, il coefficiente di resistenza prescinde dall'area di riferimento. Essa viene scelta in base al tipo di resistenza che prevale sul corpo. Nel caso di corpi tozzi, come le auto, la resistenza dominante è quella di Pressione, dal momento che questi corpi sono caratterizzati da un'elevata separazione del flusso. Di conseguenza si sceglierà come area caratteristica l'area frontale, essendo la resistenza di pressione proporzionale ad essa. Per i corpi aerodinamici (corpi in cui lo strato limite è "attaccato" al corpo per la maggior parte della superficie), come le auto solari, la resistenza è principalmente causata dall'attrito dell'aria sul corpo stesso, quindi, per lo stesso principio si userà come area caratteristica la "superficie bagnata". (Essa è proporzionale allo spessore del corpo.) Il prodotto tra coefficiente di resistenza e area caratteristica, noto come drag area ($C_D A$) e comunemente misurato in m^2 , sarà il parametro per comparare diversi progetti. Ogni componente che costituisce l'auto ha un suo C_D e una sua area caratteristica. Tale prodotto, per ogni componente, dovrà essere ridotto al minimo nella progettazione di un'auto solare con bassa resistenza all'avanzamento. La miglior auto solare ha $C_D A = 0.1 \div 0.15 m^2$. Come si può notare dal grafico in figura 3.1, il coefficiente di resistenza di un flusso laminare è sempre minore rispetto a quello di un flusso turbolento.

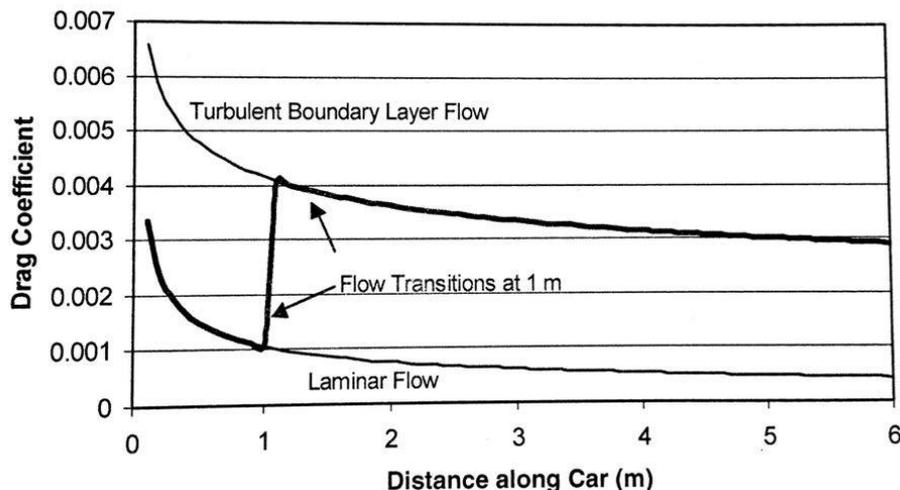


Figura 3.1: Andamento del coefficiente di resistenza lungo l'auto per flusso laminare e turbolento ^[1]

Nella realtà, il passaggio da laminare a turbolento prevede una zona di transizione. L'area sottesa alla curva rappresenta la resistenza totale dell'auto. Avere una prevalenza

di flusso laminare riduce tale area e, quindi, la resistenza. Avere una buona percentuale di flusso laminare richiede un accurato progetto del muso dell'auto che verrà approfondito più avanti. A tale scopo esso dovrà essere arrotondato come il "muso" di un profilo alare, con ampliamento graduale e senza rugosità. Ogni piccola protuberanza o irregolarità, infatti, porta alla transizione del flusso da laminare a turbolento. Un esempio sono le giunzioni tra corpo e cupolino e tra corpo e carenature o il bordo dei pannelli solari.

Dalla figura 3.1 è inoltre possibile vedere come il coefficiente di resistenza diminuisca lungo la parte posteriore dell'auto. A pari percentuale di flusso laminare, un'auto più corta, ha minore coefficiente di resistenza. Ma, un'auto più lunga, può avere un coefficiente di resistenza minore se essa è caratterizzata da un quantitativo maggiore di flusso laminare. Ciò può essere ottenuto allungando il muso dell'auto.

3.4 L'impatto dell'aerodinamica sulla geometria esterna delle vetture solar challenge

Abbiamo visto come il maggior contributo alla resistenza all'avanzamento è dato dalla resistenza aerodinamica. Pertanto, per ottimizzare le prestazioni di un'auto solare e, quindi, sviluppare un buon progetto aerodinamico, occorre ridurre al minimo il coefficiente di resistenza aerodinamica o, meglio, l'area resistente. In questo paragrafo verranno illustrate le geometrie che da letteratura realizzano tale intento, tenendo conto dei vincoli imposti dal regolamento e confrontandole con le soluzioni adottate dai team vincenti. L'auto verrà divisa nelle sue tre parti principali, analizzando come ridurre il contributo alla resistenza aerodinamica di ogni singolo componente e, quindi, dell'intera vettura: corpo principale, cupolino, carenature.

3.4.1 Premessa

Progettare un'auto estremamente efficiente dal punto di vista aerodinamico è fondamentale, ma ciò non implica necessariamente la vittoria. Diversi sono i fattori in gioco che la determinano:

1. Efficienza delle celle solari

L'energia in un'auto solare è fornita esclusivamente dalle celle solari. La loro efficienza riveste un ruolo importante dal momento che la superficie pannellabile è limitata da regolamento e che, dei circa 1200W per m^2 disponibili dalla luce solare, esse ne possono trattenere una percentuale pari al rendimento. Sia nel 2011 che nel 2013 la superficie utilizzabile per le celle solari è di massimo $6m^2$ per celle al silicio e di $3m^2$ per gli altri tipi. Nuna, del Nuon Team che ha vinto fino ad oggi sei edizioni della World Solar Challenge, presenta una efficienza aerodinamica pari ad altri concor-

renti, ma fino al 2007 è stata dotata di pannelli solari formati da celle di arseniuro di gallio forniti dall'ESA (Agenzia Spaziale Europea) e con un rendimento dichiarato maggiore del 26% (i rendimenti delle celle fotovoltaiche in commercio, in genere, non superano il 21%). Se non si può disporre di celle ad un così elevato rendimento, ecco che occorre modificare la forma del veicolo per poter alloggiare il massimo numero di celle fotovoltaiche e in modo che queste siano esposte perpendicolarmente all'incidenza dei raggi solari, anche a scapito dell'aerodinamica.

2. Affidabilità, stabilità e buona guidabilità

L'obiettivo primario è produrre un'auto efficiente dal punto di vista energetico, che possa avere una elevata velocità di crociera usando poca energia. Non bisogna però dimenticare che l'auto debba essere affidabile e che essa possa essere utilizzata per altre gare su cui possono incorrere diversi tipi di problemi quali salite, discese, vento laterale e/o frontale, irregolarità dell'asfalto, animali sul percorso. È quindi necessario che essa, oltre ad essere aerodinamica, sia stabile e abbia una buona guidabilità.

3. Strategia di gara e collaborazione tra i membri del team

È importante avere una buona strategia di gare per condurre al meglio la gara. Un esempio è quello di scegliere una determinata velocità di crociera a seconda delle condizioni meteo e della potenza disponibile. Il team olandese Twente, classificata quinta nel 2011 e terza nel 2013, ha tra i suoi membri il meteorologo della Royal Dutch Air Force Peter Korevaar che fornisce informazioni meteo sempre aggiornate. Il team ha infatti accesso a immagini satellitari dettagliate della Stuart Highway e, con l'interpretazione dei dati da parte di Peter Korevaar, prendono le decisioni tatticamente più efficienti durante la competizione.

Una buona collaborazione è inoltre essenziale in fase di progetto. Spesso accade che per via di dispute tra i membri del team non si arrivi a una soluzione in tempi brevi o, peggio, proprio per non aver sfruttato al meglio il tempo a disposizione si scelga una soluzione carente e non aerodinamica. Un esempio, è la forma del cupolino di Emilia III che verrà trattato nel prossimo capitolo.

4. Condizioni meteo

Nello sviluppo di un'auto dalle alte prestazioni aerodinamiche il fattore meteo è estremamente importante. In particolare, in presenza di vento laterale e frontale, vi sono geometrie che si comportano "meglio" in termini di resistenza mentre, quando questi venti sono assenti queste stesse geometrie portano ad un incremento del coefficiente di resistenza.

5. Budget a disposizione

I team "vincenti" Nuon e Tokai University hanno sponsor importanti e un budget a

disposizione non comparabile con quello del team italiano. Questo fattore è stato molto penalizzante per Onda Solare, portando il team a produrre un'auto molto diversa da quella progettata. Tale aspetto sarà approfondito successivamente.

6. Realizzabilità costruttiva

Alcune forme suggerite dall'aerodinamica sono di difficile costruzione. Inoltre, molte delle parti che costituiscono l'auto devono ospitare componenti meccanici, elettronici e strutturali pertanto, la forma aerodinamicamente più efficiente, dovrà adattarsi a tale necessità.

7. Metodi di analisi utilizzati

Per simulare l'andamento del flusso attorno al corpo e, quindi, studiare le performance aerodinamiche del veicolo da progettarsi vi sono 3 metodi: test su strada, galleria del vento e analisi fluidodinamica computazionale (CFD). In fase di sviluppo ovviamente il primo metodo non è utilizzabile. Gli altri due metodi andrebbero usati insieme. La tecnologia CFD, sempre più affidabile, richiede tempi e costi minori. Avere a disposizione una galleria del vento che verifichi quanto è stato implementato al CFD è, però, un vantaggio in più.

3.4.2 Corpo principale della vettura

Il primo componente ad essere analizzato è il corpo principale della vettura, ovvero quello che, come singolo componente, fornisce il maggiore contributo alla resistenza totale sull'auto.

Il regolamento impone per la classe Challenge nel 2011 che:

- “ *B.1.1 When in motion, the maximum size of the vehicle is 5000 mm in length and 1800 mm in width*”
- “*B.11 Rear brake lamps, front and rear turn indicators, and front and rear hazard lamps are required. These must be visible in sunlight by other road users at a distance of 30 m*”.
- “*D.5.1 For silicon cells the allowable area is 6 m²*.”
- “*D.5.2 For any other photovoltaic technology the allowable area is 3 m²* ”. [7]

Nel 2013 vi è una riduzione della lunghezza massima del veicolo e una specificazione sulle luci e gli indicatori di direzione:

- “ *2.5 When moving in a straight line, Challenger Class and Cruiser Class Solar EVs must be no more than 4500mm in length, no more than 1800mm in width and no more than 1800mm in height*”

- “2.55 Lamps must be visible in sunlight by other road users at a distance of 30m.
2.56 The positions of lamps must comply with UNECE Regulation 48:
 - Direction indicator lamps must be within 400mm of the extreme outer edge of the Solar EV on each side, at least 600mm apart (400mm apart if the Solar EV is less than 1300mm wide), and not less than 350mm above the ground. They must be visible 15° up, 5° down, 80° outward and 45° inward.
 - Brake lamps must be at the rear of the Solar EV within 400mm of the extreme outer edge of the Solar EV on each side, at least 600mm apart (400mm apart if the Solar EV is less than 1300mm wide), and not less than 350mm above the ground. They must be visible up, 5° down and 45° to the left and right.
 - A centre eye-level brake lamp is required, not more than 150mm below the rear windscreen or not less than 850mm above the ground. It must be visible 10° up, 5° down and 10° to the left and right.
- 2.57 Direction indicators must flash at 90 ± 30 flashes per minute. [7]

Come si può vedere dalla figura 3.2, la forma di minima resistenza per un corpo tridimensionale è la forma a goccia (*teardrop o torpedo*).

Shape	C_D
 Sphere	0.47
 Hemisphere	0.42
 60° cone	0.5
 Circular plate	1.17
 Cube	1.05
 Teardrop [t/c = 0.25]	0.05

Figura 3.2: Valori del coefficiente di resistenza per un corpo tridimensionale, calcolati per numeri di Reynolds tra 10^4 e 10^6 . [4]

Pertanto , dalla vista in pianta e dalla vista laterale , la forma con minore resistenza è un profilo alare, mentre, dalla vista frontale è una sezione ellittica variabile lungo la lunghezza.

Per un'auto solare la cui lunghezza massima è di 4.5 m o 5 m, occorre modificare questa forma per poter ospitare il numero maggiore di celle ammissibili da regolamento. Per questo motivo occorrerà troncare la parte posteriore del profilo. In questa sezione verrà analizzato come ottenere dalla forma a goccia una forma più adatta a un'auto solare senza troppe penalizzazioni in termini di resistenza e, quindi, dove e come dovrà avvenire il troncamento.

Vediamo anzitutto come varia il coefficiente di resistenza per un corpo dalla forma a goccia al variare del rapporto $\frac{l}{d}$ (dove l sta per lunghezza e d per diametro massimo del corpo) per una data area trasversale. In figura 3.3 si può vedere che, ad un aumento di tale rapporto, si ha una riduzione della resistenza e, in particolare, si ha il minimo del coefficiente di resistenza per una lunghezza che è tre volte il diametro. Dopodiché esso torna ad aumentare poiché aumenta la resistenza d'attrito dovuto ad un aumento della superficie bagnata.

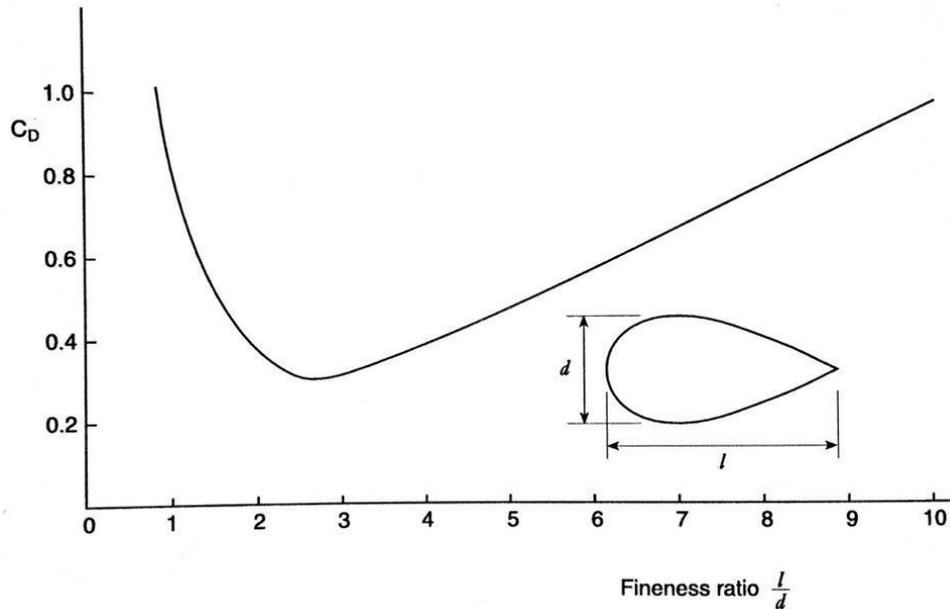


Figura 3.3: *Variazione del coefficiente di resistenza con il rapporto $\frac{l}{d}$.* [4]

Con questa base iniziamo a modellare la nostra auto solare modificando il torpedo, più precisamente un *“torpedo with a flat tail”* [2], come mostrato in figura 3.4.

Aumentando il rapporto $\frac{L}{D}$, o diminuendo il rapporto $\frac{D}{L}$, il coefficiente di resistenza basato sulla superficie bagnata ($C_{d,wet}$) si approssima sempre più al coefficiente di resistenza di una lastra piana ($C_{f,flat}$) con stesso punto di transizione x_t :

$$C_{d,wet} = C_{f,flat} \left(1 + 1.5 \left(\frac{D}{L} \right)^{1.5} + 19 \left(\frac{D}{L} \right)^6 \right) \quad [2] \quad (3.4)$$

Continuiamo la nostra modifica ricordando i fattori che permettono di ridurre i vari

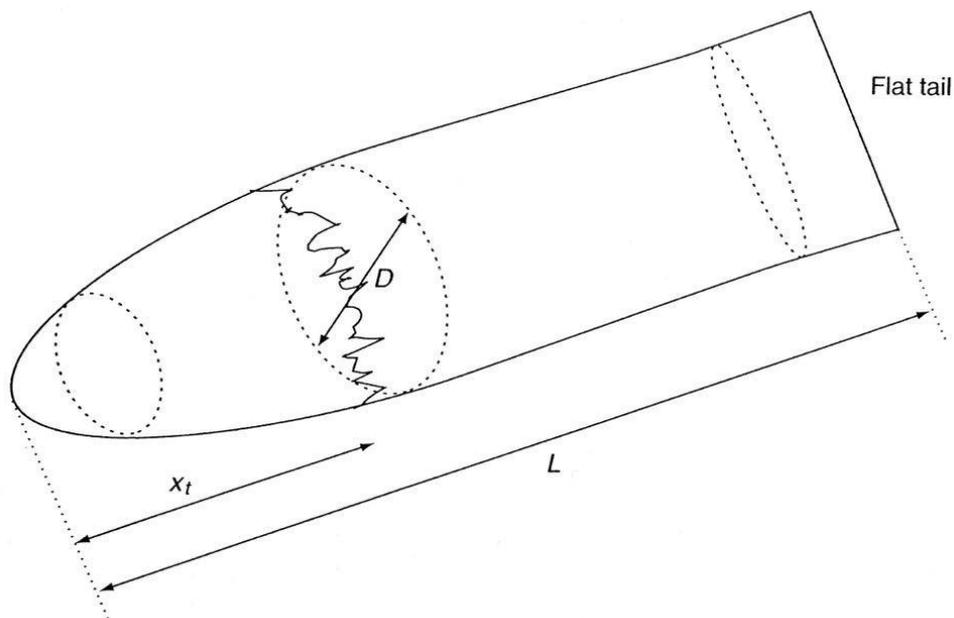


Figura 3.4: *Torpedo with a flat tail.* D è il diametro massimo del torpedo, L la lunghezza e x_t è la posizione del punto di transizione a partire dal bordo d'attacco. ^[2]

tipi di resistenza agenti sul corpo senza però dimenticare che l'obiettivo è ridurre la drag area e non il solo coefficiente di resistenza. Per ridurre la resistenza di pressione è necessario che la separazione avvenga il più lontano possibile dal bordo d'attacco e, quindi, avere una superficie continua senza spigoli vivi e/o sporgenze. In più, il progetto del bordo d'attacco, deve essere tale che non vi sia separazione anche in caso di venti laterali, la cui presenza durante la gara non è trascurabile.

Inoltre, per ridurre questo contributo, occorre favorire il recupero della pressione verso il retro del veicolo quindi avere un corpo non troppo spesso ed evitare una brusca rastremazione dopo la zona di massimo spessore del corpo.

Ciò significa che, dal punto di vista frontale, l'area trasversale si riduca gradualmente verso il retro, proprio come nella forma a goccia. Il troncamento dovrà quindi essere tale da ottenere una rastremazione che permetta al flusso di seguire la forma del corpo e, quindi, rimanere attaccato ad esso. Il bordo d'uscita del corpo principale è quindi di fondamentale importanza, in particolare il suo spessore. Infatti se il suo spessore è tale da non permettere una congiunzione del flusso in un punto di ristagno posteriore, si avrà separazione del flusso.

La figura 3.5 mostra la penalizzazione in termini di resistenza percentuale in funzione dello spessore del bordo d'uscita (trailing edge thickness) t_{te} , spessore che incorre a causa del troncamento del profilo.

Occorre quindi minimizzare lo spessore del bordo d'uscita senza però dimenticare che questo debba avere un'adeguata resistenza strutturale in caso di vibrazione e urti e che esso, se si vuole ridurre la resistenza, debba contenere luci richieste da regolamento. Ave-

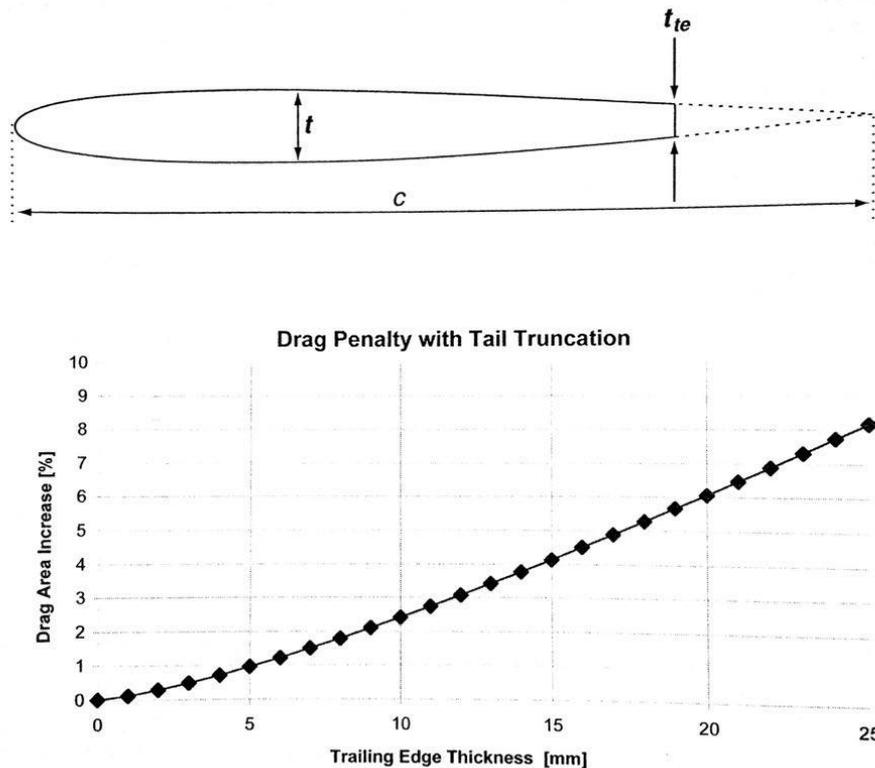


Figura 3.5: Penalizzazione in termini di resistenza percentuale a seguito del troncamento del profilo in funzione dello spessore del bordo d'uscita. ^[2]

re luci esterne al bordo d'uscita, così come ogni tipo di sporgenza dal corpo principale, comporterebbe un incremento di resistenza. In realtà le luci potrebbero anche essere integrate nel retro del cupolino o dietro le carene delle ruote ma, per i vincoli imposti dal regolamento, l'unica possibilità per ridurre la resistenza è inserirli all'interno del bordo d'uscita. Comunque sia, un suo spessore nell'intorno di 5 mm, è un buon compromesso poiché esso porta ad un incremento dell'1% della resistenza totale dell'auto, penalità che è trascurabile. In figura 3.6 è visibile il bordo d'uscita dell'auto olandese Nuna 6, la quale dispone di una fila di led integrati in esso. Inoltre, bisogna tenere presente che, ciò che si progetta, deve poi essere prodotto e, produrre una superficie levigata, continua, con rastremazione graduale e con un bordo d'uscita il più possibile sottile è difficile e dispendioso.

Proprio per questo motivo, considerando una vista dall'alto, vediamo che molti team, invece che un profilo troncato, utilizzano un corpo dal muso arrotondato e con una larghezza costante. È infatti più facile costruire un corpo che sia costante in larghezza per la maggior parte della lunghezza. Da un punto di vista trasversale invece si sceglie, a volte, una sezione rettangolare con bordi arrotondati piuttosto che ellittica. Queste scelte, visibili in figura 3.7, oltre che rendere la loro produzione meno difficoltosa, permettono di alloggiare più celle solari rettangolari sulla superficie e anche più facilmente, il tutto,



Figura 3.6: *Bordo d'uscita Nuna 6, seconda classificata WSC 2011* ^[6]

ovviamente, a scapito della resistenza. L'aumento della resistenza aerodinamica non deve infatti essere più significativa dell'aumento di potenza fornito da un numero maggiore di celle solari. Analizzando poi la forma in pianta delle auto '11Tokai Challenger e Nuna 6,

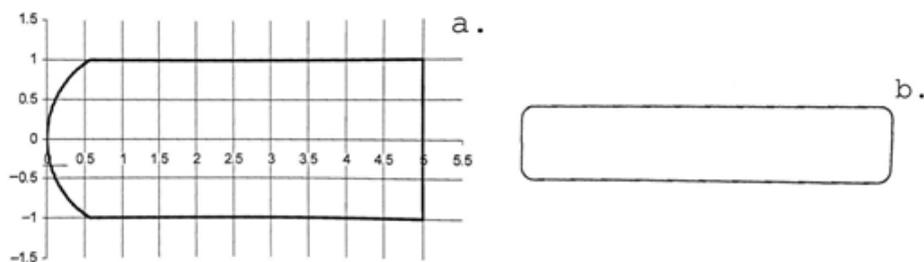


Figura 3.7: *soluzioni alternative al profilo troncato:*

a. Vista dall'alto: profilo dal muso arrotondato

b. Vista frontale rettangolo con bordi curvi ^[1]

classificate rispettivamente prima e seconda alla WSC 2011, e visibili in figura 3.8 e 3.9, vediamo che questa è addirittura praticamente rettangolare. Tale forma peraltro è quasi sempre stata adottata dai team delle suddette auto.

Per permettere una rastremazione graduale dal punto di vista trasversale e avere uno spessore del bordo d'uscita che non penalizzi troppo in termini di resistenza occorre che il corpo stesso non sia eccessivamente spesso. Abbiamo inoltre detto che, evitare un spessore del corpo elevato, è necessario per favorire il recupero della pressione ed evitare la separazione e, quindi, per ridurre la resistenza di forma. Ma, lo spessore del corpo, influisce anche sulla resistenza d'attrito. Infatti, un corpo più spesso vede velocità del



Figura 3.8: *Vista in pianta '11 Tokai Challenger* ^[9]

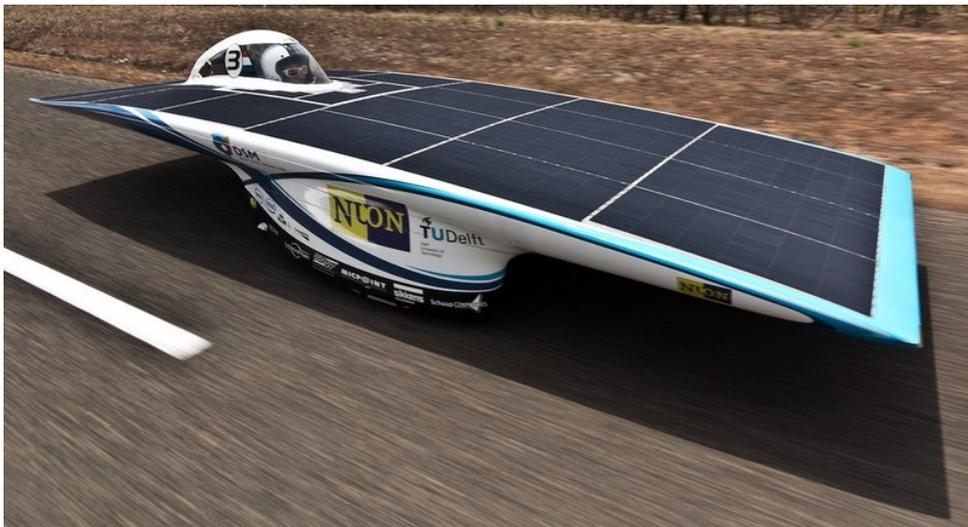


Figura 3.9: *Vista in pianta Nuna 6* ^[6]

flusso maggiori e, quindi, una resistenza d'attrito maggiore, essendo questa proporzionale al quadrato della velocità locale. Non dobbiamo dimenticare che questi profili devono poi contenere i componenti meccanici ed elettronici dell'auto, pertanto, lo spessore dovrà tenere conto anche di questa esigenza oltre che dell'incremento di resistenza che ne deriva. Questo effetto è però piccolo se il flusso resta attaccato al corpo. Se un corpo è aerodinamico, questa condizione è automaticamente soddisfatta e, quindi, la resistenza d'attrito sarà dipendente dallo stato dello strato limite. Pertanto proseguiamo con la nostra modifica tenendo a mente tutto ciò che permette di ridurre questo contributo che, ricordiamolo, è quello predominante su un corpo aerodinamico come l'auto solare:

1. Estensione del flusso laminare
2. Riduzione della superficie bagnata
3. Riduzione della rugosità superficiale

Per quel che riguarda l'estensione del flusso laminare, sia nella parte superiore del corpo principale che in quella inferiore, la forma del "muso" gioca un ruolo molto importante. Analizziamola dapprima da un punto di vista laterale. Abbiamo detto che la forma che minimizza la resistenza dal punto di vista laterale è un profilo alare. La curvatura del bordo d'attacco deve essere tale che il flusso acceleri gradualmente nell'aggirarlo. L'accelerazione del flusso è visibile tramite i diagrammi del coefficiente di pressione: l'accelerazione sarà graduale se il coefficiente di pressione procede gradualmente verso valori negativi e, per promuovere l'estensione del flusso laminare, si dovrebbe avere il minimo del coefficiente di pressione dopo la zona di massimo spessore. Inoltre, nelle regioni in cui si vuole avere flusso laminare, i diagrammi del coefficiente di pressione dovrebbero essere come quelli di una sezione alare con flusso laminare con rapporto t/c comparabile. La *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA), ha sviluppato la serie di profili NACA 66 per promuovere quanto più possibile il flusso laminare. Questi profili hanno un rapporto L/D (lift to drag) molto basso e, pertanto, non vengono usati in aeronautica ma si prestano bene ad applicazioni come le auto solari avendo questi una bassa resistenza. In figura 3.10 è mostrato il profilo NACA 66-010, il cui massimo spessore (10%) si ha al 45% della corda, a confronto con il profilo NACA 0010, il cui massimo spessore (10%) si ha al 25% della corda. Come si può notare in figura 3.10, spostando verso il retro la zona di massimo spessore del profilo alare, è possibile avere un'estensione del gradiente di pressione favorevole (nel profilo 0010 si ha il minimo della pressione prima della zona di massimo spessore mentre per il profilo 66-010 esso si ha dopo tale zona). Grazie alla percentuale di flusso laminare maggiore, il profilo 66-010 ha una resistenza minore del 35% rispetto al profilo 0010. In figura 3.10 è inoltre possibile vedere come, il picco negativo del coefficiente di pressione del profilo 0010 sia maggiore di quello del profilo 66-010.

In un caso ideale il coefficiente di pressione, nella parte finale del profilo, dovrebbe tornare a un valore pari a $+1$. Ma, nella realtà, si ha un mancato recupero completo della

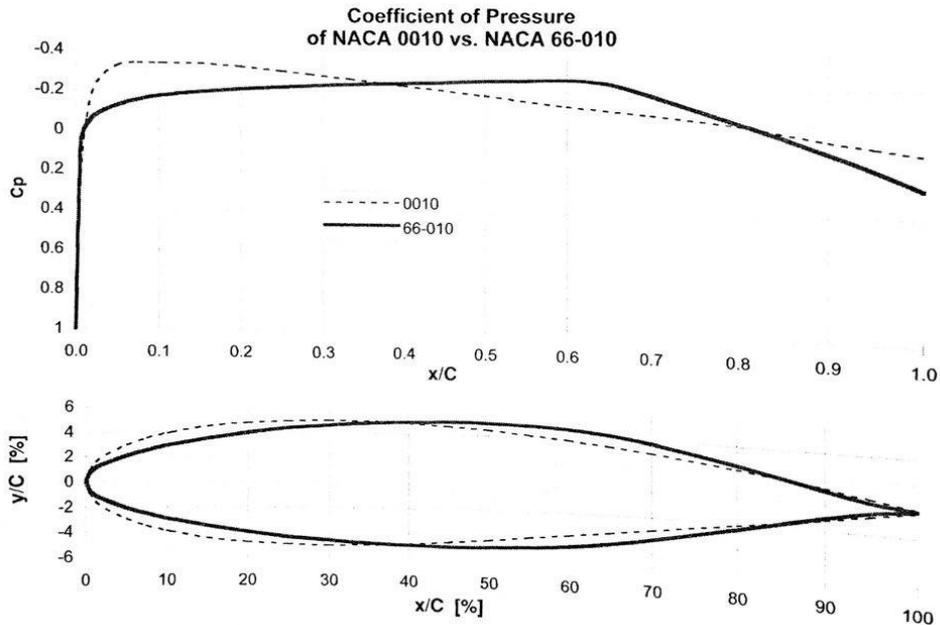


Figura 3.10: Due profili NACA a confronto: NACA 0010 un generico profilo simmetrico e NACA 66-010 progettato per avere un'estensione del flusso laminare. [2]

pressione causato dall'aumento dello spessore dello strato limite lungo la lunghezza del profilo e, il coefficiente di pressione assume un valore minore di 1. Notiamo però, dalla figura 3.10, che il profilo 66-010 ha un coefficiente di pressione più vicino a 1 rispetto al profilo 0010. In ogni caso, finché la distanza lungo x tra il punto in cui C_P da un valore $+1$ si dirige verso valori più negativi è piccola, la resistenza di forma è contenuta.

Analizziamo ora il muso da una vista dall'alto. Esso deve essere arrotondato come il bordo d'attacco di un profilo alare.

Consideriamo un veicolo il cui muso sia molto curvo: quando l'aria impatta sul muso, le linee di flusso non scorrono dritte sul corpo, parallele all'asse longitudinale del corpo ma, queste, vengono deviate lateralmente per via della forma tridimensionale del muso. Questa distorsione delle linee di flusso genera un fenomeno di *cross-flow*, visibile in figura 3.11. Sono due i meccanismi per cui il flusso può essere portato alla transizione a causa del *cross-flow*: *crossflow instability* e *attachment-line contamination*. Nel primo caso, la componente di velocità del *cross-flow* causa una deviazione delle linee di flusso con conseguente transizione. Nel secondo caso, sopra e sotto l'attachment-line (segmento A-A' in figura 3.11 (b)), la curvatura del muso genera un gradiente di pressione negativo che spinge il flusso nella direzione della corda. Quando ciò accade, il profilo di velocità nello strato limite del *cross-flow* può sviluppare un punto di flesso che può portarlo alla transizione.

La curvatura del muso può essere espressa tramite l'angolo θ_{ns} , il *nose-sweep angle*, visibi-

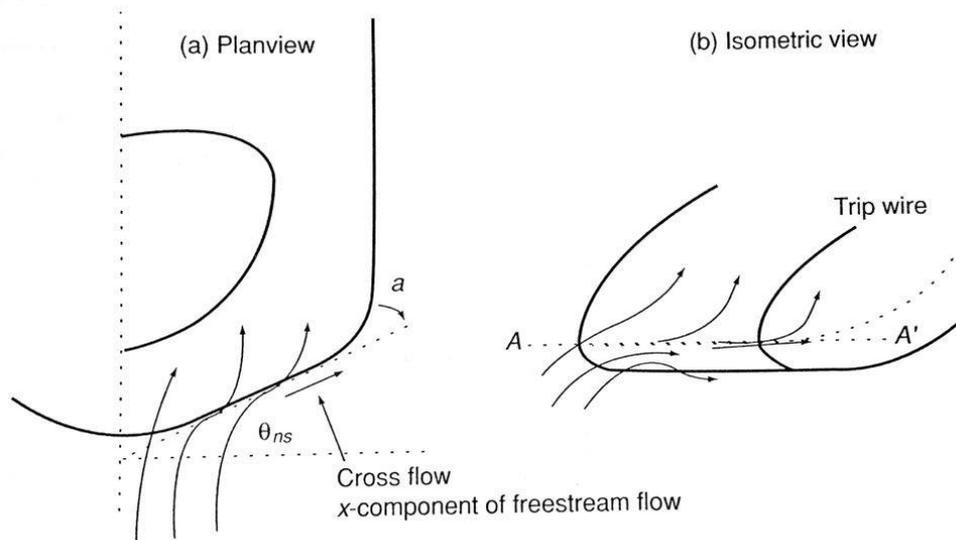


Figura 3.11: Fenomeno di cross-flow su un'auto solare dal muso eccessivamente curvo. [2]

le in figura 3.11(a) e definibile come $90 - \alpha$, dove α , guardando l'auto dall'alto, è l'angolo compreso tra un punto sul bordo del muso e l'asse trasversale del veicolo. È possibile definire una velocità critica di transizione del flusso indisturbato alla quale questo diventa turbolento a causa del cross-flow. Tale velocità è estremamente dipendente dal *nose-sweep angle* e, tale dipendenza, è visibile in figura 3.12 sia nel caso di *cross-flow instability* che di *attachment-line contamination*. Si nota che, in caso di *cross-flow instability*, per bassi valori di θ_{ns} , la velocità critica è molto alta, dal momento che il *cross-flow* è praticamente inesistente. Lo stesso vale per θ_{ns} molto elevati, poiché il flusso scorre parallelamente alla superficie del corpo. Nel caso di *attachment-line contamination*, invece, all'aumentare di θ_{ns} , la velocità critica di transizione decresce.

Continuiamo la nostra trattazione analizzando come poter ridurre la superficie bagnata. Il modo più ovvio è ridurre l'area frontale e/o progettare un'auto corta, come mostrato in figura 3.13. Questo è però un grafico a pari larghezza. Se però si progetta un'auto più stretta e lunga, si può ottenere un'auto con la stessa superficie bagnata di un'auto larga e corta. Allora, in termini di resistenza, a pari superficie bagnata, è meglio avere un'auto larga e corta o un'auto lunga e stretta? Per rispondere a questa domanda guardiamo la figura 3.14 e riprendiamo i concetti trattati nel paragrafo 3.3. A pari percentuale di flusso laminare, un'auto più corta ha un coefficiente di resistenza minore rispetto a un'auto più lunga. Ma, allungando il muso ed estendendo il flusso laminare, un'auto più lunga può avere un coefficiente di resistenza minore e, quindi, una drag area minore. Infatti, sia in caso di flusso laminare che turbolento il coefficiente di resistenza è più alto nella zona del muso (si veda la figura 3.1). Pertanto, avere più flusso laminare possibile proprio nella zona del muso, permette di ottenere una maggiore riduzione della resistenza. Infine, il

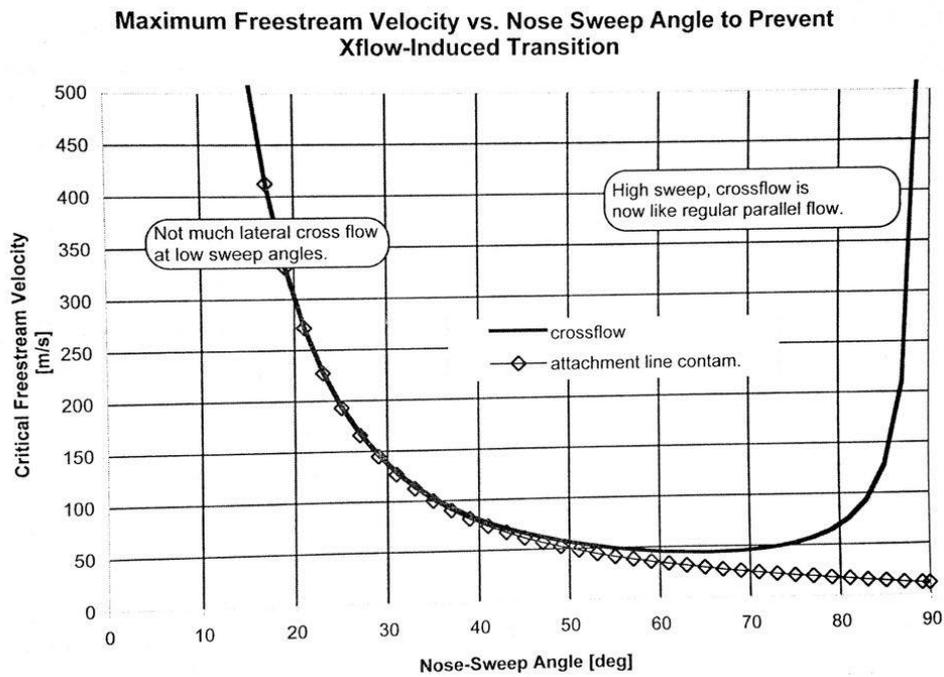


Figura 3.12: Velocità critica di transizione del flusso indisturbato a causa del cross-flow in funzione del nose-sweep angle. Il grafico si riferisce a un corpo il cui muso dalla vista laterale ha un raggio di 10 cm. [2]

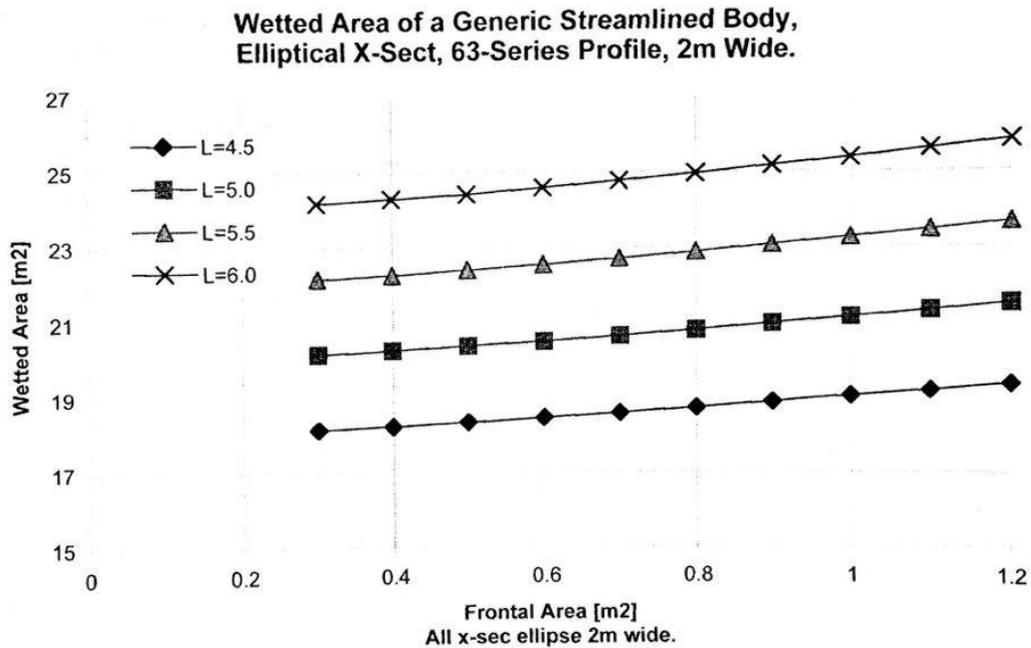


Figura 3.13: Superficie bagnata di corpi aerodinamici di diversa lunghezza in funzione dell'area trasversale massima della sezione ellittica. [2]

vantaggio di un'auto stretta e lunga per una data superficie bagnata e percentuale di flusso laminare, è che abbiamo cambiato il rapporto lunghezza/larghezza.

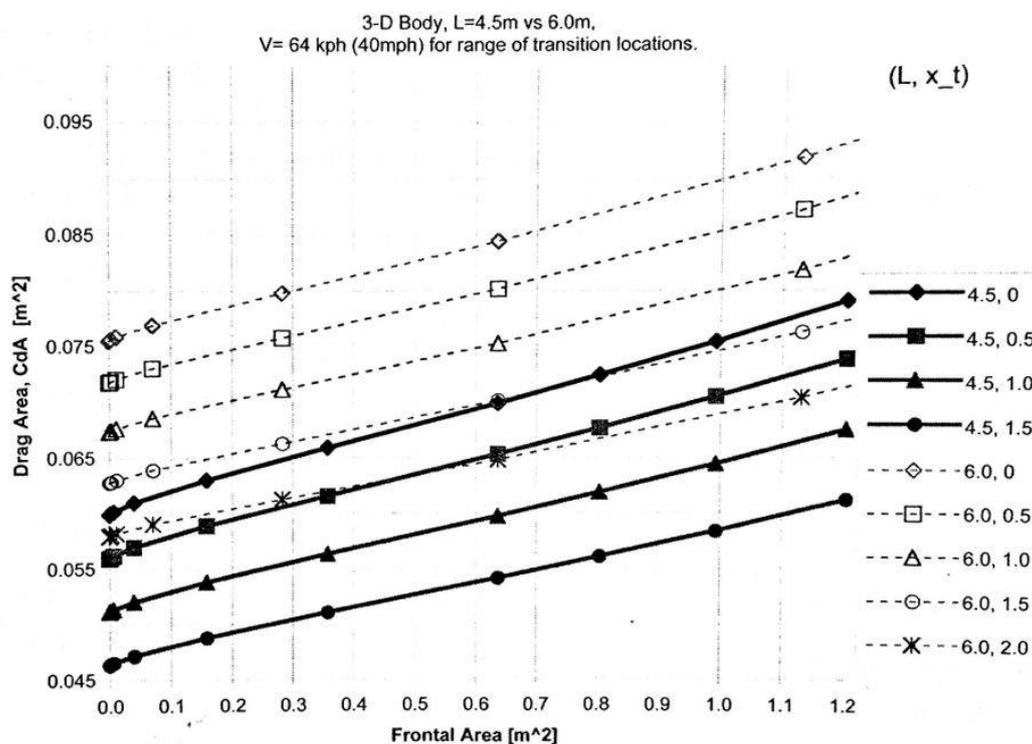


Figura 3.14: Drag area in funzione dell'area frontale per corpi di diversa lunghezza (L) e con diverso punto di transizione (x_t). [2]

Infine, per ridurre la rugosità superficiale, è necessario avere una superficie del corpo continua, levigata, senza aperture, irregolarità e protuberanze. Ciò vale anche per la parte inferiore del corpo (Si veda la superficie inferiore di Nuna 6 in figura 3.6). Molti sono gli accorgimenti che permettono di raggiungere tale scopo, tra cui, un adeguato rivestimento sulle celle solari ed evitare assolutamente l'uso di stickers per la decorazione e/o colorazione della superficie della vettura.

3.4.3 Effetto suolo e altezza ottimale da terra

Abbiamo detto che il torpedo è il corpo tridimensionale che permette di avere il minimo della resistenza. Ciò è vero quando il corpo si muove nel flusso libero, come nelle applicazioni aeronautiche. Ma, quando il veicolo si muove in prossimità del suolo, la situazione cambia. Guardando la figura 3.15 , analizziamo l'andamento delle linee di flusso attorno a un torpedo in prossimità del suolo, ricordando che, come detto precedentemente, nel caso dell'aria, per valori di Mach inferiori a 0.3, queste linee forniscono una stima del modulo della velocità.

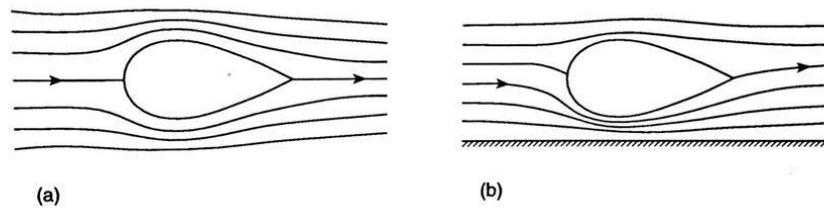


Figura 3.15: *a. Linee di flusso attorno a un torpedo in un flusso libero.*
b. Linee di flusso attorno a un torpedo in prossimità del suolo. ^[4]

Come si può notare, le linee di flusso nella parte inferiore del corpo si infittiscono rispetto a quelle sulla parte superiore e, quindi la velocità aumenta. Per il teorema di Bernoulli, la pressione locale diminuisce e, di conseguenza, la distribuzione di pressioni tra dorso e ventre del veicolo genera una forza di deportanza. Questo effetto, denominato effetto suolo, è estremamente ricercato nelle competizioni per auto da corsa, come la formula 1, in quanto aumenta la tenuta in curva ad alte velocità riducendo i tempi di percorrenza.

La generazione di una forza di portanza però, sia essa positiva o negativa (deportanza), comporta la formazione di una resistenza indotta che va quindi ad incrementare la resistenza totale agente sull'auto. Ora, nelle auto che gareggiano in Formula 1, ciò non è un problema dal momento che la potenza a disposizione è tale da potersi permettere questo aumento di resistenza. Nelle auto solari però, la potenza a disposizione è estremamente limitata e, pertanto, l'effetto suolo è da evitare. La presenza di venti trasversali, inoltre, come vedremo più avanti, può variare le caratteristiche di portanza agenti sul corpo. Pertanto, è consigliabile avere una forza di deportanza nulla ad angoli di imbardata nulli per alleviare gli effetti di una eventuale portanza generata in presenza dei suddetti venti.

I primi studi sulla riduzione dell'effetto suolo, furono effettuati da Klemperer all'inizio del '900 e, poi, più nel dettaglio dall'italiano Morelli tra gli anni '60 e '80. Fu scoperto che, curvando il profilo, il flusso che scorre nella parte inferiore della vettura viene rallentato con un conseguente aumento della pressione. Fornendo quindi una curvatura (camber) tale da avere una pressione sulla parte inferiore del corpo uguale a quella sulla parte superiore, si può eliminare la forza di deportanza. In questo modo la resistenza sul corpo diminuisce e, in particolare, per le auto solari, si ha un decremento del 5-10%. A seconda del profilo simmetrico NACA 66 scelto per promuovere il flusso laminare, in [1] è possibile vedere la curvatura ottimale per ridurre al minimo la resistenza.

La letteratura raccomanda inoltre che, il ventre del corpo, da un punto di vista laterale, sia parallelo al suolo e che, il punto di ristagno anteriore sul muso, sia ad un'altezza tale da ottenere la distribuzione di coefficiente di pressione desiderata lungo il ventre. È poi importante curvare la parte anteriore del ventre per aumentare la percentuale di flusso laminare su di esso e per rendere il flusso laminare più robusto a difetti di superficie e

cambiamenti di angolo d'attacco causati dalle irregolarità del terreno. Il bordo d'uscita del corpo deve poi avere la stessa altezza dal suolo del punto di ristagno sul muso. Quindi, la forma finale del ventre deve essere iterata per trovare la combinazione di ventre e curvatura del dorso che produca la giusta curvatura.

I calcoli effettuati da Morelli sulla variazione del coefficiente di resistenza in funzione della distanza dal suolo sono visibili in figura 3.16. L'altezza dal suolo è un'altezza relativa alla lunghezza del corpo, in modo da poter leggere il grafico indipendentemente da essa. Come si vede in figura 3.16, il coefficiente di resistenza è estremamente alto in prossimità

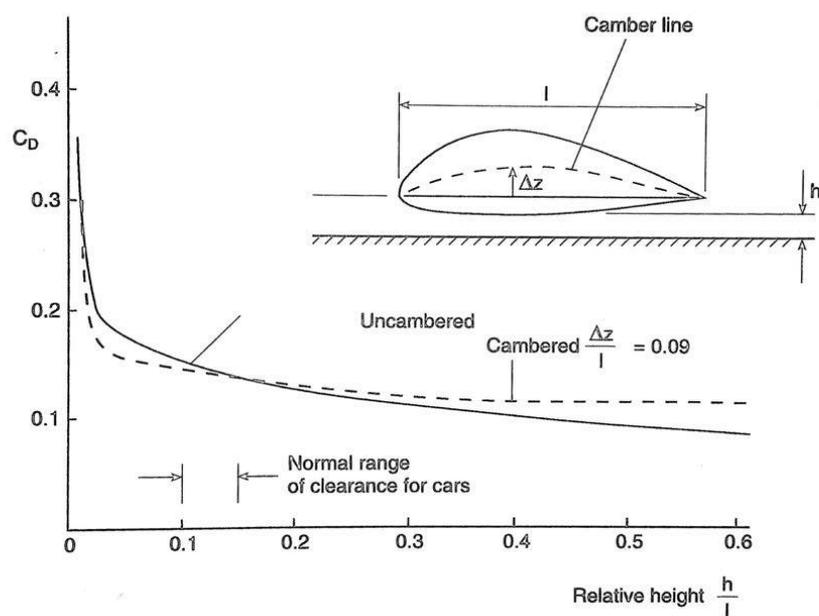


Figura 3.16: Andamento del coefficiente di resistenza in funzione della distanza dal suolo h relativa alla lunghezza l del corpo e effetto della curvatura del profilo.^[2]

del suolo mentre diminuisce all'aumentare della distanza da esso. Si nota inoltre che, un profilo curvo, ad altezze tipiche delle auto da corsa, fornisce un coefficiente di resistenza minore, dopodiché è praticamente costante all'aumentare della distanza dal suolo. Anzi, fuori dal range of clearance for cars, il contributo minore è dato da un profilo simmetrico. Lo studio di Morelli ci fornisce inoltre, per auto di diversa forma, la distanza minima dal suolo raccomandata, i cui valori sono mostrati in figura 3.17.

Quando si aumenta l'altezza dell'auto per ridurre l'effetto suolo, occorre fare alcune considerazioni. Nel conferire all'auto un'altezza tale da ridurre l'effetto suolo, si aumenta l'altezza delle carene e, quindi, si ha un aumento della loro superficie bagnata. Inoltre, un'auto più alta, ha una stabilità minore rispetto ad un'auto più bassa, soprattutto in presenza di venti trasversali. D'altro canto un'auto più bassa, sebbene sia più stabile, per rispettare i vincoli imposti da regolamento sulla visibilità del pilota sarebbe costretta ad avere un cupolino più alto. Occorre quindi fare dei compromessi e prendere determinate decisioni dopo una serie di analisi CFD e, se possibile, con test in galleria del vento.

Body Shape	Non-dimensional Ground Clearance	h_{\min} Ratio	h_{\min} for Solar Car
Torpedo-style shape, oval front view, with width/height ≈ 1.25 , length/height ≈ 3.6 [Ref. Katz]	h/L	0.03—0.05	0.15—0.25 m
Above shape with flat bottom [Ref. Katz]	h/L	0.03—0.05	0.15—0.25 m
Symmetric airfoil, NACA 0015 [Ref. Ranzenbach, 1994]	h/t	~ 0.5	0.2—0.35 m
Torpedo with flat bottom with various cambers, width \approx height [Ref. Morelli, 1960]	h/b	~ 0.15	~ 0.3 m
Morelli body used for MIT Aztec [Ref. Morelli, 1983]	h/b	~ 0.1 to 0.2	~ 0.2 to 0.3 m
Car model, flat-bottomed airfoil shape in side view [Ref. Ahmed]	h/L	~ 0.02	~ 0.1 m

Figura 3.17: Altezza minima dal suolo raccomandata. L è la lunghezza del corpo, t il suo spessore e b la sua larghezza. [2]

3.4.4 Cupolino

Il regolamento impone, per la WSC 2011 che:

- “B.3.1 The driver must have vision in all directions to the satisfaction of the Chief Scrutineer. Rear vision may be electronic and/or mirror. Electronic rear-vision systems must operate whenever the vehicle is in motion under its own power.”
- “B.5.2 Challenge Class vehicles: The angle of the (driver’s) seat must not be greater than 27° . Drivers must demonstrate the ability to sit, road ready (helmet on, hatch closed), with their back flush against the seating elements measured in accordance with the provisions of Appendix B of the Technical Regulations.”
- “B.16.1 Seat belts are mandatory and must be fitted for the protection of each occupant. The minimum standard is that belts shall be a commercially manufactured lap-and-harness type automotive safety belt, installed and attached to provide adequate occupant restraint in the event of a collision or vehicle roll over. Anchorages must be designed and installed in accordance with sound engineering practice.
- “B.16.2 Challenge Class vehicles (with upright seats) may have three point belt”

- *“B.17 Protective Helmets: The driver shall, in a road ready condition (helmet on, hatch closed), demonstrate the ability to move his/her head freely within the area defined in Appendix A, without being restrained by, or making contact with, the roll bar.”*
- *“ Appendix A. All vehicles must be equipped with the first and second roll bars (as shown in the specifications below) to prevent direct damage to the driver and serious cockpit deformation in the Event of a collision or of a vehicle turning over.”*
“The first and second roll bars form the basic element of the rollover structure. These structures must be made of steel tubes or other material of sufficient strength to protect the occupant from a force of $4w$ (w =weight of vehicle) The structure must be bolted, welded or otherwise structurally incorporated to the vehicle according to sound engineering practice. For vehicles whose bodywork fulfils the function as the first and second roll bars, the installation of additional roll bars is not necessary.”
- *“Roll bars shall meet the following dimensional criteria:*
 - *The line extended from the top of the first roll bar to the top of the second roll bar must be above the driver’s helmet when he/she is seated normally in the vehicle.*
 - *The top of the first roll bar must be higher than the top of the steering device.*
 - *The first roll bar must cover the steering device with steered wheel(s) in the straight position ahead when the vehicle is viewed from the front.*
 - *The second roll bar must cover the driver’s shoulder when the vehicle is viewed from the front. In a case where the bodywork of the vehicle covers the driver’s shoulder, the second roll bar may cover only the driver’s head.*
 - *The second roll bar must have sufficient strength for lifting or towing with the driver on-board.”*

Nel 2013 si impone che:

- *“2.6 When seated in a road ready position, the driver’s eyes must be not less than 700 mm above the road.”*
- *“2.12 Occupants of Solar EVs must wear helmets that meet or exceed DOT or ISO standards for motorcycle helmets”*
- *“2.17 For Challenger and Cruiser Class Solar EVs, head space must comply with Section LK of the National Code of Practice for Light Vehicle Construction and Modification, as shown in the diagram in figure 3.18:*

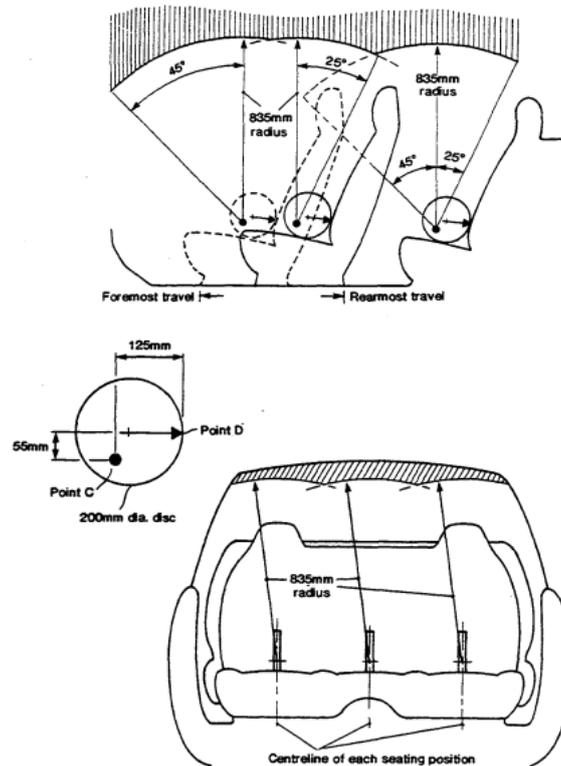


Figura 3.18: *Illustrazione della norma 2.17 del regolamento della WSC 2013.* [7]

- “2.26 For Challenger Class and Cruiser Class Solar EVs, each seat must have a head restraint. The distance r from the Seating Reference Point to the top of the head restraint must be not less than 800mm for front seats and not less than 750mm for rear seats (UNECE Regulations 17 and 25). For the purpose of the Event, the Seating Reference Point will be approximated as shown in the diagram below, and the top of the head restraint must be outside a radius $r = 800\text{mm}$ for front seats and outside a radius $r = 750\text{mm}$ for rear seats.”
- “2.27 For Challenger Class and Cruiser Class Solar EVs, each occupant’s heels must be below the lowest point on their seat base, and the angle between the shoulders, hips and knees must not be less than 90 degrees”
- “2.31 For Challenger Class and Cruiser Class Solar EVs, seatbelt anchorages must meet the intent of UNECE Regulation 16. i Section LK of the Australian National Code of Practice for Light Vehicle Construction and Modification gives examples of how this can be met” [7]

Come si può vedere, il regolamento non impone la presenza di un cupolino. Questo componente permette di ridurre la resistenza sull’auto nonostante abbia una superficie bagnata e una superficie frontale maggiori rispetto alla testa del pilota e al roll-bar, dal momento che questi, se non carenati, si comporterebbero come un corpo tozzo. In questo

paragrafo vediamo come deve essere la forma di questa appendice per ridurre al minimo la resistenza.

Sicuramente un abitacolo integrato nel corpo principale della vettura è una soluzione estremamente vantaggiosa, adottata dal MIT nel 1997 con la sua “Manta”, mostrata in figura 3.19. Quest’auto ha una superficie bagnata che è solo il 3% in più rispetto a una lastra piana con stessa superficie in pianta.



Figura 3.19: *MIT Manta GT 1997*. ^[10]

Per ridurre gli ingombri frontali, fino al 2007, spesso il pilota era steso all’interno dell’auto. Ma, le norme del 2011 e del 2013 del regolamento della WSC, vincolano in maniera ben precisa la posizione del pilota e la sua visibilità, imponendo anche cinture di sicurezza a tre punti di attacco. Pertanto, per ovvie ragioni di sicurezza, questo non può più giacere sdraiato all’interno della vettura. Inoltre, le specifiche per il roll-bar protettivi, la posizione del pilota i cui occhi devono essere posizionati ad almeno 700 mm da terra (si veda norma 2.6 , 2013), rendono la soluzione con cupolino esterno (*bubble canopy*) meno penalizzante rispetto a quella con cupolino integrato al corpo principale il cui ingombro frontale sarebbe nettamente maggiore.

La presenza di questa appendice può creare l’insorgere di un gradiente di pressione sfavorevole con conseguente transizione del flusso. Per prevenire la separazione e minimizzare la regione caratterizzata da un gradiente di pressione sfavorevole, occorre rendere il corpo il più aerodinamico e stretto possibile dal punto di vista frontale, in modo da permettere al flusso che fluisce lungo i lati del cupolino di essere laminare. Un altro modo per prevenire la separazione è l’uso di vortex generator, posizionati dopo la zona di massimo spessore del cupolino, che energizzano lo strato limite.

Alla resistenza dovuta alla presenza del cupolino si aggiunge la resistenza di interferenza causata dal flusso attorno ad esso che interferisce col flusso sul corpo e dalle giunzioni tra cupolino e corpo principale. Queste ultime in particolare per non incorrere a separazione non devono essere brusche. Un’auto come la “Manta” con abitacolo integrato elimina ogni

possibilità di separazione dietro di esso e elimina la resistenza di interferenza. Più avanti vedremo come ridurre la resistenza causata da queste giunzioni in base alla posizione del cupolino rispetto al corpo principale.

Vediamo ora quali sono le geometrie che la letteratura ci suggerisce per minimizzare la resistenza del cupolino, tenendo presente che, queste, debbano poi fronteggiarsi con il regolamento e con la perdita di superficie pannellabile.

Per quanto riguarda la vista laterale, come mostrato nel grafico in figura 3.20, prendendo in considerazione un cupolino privo di separazione, massimizzando il rapporto L/h (lunghezza/altezza) si riduce il coefficiente di resistenza (basato sull'area frontale) fino ad un minimo in corrispondenza di un rapporto L/h pari a 6. Dopodiché il coefficiente di resistenza torna ad aumentare, poiché aumenta la superficie bagnata. È chiaro che occorre fare un compromesso tra la lunghezza che il cupolino deve avere per ridurre la resistenza e la riduzione della superficie disponibile per le celle solari.

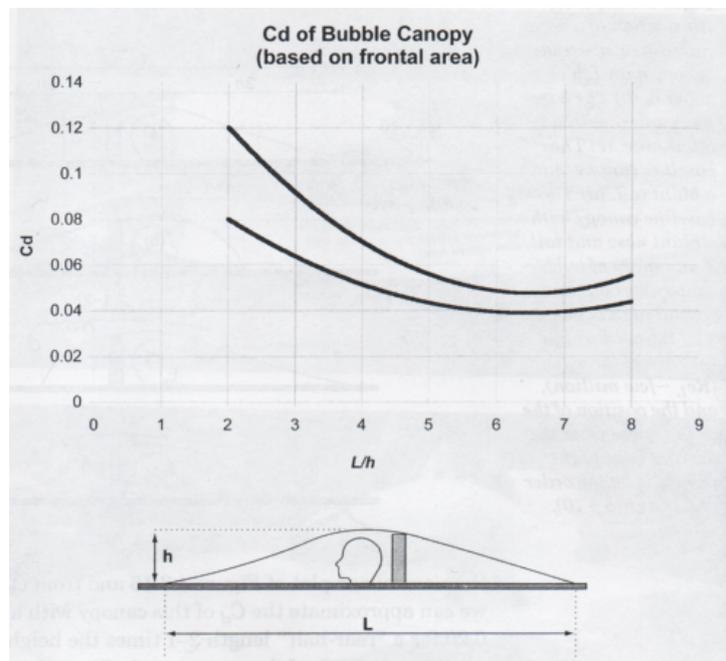


Figura 3.20: Andamento del coefficiente di resistenza, basato sulla superficie frontale, in funzione del rapporto L/h . [2]

A pari rapporto L/h , quale forma fornisce la minore resistenza? La risposta la troviamo in figura 3.21, in cui sono esposti i valori del coefficiente di resistenza, basato sull'area frontale, di diverse forme di cupolini, privi di separazione e con un rapporto L/h pari a 6. Vediamo, quindi, che la soluzione migliore è la prima. Questa, nonostante l'incremento

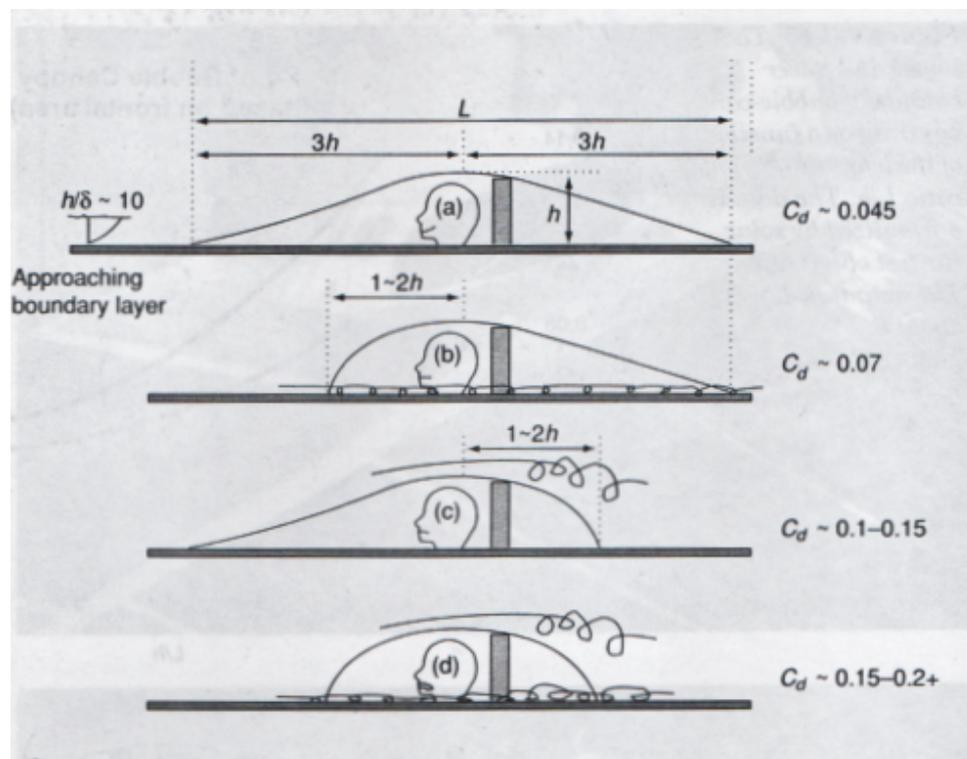


Figura 3.21: *Andamento del coefficiente di resistenza, basato sulla superficie frontale, in funzione del rapporto L/h .* [2]

di superficie bagnata e una maggiore esposizione ai venti laterali, permette di ridurre la resistenza dal momento che questo cupolino permette un'estensione del flusso laminare e una riduzione della resistenza di interferenza. Poiché questo tipo di cupolino, per via delle dimensioni, sottrae già abbastanza area alle celle solari, per evitare che l'ombra ad esso associata riduca la potenza fornita dalle celle installate attorno ad esso, questo dovrà essere totalmente trasparente, ad eccezione della parte superiore per la protezione del pilota. La vista in pianta di questa soluzione è un profilo alare.

L'area frontale, invece, come già detto, deve essere ridotta il più possibile così come il raggio di raccordo tra cupolino e corpo principale. Per rispettare però le dimensioni del roll-bar (Appendice A, 2011), per permettere una opportuna visuale frontale e periferica del pilota (norma B.3.1, 2011), per avere lo spazio per la testa del pilota imposto da regolamento (norma 2.7, 2013), tenendo presente che questo debba per sicurezza e regolamento indossare il casco (norma 2.12, 2013) e le cui parti del corpo rispettare i vincoli imposti (norma 2.27, 2013), la riduzione della superficie frontale così come quella bagnata per fini aerodinamici viene ad essere un'esigenza difficile da soddisfare.

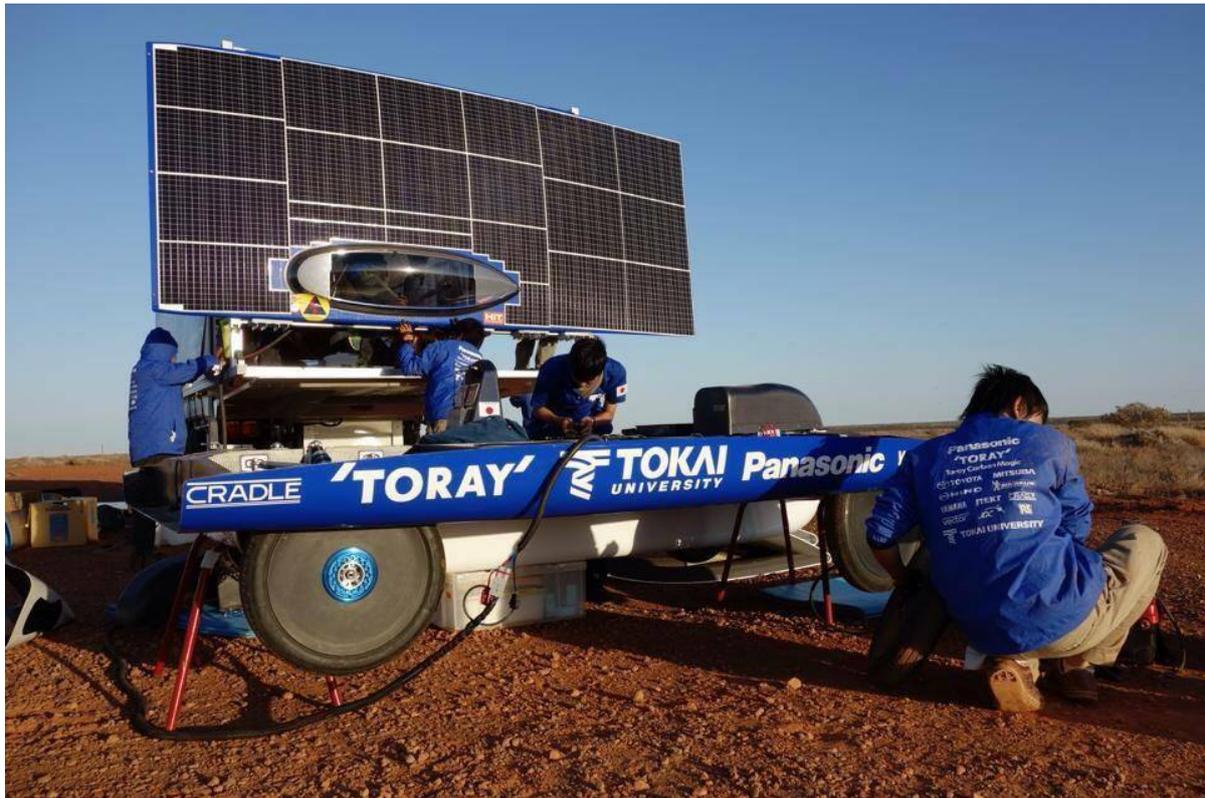


Figura 3.22: Vista dall'alto della vettura '13 Tokai Challenger che evidenzia la vista in pianta a forma di profilo alare del cupolino. [9]

3.4.5 Carenature delle ruote

Carenare le ruote, così come per l'abitacolo del pilota, non è obbligatorio, ma, come vedremo qui di seguito, ciò permette di ridurre la resistenza all'avanzamento del veicolo. Anzitutto, come la testa del pilota e il roll-bar si comportano come un corpo tozzo, così accade per le ruote esposte al flusso. Infatti, anche se si progettasse accuratamente la forma e la superficie delle ruote/pneumatici, non è possibile mantenere il flusso attaccato ad esse, se non attraverso le carenature.

Inoltre, la porzione di pneumatico a contatto con il suolo ha velocità nulla, mentre l'estremità superiore di questo ha una velocità che è doppia di quella posseduta dal veicolo. Dal momento che la resistenza è proporzionale al quadrato della velocità, ecco che è estremamente conveniente ridurre la porzione di ruota esposta al flusso. Prima di analizzare come deve essere la geometria delle carenature per avere una buona aerodinamica, vediamo come ridurre il contributo alla resistenza fornito dalla porzione di ruote esposte.

Se lo pneumatico ha un raggio R e l'auto sta viaggiando a una velocità pari a V , allora la velocità media dello pneumatico V_{tire} a una distanza h dal suolo è pari a:

$$V_{tire} = V\left(\frac{h}{2R}\right) \quad (3.5)$$

Pertanto, aumentando il raggio R dello pneumatico, si ha una riduzione della resistenza dovuta alla riduzione della velocità media della porzione di pneumatico esposto. Se lo pneumatico ha poi una larghezza pari a b , allora riducendo l'area frontale data dal prodotto hb , si ha un decremento della resistenza in maniera diretta.

È chiaro che anche le carenature hanno una loro superficie frontale e la loro velocità è pari alla velocità dell'auto, pertanto, l'ideale sarebbe avere le ruote quanto più possibile all'interno del corpo vettura.

Nel progetto delle carene, come per gli altri due componenti principali dell'auto, per minimizzare la resistenza aerodinamica si dovrà minimizzare la superficie frontale e la superficie bagnata. Inoltre, a causa dell'apertura nel ventre della vettura e nella carena stessa per l'alloggiamento delle ruote, avremo come obiettivo in più la riduzione della resistenza di ventilazione che ne deriva.

Le carene possono essere fisse, mobili, parziali, complete. Per soddisfare tutti i requisiti sopracitati la carena dovrà essere il più aderente possibile allo pneumatico. Pertanto, poiché la ruota deve poter ruotare e per regolamento *“the Solar EV must be able to make a U-turn in either direction within a 16m lane, kerb to kerb”* [7], sembrerebbe che la tipologia di carenature ottimale sia quella mobile. Ma, poiché questa deve essere solidale alla ruota non solo durante le rotazioni ma anche nell'assorbire le asperità del terreno sottostante, essa stesa deve essere ammortizzata. Questa soluzione, per le problematiche costruttive che ne derivano, non viene quasi mai utilizzata, compreso dai team vincenti. Inoltre le carenature mobili possono aumentare la resistenza di ventilazione per via della penetrazione di aria tra carenatura e corpo principale. Onda Solare, per Emilia II ha utilizzato un compromesso, progettando una carena girevole ma non ammortizzata ma che permette alla ruota di muoversi verticalmente in caso di irregolarità del terreno.

Un'altra soluzione implementata dai progettisti sono le *“taco fairings”*, mostrate in figura 3.23, le quali permettono di ridurre la complessità meccanica e di non dover ruotare assieme alle ruote. Al MIT sono state testate diverse tipologie di carenature in galleria del

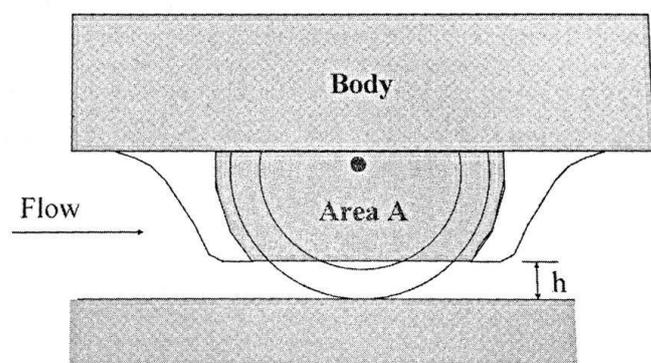


Figura 3.23: *Taco fairings*. [1]

vento tra cui parziali, complete e taco fairings e anche una configurazione senza carena-

ture, i cui risultati sono illustrati in [2]. Analizziamo ora la geometria delle carenature. Come per il cupolino, la miglior forma, da una vista in pianta, è un profilo alare e nello sviluppo di tale forma si cercherà di massimizzare il rapporto L/D (lunghezza/diametro massimo). Il diametro delle carenature anteriori sarà quindi scelto considerando l'angolo di sterzata massimo mentre, per quelle posteriori, in base allo spessore delle ruote e, in alcuni casi, anche in base a parte dell'abitacolo che esse possono eventualmente contenere. La lunghezza sarà scelta di conseguenza cercando di massimizzare il rapporto L/D , ma dovrà tenere conto della resistenza di ventilazione che ne consegue, della lunghezza dell'auto e della distanza tra carenature anteriori e posteriori (nel caso di veicolo a quattro ruote e con carenatura non continua). Inoltre, poiché la carena posteriore vede un flusso de-energizzato, la carena anteriore dovrà avere una lunga "coda" per minimizzare la decelerazione dello strato limite.

Per quel che concerne l'altezza, questa verrà scelta sulla base della massima altezza dal suolo del veicolo e dall'escursione delle sospensioni. Dal momento che le carene devono poi interfacciarsi col corpo principale della vettura, spesso si sceglie, sempre considerando la vista in pianta, un'ellisse, invece che un profilo alare, poiché tale forma, a scapito della resistenza, rende l'assemblaggio meno difficoltoso. Questa soluzione è visibile in figura 3.24. Vi è inoltre una tabella che mostra come la drag area risulti maggiore per una forma in pianta ellittica piuttosto che a forma di profilo alare. L'accoppiamento con il

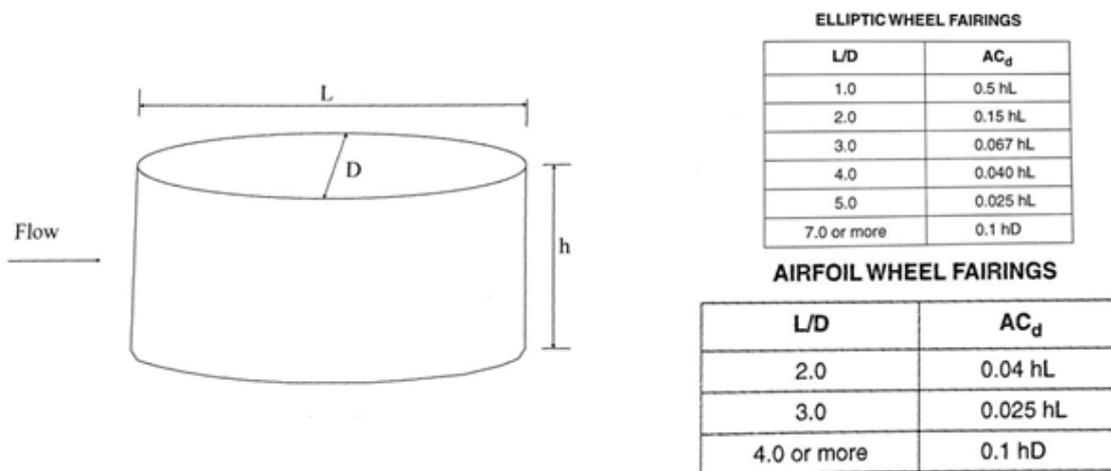


Figura 3.24: Carena con vista in pianta ellittica e tabella con relativa drag area a confronto con quella per carena con vista in pianta a forma di profilo alare. ^[1]

corpo principale e le giunzioni ottimali verranno approfondite nel prossimo paragrafo. Per il momento, illustriamo in figura 3.25 le geometrie "ideali" per carene parziali e per carene complete, che anticipa come devono essere le giunzioni al bordo d'attacco ("*generous sweep to avoid leading-edge separation*") e al bordo d'uscita delle carene ("*generous sweep to avoid trailing-edge separation*").

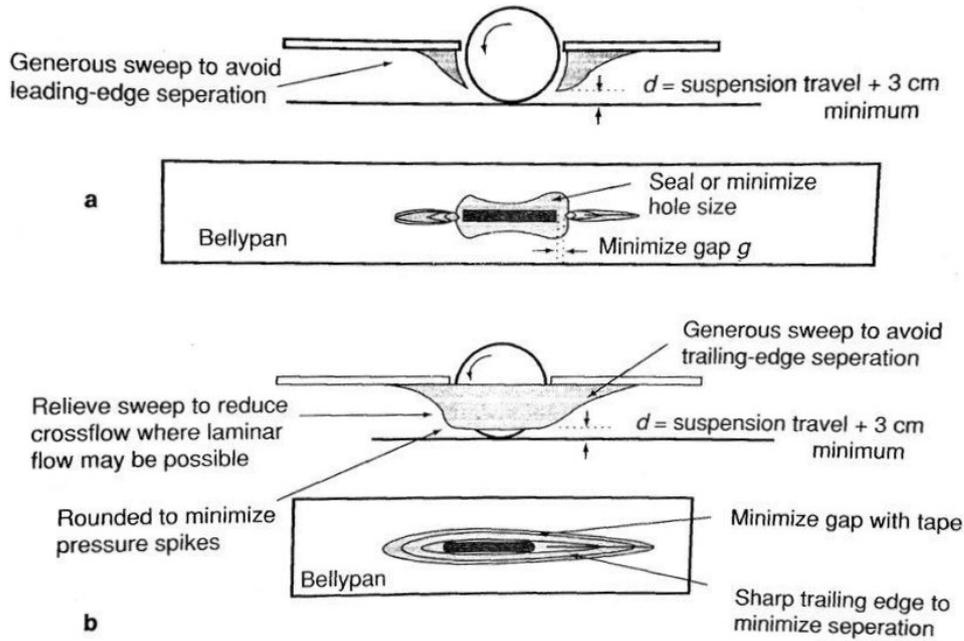


Figura 3.25: *Illustrazione delle geometrie ideali per carene parziali e complete.* [2]

In figura 3.25 è possibile vedere due accorgimenti per ridurre la resistenza di ventilazione, il cui maggior contributo è dato dal vano per l'alloggiamento ruote. Le ruote e una porzione di sospensioni richiedono infatti un'apertura nella parte inferiore del veicolo. La più semplice è un ritaglio rettangolare tale da permettere tutti gli angoli di sterzata delle ruote anteriori (valori tipici sono 20° - 25°). Ma, per ridurre le dimensioni dell'apertura e, quindi, controllare la ventilazione, questa può essere fatta a forma di clessidra, come mostrato in figura 3.25. Se poi si chiudono e/o minimizzano queste aperture la resistenza di ventilazione si riduce ulteriormente e, in più, si evita l'entrata di acqua e detriti stradali che potrebbero danneggiare la componentistica interna.

Un altro metodo per ridurla è inclinare verso l'alto di circa 10° il bordo inferiore della carena, come mostrato in figura 3.26, in modo da ridurre la quantità di aria aspirata dalle carene posteriori. Infine, come già detto, occorre avere carene aderenti allo pneumatico.

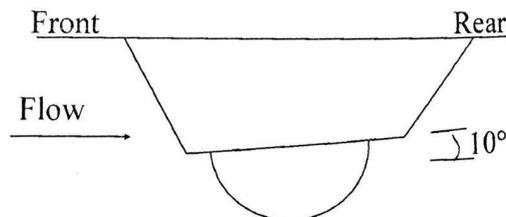


Figura 3.26: *Inclinazione del bordo inferiore della carena al fine di ridurre la resistenza di ventilazione.* [1]

Ciò fornisce un doppio vantaggio: minimizzando il flusso d'aria che fluisce attraverso le carene si mantiene lo pneumatico ad un'alta temperatura. Ciò diminuisce la perdita di isteresi della gomma e quindi la dissipazione dell'energia, riducendo così la resistenza al rotolamento.



Figura 3.27: Carene Nuna 6. Si noti come esse si conformino alla forma ideale per carene totali illustrate in figura 3.25 [6]

3.4.6 Configurazione del telaio: tre ruote vs quattro ruote

Diversi sono i modi per disporre tre o quattro ruote di un veicolo, alcuni di essi visibili in figura 3.28. Quale di queste fornisce la minor resistenza? Ovviamente non vi può

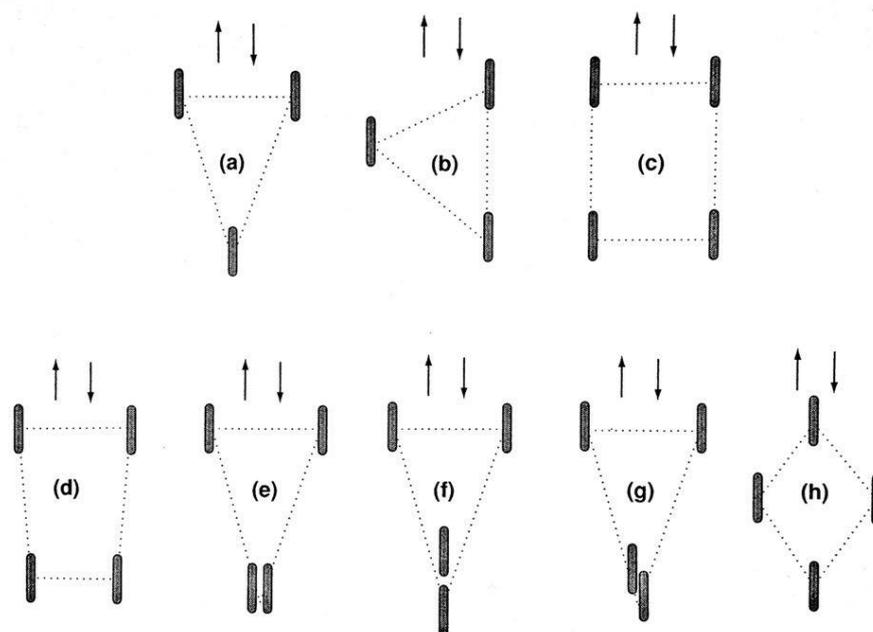


Figura 3.28: *Diverse configurazioni del telaio per tre e quattro ruote.* [2]

essere una risposta universale dal momento che l'interazione tra corpo principale e carene influenza la resistenza totale del veicolo. Possiamo però fare alcune ipotesi. Ad esempio, nel caso in cui si ha un'auto il cui ventre è piatto, minore è il numero di carene, minore sarà la resistenza. Ciò ci porta quindi a considerare le configurazioni a,b,e,f e g della figura 3.28. Tra queste la a è probabilmente più vantaggiosa rispetto a b in quanto un paio di appendici una dietro l'altra hanno una resistenza leggermente maggiore rispetto ad un paio individuali. La resistenza associata alle configurazioni e,f, e dipende dagli spazi lasciati tra pneumatici e carene. Le disposizioni f e g possono avere una resistenza maggiore rispetto ad a se la lunghezza delle carene è maggiore rispetto al caso con singola ruota e se, con l'adozione delle configurazioni f e g, comporta un aumento del gap tra pneumatico e carene. Il caso e, invece, quasi sicuramente ha una resistenza maggiore rispetto ad alle suddette quattro, in quanto la larghezza della carena per le ruote anteriori è nettamente maggiore, così come il gap tra pneumatico e carene.

La configurazione a diamante,h, ha probabilmente una resistenza associata simile a quella della configurazione classica c, ma aumenta la complessità del sistema dello sterzo.

A supporto delle configurazioni a tre ruote vi sono poi alcuni test sperimentati dai team *Nissan Sunfavor* e *Honda Motor Company* riportati in figura 3.29. In essa è riportato il valore della *drag-area* della configurazione a tre ruote e della sua controparte a quattro ruote. Infine, la configurazione a tre ruote è preferibile in quanto ad essa è associata un

Researcher	Basic Body Shape	$C_d A$, Three-wheeler	$C_d A$, Four-wheeler
1993 Nissan R&D [Ref. Asano]	Biel style but with faired-in bubble canopy and long rear fairing, model	0.130 m ²	0.174m ²
1993, 1996 Honda R&D [Ref. Kitagawa]	GM Sunrayer shape. Three-wheeler test by 1993 team, four-wheeler test by 1996 team, models	0.107 m ²	0.126m ²
1993 Honda team [Ref. Honda, 1997]	Shape similar to 1996 Honda Dream but with three wheels with non-optimal wheel fairings, model	0.146 m ²	—
1996 Honda team	1996 Honda Dream shape, model	"a lot worse than four-wheeler." [Ref. Higashida]	0.108m ²

Figura 3.29: Drag area della configurazione a tre ruote a confronto con la sua controparte a quattro ruote. ^[2]

peso minore. Tale peso non è affatto trascurabile in quanto non si tratta solo di una ruota in meno ma anche del sistema meccanico che la circonda.

Purtroppo però, essa non è più adottabile in quanto il regolamento del 2013, per stabilità e sicurezza, impone l'uso della configurazione a quattro ruote:

- "New Challenger Class Solar EVs must have four wheels".
- "2.7 A Solar EV must have two front wheels and two rear wheels, arranged so that the tyre contact points are symmetrical about the longitudinal centreline".
- "2.8 The distance between the front tyre centres and the distance between the rear tyre centres must both be not less than half the maximum width of the Solar EV".^[7]

Dal regolamento si vede inoltre che le uniche configurazioni ammissibili sono la c e d della figura 3.28.

3.5 Accoppiamento ottimale delle appendici al corpo principale e riduzione della resistenza di interferenza

Finora abbiamo visto come è possibile ridurre la resistenza di ogni singolo componente della vettura. La resistenza totale dell'auto, però, sarà maggiore della somma delle resistenze delle varie parti a causa della resistenza di interferenza. Questa è dovuta principalmente alle giunzioni e elementi di collegamento tra essi, i quali possono innescare la separazione del flusso.

Un primo modo per minimizzarla è minimizzare il numero di giunzioni. Vediamo quindi, in che modo ciò può essere fatto, prima per il cupolino e successivamente per le carenature delle ruote aiutandoci con la figura 3.30 che evidenzia dove può separare il flusso e perché. Come possiamo vedere in figura 3.30, il gradiente di pressione favorevole viene

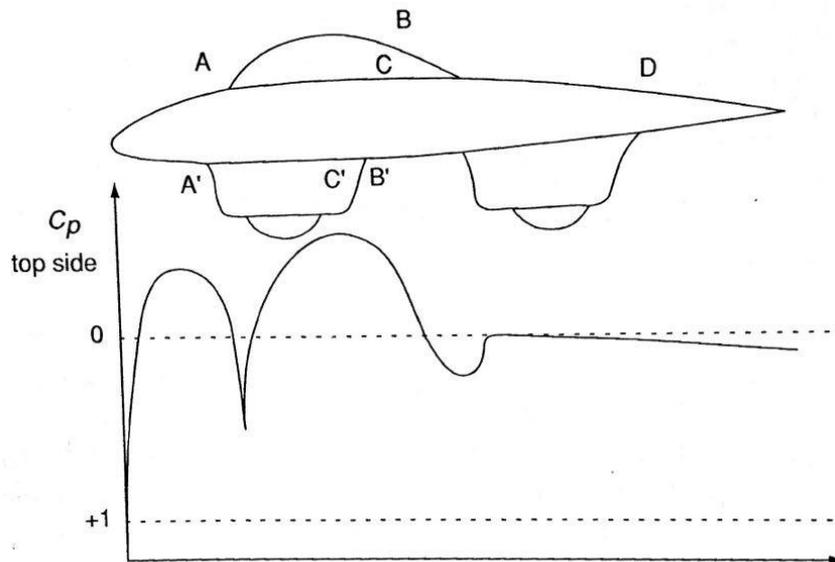


Figura 3.30: *Andamento del coefficiente di pressione lungo il corpo dell'auto.* [2]

frenato dalla presenza del cupolino e delle carenature delle ruote. Si nota infatti che, il coefficiente di pressione, da valori negativi, inizia a crescere fino a raggiungere un massimo positivo proprio in corrispondenza della radice del cupolino (A). Se la giunzione qui è brusca, si può avere separazione del flusso. In A' il meccanismo è simile. Il coefficiente di pressione poi decresce lungo la parte superiore del cupolino per poi raggiungere un altro picco positivo in corrispondenza della parte posteriore di questo. Qui (B) si può avere separazione se la parte posteriore non è rastremata gradualmente. Lo stesso vale in B' e D. Anche in C e C' la separazione può innescarsi a causa delle giunzioni del cupolino e/o carene con il corpo principale.

3.5.1 Accoppiamento del cupolino

Per ridurre la resistenza di interferenza causata dalle giunzioni attorno al cupolino, questo dovrebbe essere integrato all'interno del corpo. Come abbiamo visto però nel paragrafo 3.4.4, a causa dei vincoli imposti dal regolamento questa soluzione risulterebbe svantaggiosa. Pertanto, per ridurre il numero di giunzioni di un cupolino esterno al corpo, si può pensare di posizionarlo in modo tale che i suoi bordi siano in linea con il corpo principale. Vi sono tre modi per renderlo possibile.

Il primo è allineare il bordo anteriore del cupolino con il corpo principale, il cui esempio

ci è dato dalla vettura Honda Dream 1996, vincitrice della WSC di quell'anno, mostrata in figura 3.31 . La seconda soluzione, adottata dal team australiano con la loro Sunswift



Figura 3.31: *Honda Dream 1996. L'allineamento del bordo d'attacco del cupolino con il corpo principale elimina le giunzioni anteriori e, quindi, la separazione del flusso.* ^[11]

IV e visibile in figura 3.32, consiste nell'allineare il bordo d'uscita del cupolino con quello del corpo principale. Questa soluzione però, non è più utilizzabile visto le nuove direttive



Figura 3.32: *Sunswift IV, sesta classificata alla WSC 2011.* ^[12]

sulla visuale del pilota imposte dal regolamento 2013 :

“2.18 The driver must have clear forwards vision. For Challenger and Cruiser Class Solar EVs, the driver must be able to see the following points:

- *ground height, 11m in front of the Solar EV (Australian Design Rule ADR 08/..)*
- *every point between 0.70 m below eye level and 0.70 m above eye level at a distance of 4.0 m from the driver's eyes, at every forward angle”.*^[7]

Il terzo metodo consiste nell'ingegnosa disposizione laterale del cupolino, adottata dai vincitori consolidati della WSC Nuon e Tokai, con l'introduzione dell'obbligo delle quattro

ruote. Molti sono i vantaggi di questa configurazione asimmetrica. L'abitacolo del pilota



Figura 3.33: *Nuna 7, vincitrice WSC 2013.* [6]



Figura 3.34: *'13Tokai Challenger, seconda classificata alla WSC 2013.* [13]

posizionato tra la ruota anteriore e posteriore permette di avere un numero di appendici minori sotto l'ala. Ciò determina anzitutto una riduzione della superficie bagnata e in più permette di avere carenature delle ruote continue (si veda Nuna 7 in figura 3.33). Infatti, con un cupolino posizionato al centro, si hanno 5 elementi sotto l'ala e, per permettere al flusso di fluire, occorre evitare la compattezza dei componenti. Pertanto o si aumenta la distanza relativa tra le ruote, o si realizzano carene discontinue. Poiché le dimensioni sono limitate da regolamento si opta per la seconda opzione.

Inoltre, con la disposizione laterale del cupolino, è possibile rendere la superficie superiore del corpo principale più piatta, permettendo alle celle solari di produrre più energia rispetto a una superficie più curva. Infine, l'ombra su queste ultime è ridotta.

Non mancano però gli svantaggi. Infatti questa soluzione, come vedremo più avanti, comporta una sfida in termini di stabilità. Occorre infatti fare in modo che il centro di gravità sia al centro, posizionando opportunamente l'elettronica e, in generale la componentistica, sul lato opposto all'abitacolo.

Gli altri team che nel 2013 hanno adottato una configurazione asimmetrica si sono ribaltati nel corso della gara. Oltretutto, con un cupolino laterale, il pilota si trova ad avere la ruota anteriore tra le gambe, il che, vista la presenza abbastanza frequente sul percorso australiano di canguri morti, compromette la sicurezza dello stesso. Vediamo ora come debbano essere le giunzioni tra cupolino e ala principale per ridurre la separazione attorno ad esse.

Se, in vista laterale, il bordo anteriore del cupolino non è allineato con il bordo dell'ala principale, come detto in precedenza, il gradiente di pressione avverso può innescare una separazione prematura. In particolare, se il bordo d'attacco del cupolino è perpendicolare al corpo principale, come la tipologia b in figura 3.21, si generano vortici che causano un incremento del coefficiente di resistenza del 35%. Se invece il retro, o sia la parte anteriore che posteriore del cupolino, sono montati perpendicolarmente al corpo, come gli esempi c e d della figura 3.21, si ha un ulteriore incremento.

I test effettuati in galleria del vento dalla Nissan per la Sunfavor 1993 mostrano che, realizzando una giunzione concava tra cupolino e corpo principale, come il cupolino a della figura 3.21, si ha una resistenza minore, grazie all'accelerazione graduale del flusso che questo tipo di giunzioni permettono.

La letteratura suggerisce, da una vista laterale, di mantenere l'angolo formato dalla giunzione concava tra cupolino con il corpo principale entro un massimo di 30° . Inoltre, se si effettuano analisi CFD, il coefficiente di pressione in corrispondenza della radice della giunzione anteriore non deve essere maggiore di $+0.6$.

Anche la posizione del cupolino sul corpo principale influisce sulla resistenza di interferenza. Infatti, più è lontano il cupolino dal bordo d'attacco del corpo principale, più lo strato limite del corpo principale è spesso e de-energizzato. Pertanto, quando questo strato limite interagisce con quello che si sta sviluppando sul cupolino in corrispondenza della giunzione, lo strato limite che deriva dalla combinazione dei due potrebbe non avere abbastanza energia per rimanere attaccato. Questo effetto è più marcato nelle "short car", in cui il cupolino è montato al centro dell'ala, dove lo strato limite è più spesso. Per ridurlo, molti team posizionano il loro cupolino nella regione inclinata del muso.

3.5.2 Geometria e accoppiamento del cupolino non ottimale: un esempio di studio

Vediamo ora un esempio pratico che dimostri quanto finora affermato. Prendiamo in considerazione i calcoli effettuati con ANSYS Fluent dalla *Delhi Technological University*,

New Delhi, su un cupolino la cui forma è molto simile a quella del cupolino d mostrato in figura 3.21, ovvero quello a cui è soociato il maggiore coefficiente di resistenza. I calcoli sono stati effettuati con:

- Velocità del flusso= 30 m/s
- Pressione= 101325 Pa
- Densità= 1.2250 kg/m^2
- Temperatura 288.16 K
- Viscosità cinematica= 1.4607 $e^{-5}m^2/s$

Ciò che ci aspettiamo da questa forma è un elevato coefficiente di pressione in corrispondenza del bordo d'attacco del cupolino. La figura 3.35 mostra l'andamento delle pressioni (relative) attorno a questo tipo di cupolino. Ora, da letteratura abbiamo detto che il

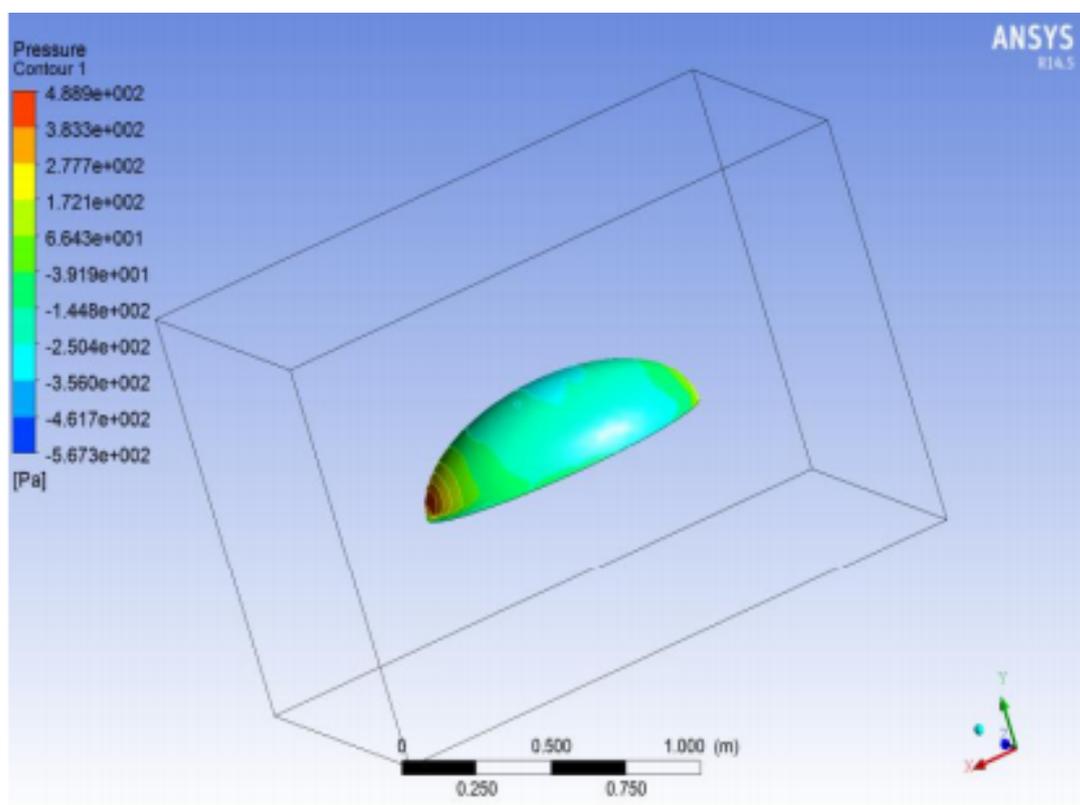


Figura 3.35: *Distribuzione di pressione lungo un cupolino dalla forma non ideale. Le pressioni riportate sono pressioni relative.* ^[14]

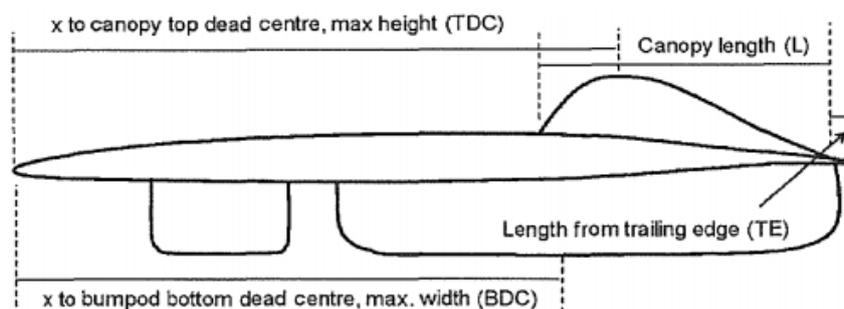
coefficiente di pressione in corrispondenza del bordo d'attacco del cupolino e, quindi, della radice della giunzione anteriore non deve essere maggiore di +0.6. Calcoliamo quanto vale in questo caso:

$$C_P = \frac{P(x) - P_\infty}{\frac{1}{2}V_\infty^2\rho} = 0.88$$

Come ci aspettavamo da questa geometria, il coefficiente di pressione è estremamente alto, in particolare maggiore di quello suggerito da letteratura. Ciò è dovuto all'accoppiamento perpendicolare del cupolino al corpo principale e alla mancata presenza di una giunzione concava tra essi.

3.5.3 Variazione del C_D e C_L con la posizione del cupolino: un esempio di studio

In questa sezione, verrà illustrato come, per una data geometria, la posizione del cupolino sia estremamente influente sul valore del coefficiente di resistenza e portanza, prendendo come esempio lo studio effettuato dal team australiano *University of New South Wales*, sulla loro Sunswift IV. I parametri geometrici e i correlati valori dei suddetti coefficienti sono visibili in figura 3.36, riferiti a una velocità di crociera di 25 m/s e 35 m/s. Da essa emerge che, posizionando il cupolino troppo indietro, si ha un aumento di



Case (TDC-L)	25 ms ⁻¹			35 ms ⁻¹		
	C_D	C_L	L/D	C_D	C_L	L/D
2650-1800	0.116	0.121	1.04	0.108	0.118	1.09
2650-2000	0.116	0.119	1.02	0.108	0.133	1.23
2900-1400	0.117	0.126	1.08	0.110	0.122	1.12
3150-1300	0.117	0.085	0.72	0.109	0.081	0.74

Figura 3.36: *In alto: parametri per lo studio della posizione del cupolino. In basso: Coefficienti di resistenza e portanza e efficienza per una data configurazione del cupolino.*^[15]

resistenza ma, al contempo, una riduzione del coefficiente di portanza, in quanto si sposta la zona di bassa pressione del cupolino dal punto in cui esso si combina con il picco di aspirazione del corpo principale.

3.5.4 Accoppiamento delle carene

Analizziamo ora come accoppiare le carene al corpo principale. Per ridurre la resistenza di interferenza, anzitutto, guardando l'auto da una vista frontale, le carene devono essere montate perpendicolarmente al corpo principale. Aumentando l'angolo di inclinazione oltre i 10° rispetto alla condizione di perpendicolarità, si ha un incremento di resistenza del 2.5% per ogni grado di inclinazione. Ma, questo accoppiamento, riduce la resistenza se il ventre dell'auto è piatto. Infatti, quando la carena viene montata su una superficie tridimensionale curva, come il ventre di alcune auto, nella parte posteriore di

questa, si generano dei vortici che portano ad un aumento della resistenza. Inoltre, poiché la carena viene posizionata nella zona ascendente della superficie curva, essa si trova effettivamente a un angolo d'attacco. La Northern Territory University, nel 1996, studiò che, rendendo il ventre dell'auto più piatto, si riduceva la generazione di questi vortici e che, montando l'appendice perpendicolarmente al corpo, si riduce la resistenza di interferenza. Un ulteriore vantaggio di avere il ventre dell'auto piatto è che questo permette di avere una distribuzione di pressione nella zona inferiore del corpo tale da ridurre la generazione di portanza in caso di vento laterale.

Come dimostra l'analisi effettuata da Maughmer, è possibile ottenere un ulteriore decremento della resistenza con dei raggi di raccordo in negativo, "*fillet*", lungo i bordi laterali dell'appendice, visibili in figura 3.37. Dallo studio emerge che il fillet ottimale è pari al

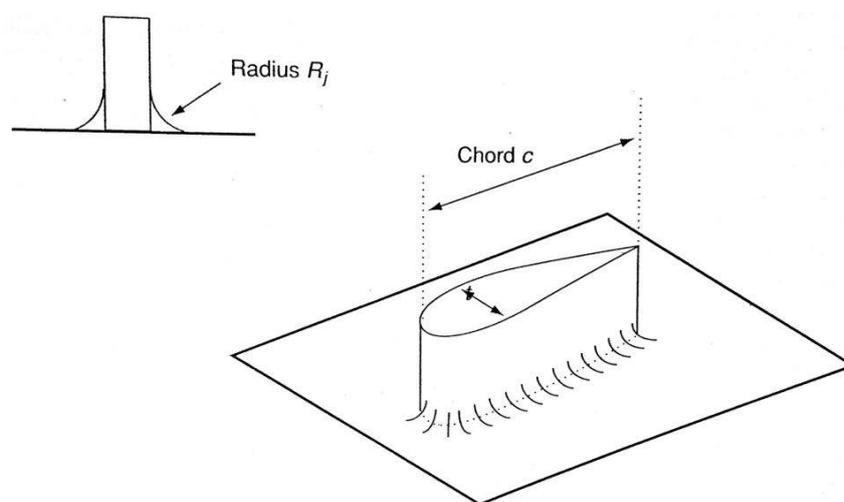


Figura 3.37: *Fillet di raggio R_f lungo i bordi laterali dell'appendice.* [2]

10% della corda dell'appendice.

Se la giunzione al leading edge dell'appendice è uno spigolo vivo, quando il flusso impatta su essa, il gradiente di pressione avverso al bordo d'attacco della carena porta alla separazione del flusso e alla formazione di vortici denominati "vortici a ferro di cavallo", causando un incremento della resistenza di forma. Devenport, per comprendere come eliminare questo tipo di vortici, conduce una serie di esperimenti su carene la cui giunzione al leading-edge è uno spigolo vivo e su altre in cui al leading edge della giunzione vi sono invece dei *fillet*, oltre che sui bordi laterali di essa. Con sorpresa queste ultime generano vortici di dimensioni maggiori. Conducendo altri test, scopre che per eliminare questo tipo di vortici e la separazione del flusso, guardando le carene da una vista laterale, occorre avere un fillet al leading edge con inclinazione di 63° e, ancor meglio, se questo è addolcito.

Una volta eliminata la separazione al bordo d'attacco, questa può verificarsi al bordo d'uscita se, lo strato limite de-energizzato, non riesce ad avanzare verso la parte poste-

riore della carena in cui vi è un gradiente di pressione avverso. Ciò può essere evitato estendendo il fillet del bordo d'uscita a circa una volta la lunghezza della corda, come suggeriscono gli studi effettuati da Hoerner, o, se in vista la laterale la carena è rettangolare, estendendo il fillet a circa due volte la lunghezza della carena, come testato dal team Honda nel 1996 o, infine prolungandolo solo a circa il 50% della corda, come mostrano i test effettuati dal MIT. In ogni caso, è bene rispettare quanto suggerito in figura 3.25. Inoltre, per ridurre la resistenza di interferenza, come per il cupolino, si può dimezzare il numero di giunzioni di una carenatura se un lato di essa è allineato con il bordo laterale del corpo principale.

3.5.5 Accoppiamento relativo delle parti: un esempio di studio

Altrettanto importante è l'accoppiamento relativo delle parti. Per vedere come la disposizione relativa tra cupolino e carene influenzi il coefficiente di resistenza e portanza, prendiamo in considerazione un altro studio effettuato dal team australiano sulla loro Sunswift IV. In figura 3.38 troviamo i parametri utilizzati per ottimizzare la configurazione dell'auto, mentre in figura 3.39 sono visibili i valori del coefficiente di resistenza e portanza in funzione dei suddetti parametri. Dalla figura 3.39 vediamo che, più le carene sono

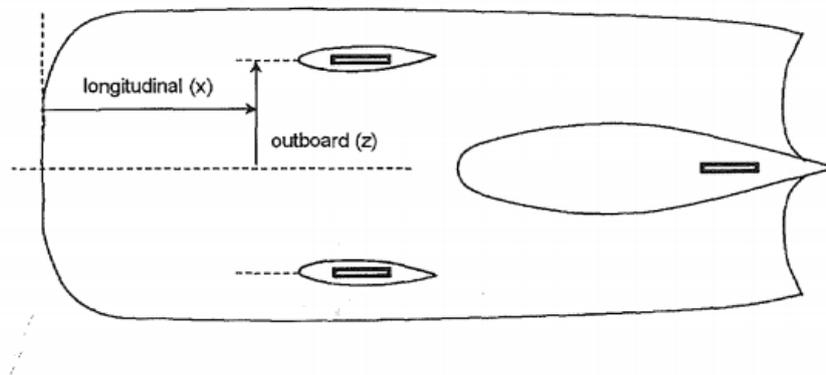


Figura 3.38: *Parametri che intervengono nel posizionamento ottimale delle carene.*^[15]

posizionate lontane dal cupolino, più il coefficiente di resistenza è basso. Al contrario, più queste sono montate in prossimità del cupolino, più il coefficiente di resistenza aumenta, in quanto l'accelerazione del flusso che scorre tra cupolino e carene determina un gradiente di velocità più forte. La configurazione con minimo coefficiente di resistenza, comunque, non è quella che necessariamente ci fornisce il minimo della resistenza. Occorre infatti tenere in considerazione anche la portanza e la resistenza indotta associata. Ad un posizionamento delle carene per $x = 650$ mm, la portanza è pressoché neutrale, mentre per $x = 150$ mm l'auto presenta un maggior quantitativo di deportanza. Ciò è dovuto alle carene che accelerano il flusso che si trova in corrispondenza del suolo e al campo di pressioni attorno

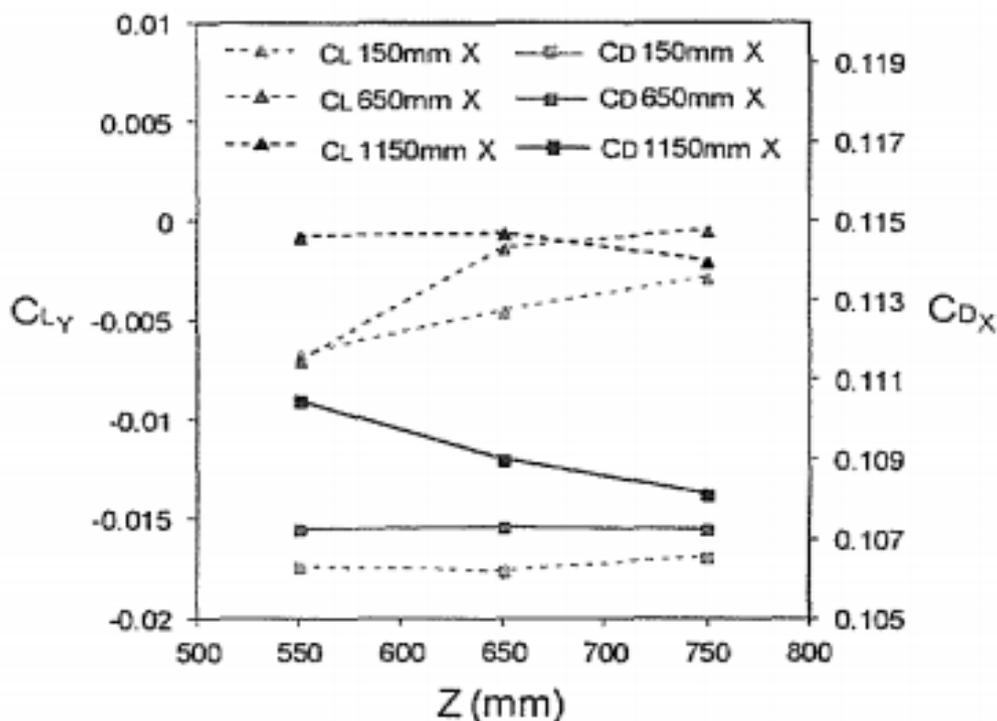


Figura 3.39: Coefficiente di portanza e resistenza in funzione della posizione delle carene ad una velocità di 35 m/s. ^[15]

al cupolino. Infine, il posizionamento delle carene in corrispondenza dei bordi del corpo principale, abbiamo detto che può ridurre la resistenza di interferenza in quanto riduce in numero di giunzioni. Ciò però può avere effetti negativi in caso di venti trasversali. Infatti, in tal caso, il flusso potrebbe migrare sulla parte superiore dell'auto causando una resistenza di interferenza addizionale. Quindi, è preferibile avere carene posizionate leggermente verso l'interno rispetto ai bordi del corpo principale in modo da forzare gli eventuali vortici a rimanere nella parte inferiore dell'auto. In conclusione, un buon compromesso è il posizionamento a $x=650$ mm.

3.5.6 Ulteriori accorgimenti per la riduzione della resistenza di interferenza

La resistenza di interferenza, sebbene il suo maggior contributo sia fornito dalle carene e dal cupolino e dalle giunzioni tra essi e il corpo principale, può essere ulteriormente ridotta eliminando le appendici laddove è possibile come specchietti retrovisori, antenne e fanali e indicatori di direzione. Ad esempio, come detto precedentemente queste ultime potrebbero essere integrate all'interno del bordo d'uscita del corpo principale mentre, al posto degli specchietti retrovisori, si potrebbe usare una telecamera posteriore.



Figura 3.40: Esempio di auto con specchietti retrovisori del team Solaris della Dokuz Eylül University, tra le ultime in classifica alla WSC 2013.^[16]

3.6 Momenti aerodinamici

In questo paragrafo studieremo la stabilità dell'auto attorno agli assi di imbardata rollio e beccheggio, quando questa è perturbata da venti trasversali e frontali.

L'imbardata è la rotazione dell'auto attorno a un asse verticale passante per il baricentro.

Il rollio è la rotazione del veicolo attorno a un asse longitudinale.

Il beccheggio è la rotazione della carrozzeria attorno a un asse trasversale.

3.6.1 Momento di imbardata

Studiamo la stabilità di un corpo attorno all'asse di imbardata quando questo è perturbato da una raffica trasversale. A tal scopo, riprendiamo le nozioni di centro di pressione C_P , punto in cui possono essere considerate applicate le forze aerodinamiche e C_G centro di gravità, punto in cui possono essere considerate applicate le forze inerziali.

L'effetto della raffica può essere visto come una forza $F_{crosswind}$ applicata nel centro di pressione, come visibile in figura 3.41. La posizione del centro di pressione rispetto alla posizione del centro di gravità è molto importante, soprattutto alle velocità tipiche delle vetture solar challenge quando le forze aerodinamiche sono considerevoli. Ora, per essere stabile, la reazione della vettura deve essere tale da smorzare l'effetto della perturbazione. Una configurazione aerodinamicamente stabile è quindi quella in cui il centro di pressione è posizionato dietro il centro di gravità, caso a figura 3.41, in cui il momento che si genera (rotazione oraria) smorza l'effetto della raffica. Nel caso b, invece, in cui il centro di pressione è davanti il centro di gravità, si accentua l'effetto della raffica e ciò può condurre la vettura fuori strada o, addirittura, a sbandare.

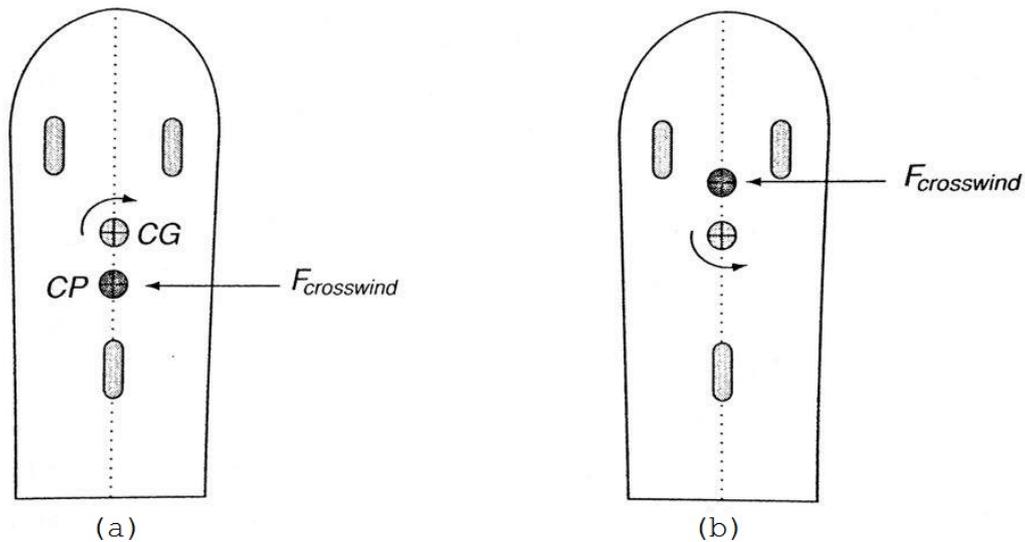


Figura 3.41: *Illustrazione dell'effetto della posizione del centro di pressione rispetto al centro di gravità.* [2]

Il posizionamento del centro di pressione dietro il centro di gravità è facilmente ottenibile con un'auto corta con cupolino centrale, sia nel caso in cui l'auto sia a tre ruote con due frontali sia nel caso in cui sia a quattro ruote. Per entrambe le configurazioni, il peso dovrebbe essere distribuito in modo tale che gli pneumatici anteriori sostengano un peso maggiore rispetto alle ruote posteriori e, in più, per far avanzare il centro di gravità rispetto al centro di pressione, si dovrebbe spostare il telaio in modo tale da avere le ruote anteriori il più possibile in prossimità del bordo d'attacco del corpo principale. Il motivo per cui con un'auto corta si riesce ad avere facilmente una configurazione stabile è che essa ha un cupolino la cui altezza massima è molto arretrata, vicino al centro dell'auto, facendo sì che il centro di pressione sia dietro il centro di gravità. Un altro modo per arretrare C_P consiste nel posizionare più indietro le carene delle ruote posteriori. In questo modo queste agiscono come un timone di coda.

3.6.2 Momento di rollio

Vediamo ora la stabilità del corpo attorno all'asse di rollio, aiutandoci con la figura 3.42. L'asse di rollio è un asse teorico intorno al quale il telaio ruota ed è determinato dalla configurazione delle sospensioni.

Da un punto di vista frontale, infatti, l'auto rolla attorno all'asse di rollio del sistema di sospensioni. Poiché per minimizzare lo sfregamento laterale degli pneumatici il sistema di sospensioni è progettato in modo tale che l'asse di rollio sia molto vicino al suolo, per minimizzare il momento di rollio causato da un vento trasversale, il centro di pressione deve essere più basso possibile.

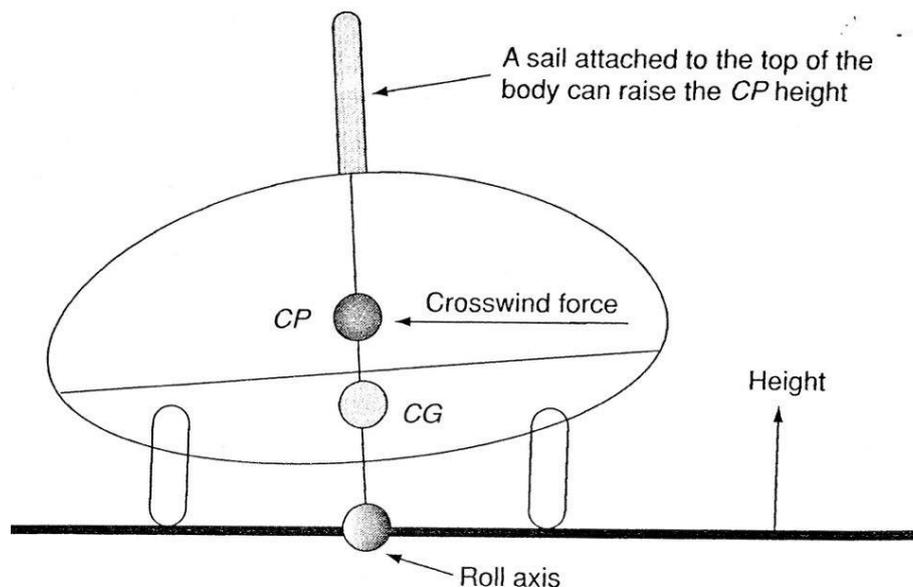


Figura 3.42: *L'influenza dell'altezza del centro di pressione sulla stabilità attorno all'asse di rollio* [2]

Per auto progettate per sfruttare il “*sail effect*”, che approfondiremo successivamente, si può ridurre l'altezza del C_p usando le carene come vele invece che attaccare una sorta di “vela” sulla parte superiore del corpo principale, come mostrato in figura 3.42.

Al di là degli aspetti aerodinamici, l'entità della rotazione del telaio è determinata dalla posizione dell'asse di rollio rispetto al centro di gravità. Più l'asse di rollio è vicino al centro di gravità meno il telaio rotolerà in curva. Si raccomanda inoltre di avere un centro di gravità più basso possibile.

3.6.3 Momento di Beccheggio

Il momento di beccheggio ci fornisce la tendenza della vettura ad alzare e abbassare il muso in presenza di venti frontali, dovuto allo sbilanciamento di portanza tra asse anteriore e posteriore. Un coefficiente di portanza positivo sull'asse anteriore e negativo sull'asse posteriore, comporta un momento di beccheggio positivo e, quindi, un innalzamento del muso. Uno sbilanciamento inverso comporta invece un momento di beccheggio negativo e, quindi, un abbassamento del muso. Per sicurezza, è preferibile avere una vettura il cui momento di beccheggio sia negativo. Ma, se il momento di beccheggio è piccolo, è preferibile avere una tendenza ad alzare il muso in quanto ciò promuove l'estensione di flusso laminare lungo il ventre dell'auto.

Infine, dobbiamo considerare l'interazione tra il momento di beccheggio e il sistema di sospensioni. Se l'asse di rollio non è parallelo al suolo, il corpo avrà un momento di beccheggio ogni volta che esso rolla.

Quindi, in conclusione, si raccomanda di avere un asse di rollio parallelo al suolo, un

momento di beccheggio nullo e con una piccola tendenza ad abbassare il muso. Ciò può essere ottenuto tramite l'aiuto di una galleria del vento o con l'analisi CFD.

3.6.4 Un esempio di studio: Stabilità della IK3 in presenza di venti laterali

In questa sezione verrà illustrato un interessante studio effettuato dalla *Universidad de La Serena* sulla loro vettura solare IK3 (*Intikallpa 3*). Nonostante questo team, *Antakari solar team*, abbia partecipato alla WSC solo nel 2013 con la sua IK2, lo studio sulla loro IK3 verrà comunque approfondito in quanto utile e adatto a questa trattazione.

Infatti, questo, presenta gli effetti che un'eventuale vento laterale ha sulla stabilità della IK3, un'auto il cui cupolino è posizionato al lato destro.

I venti laterali sull'auto sono stati simulati in una galleria virtuale utilizzando un profilo di velocità sinusoidale, imposto su uno dei bordi laterali della galleria virtuale. La lunghezza d'onda della sinusoide è di 5.85 m e l'ampiezza è impostata a 40 km/h, come la velocità massima che i venti trasversali possono assumere nella WSC (si veda la figura 3.44). L'effetto dei venti laterali su forze e momenti che agiscono sulla IK3 a una velocità media di 90 km/h, è stato investigato per due condizioni critiche: vento da ovest a est (figura 3.43 a) e vento da est a ovest (3.43 b). Inoltre, a questo vento laterale, è stato accoppiato un eventuale vento da sud a nord. I risultati sono visibili in figura 3.43. Nel caso a, poiché il

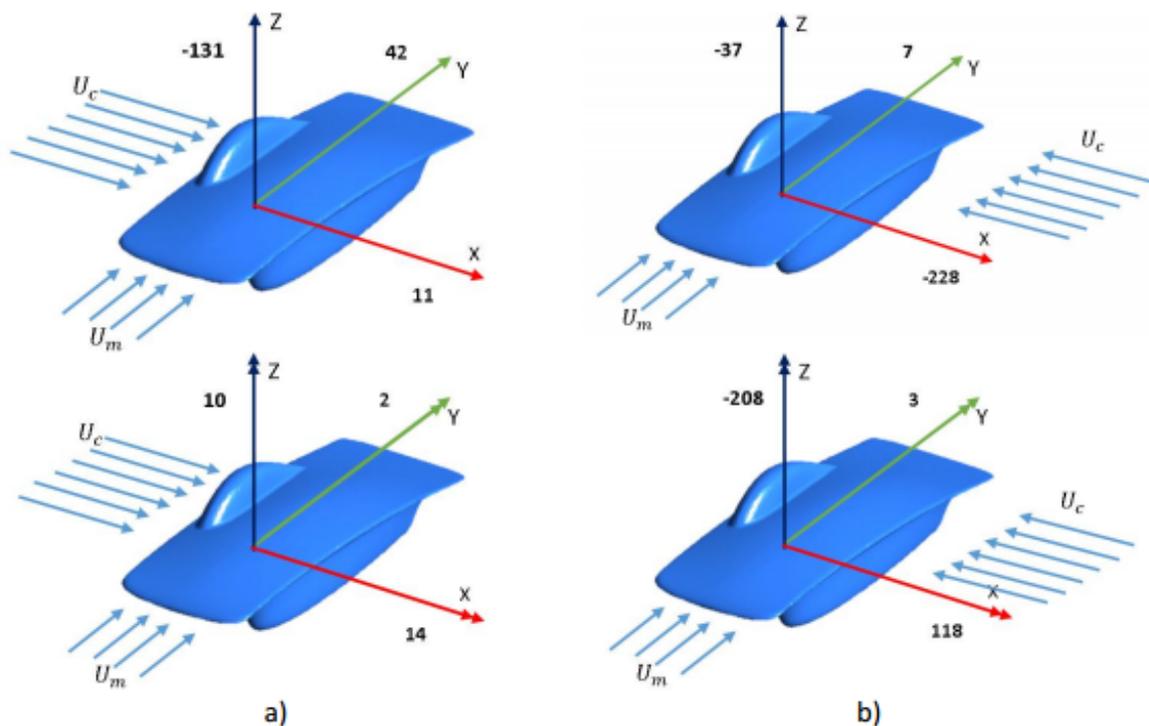


Figura 3.43: Forze in N e momenti in Nm sulla IK3 in presenza di venti laterali:(a) da ovest a est (b) da est a ovest. ^[17]

cupolino è posizionato a destra, si ha che in questo lato vi sia un'area laterale maggiore con conseguente separazione del flusso del vento sulla superficie superiore dell'auto e, quindi, bassi valori di forze e momenti agenti sull'auto. Nel caso b, la forza laterale è 21 volte maggiori rispetto a quelle calcolate nel caso a, in quanto l'area laterale a sinistra è minore e, quindi, sulla parte superiore del corpo scorre il flusso del vento risultante. La forza di resistenza (lungo y) è 6 volte minore e la portanza (negativa) (lungo z) è 3.5 volte minore. Questa diminuzione di portanza è molto pericolosa in quanto riduce l'aderenza degli pneumatici ad alte velocità, rendendo l'auto potenzialmente instabile. Inoltre, altrettanto pericoloso nel caso b, è l'andamento dei momenti: il momento di beccheggio è 8.4 volte maggiore mentre il momento di imbardata è 21 volte maggiore. È quindi estremamente importante, prima di progettare l'auto, conoscere a fondo le condizioni meteorologiche e, in particolare, i valori e la direzione del vento del luogo in cui si gareggia.

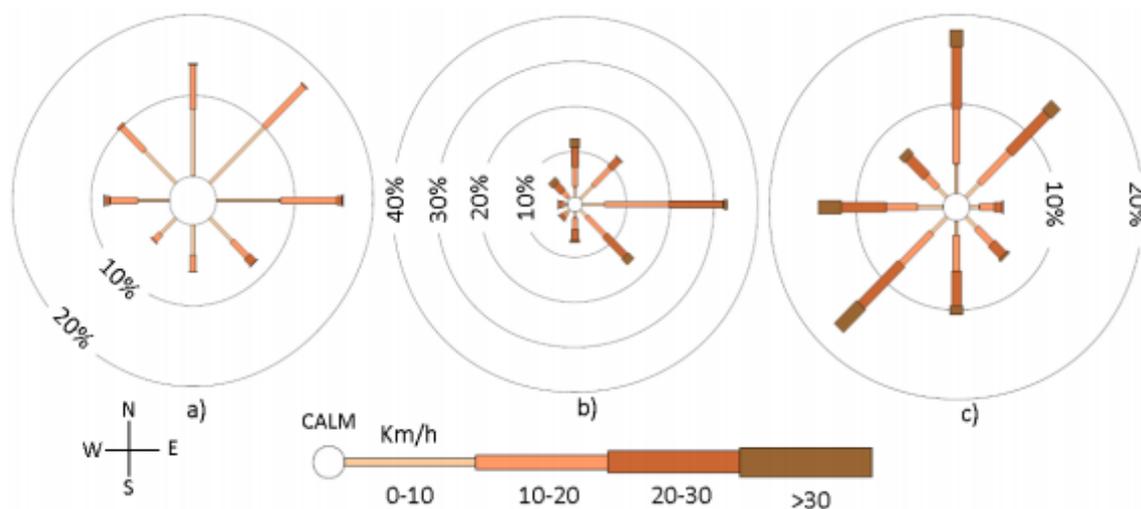


Figura 3.44: Direzione e valore del vento alla World Solar Challenge in Australia a: (a) Darwin, (b) Alice Springs, (c) Adelaide. ^[17]

3.7 L'effetto della presenza dei venti trasversali

In questo paragrafo studiamo l'effetto dei venti trasversali sull'auto, i quali possono variare notevolmente la drag area di una determinata configurazione.

Infatti, molte geometrie sviluppano una portanza in presenza di vento trasversale. Per capire come essa si sviluppa guardiamo la figura 3.45. In presenza di vento trasversale,

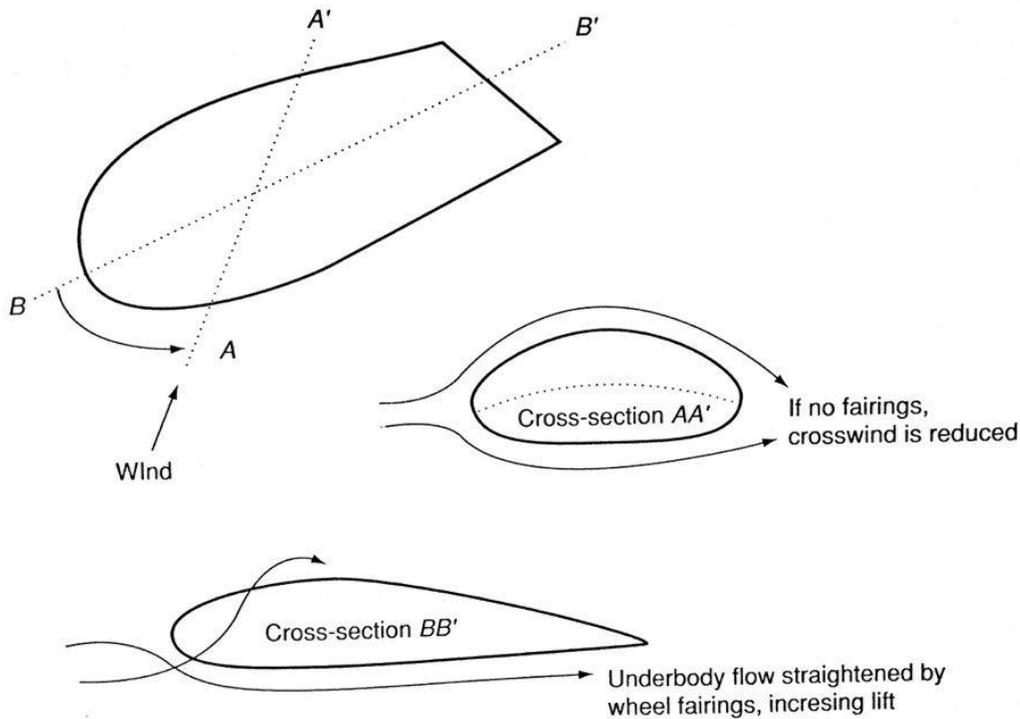


Figura 3.45: *Illustrazione della generazione di portanza in caso di vento trasversale e di come le carene delle ruote enfatizzano l'effetto* ^[2]

il flusso che scorre sulla parte superiore del corpo vede una “gobba” convessa e sviluppa una portanza. Se l'auto è priva di carene alle ruote, anche il flusso che scorre sul ventre vede una gobba convessa (si veda la sezione AA') e sviluppa una deportanza che va a contrastare la portanza generata dal flusso che scorre sul dorso. Invece, se l'auto dispone di carene, il flusso che scorre sul ventre subisce un raddrizzamento e vede solo la lieve gobba longitudinale del ventre (sotto la sezione BB'). Più è lieve la gobba nella parte inferiore, minore è la deportanza. Pertanto, la presenza delle carene, fa sì che il flusso sulla parte superiore del corpo lungo la sezione AA' generi un maggior quantitativo di portanza positiva dal momento che sulla parte inferiore del corpo, lungo la sezione BB' si genera una deportanza minore. Un primo modo per ridurre la generazione di portanza è, come già detto, costruire un ventre del corpo principale piatto.

Per attenuare gli effetti del vento trasversale, molti team nel passato hanno adottato

una configurazione in cui la sezione posteriore del corpo ha una curvatura a forma di una V invertita, “*spined aftbody*”, come visibile in figura 3.46. In questo modo la sezione

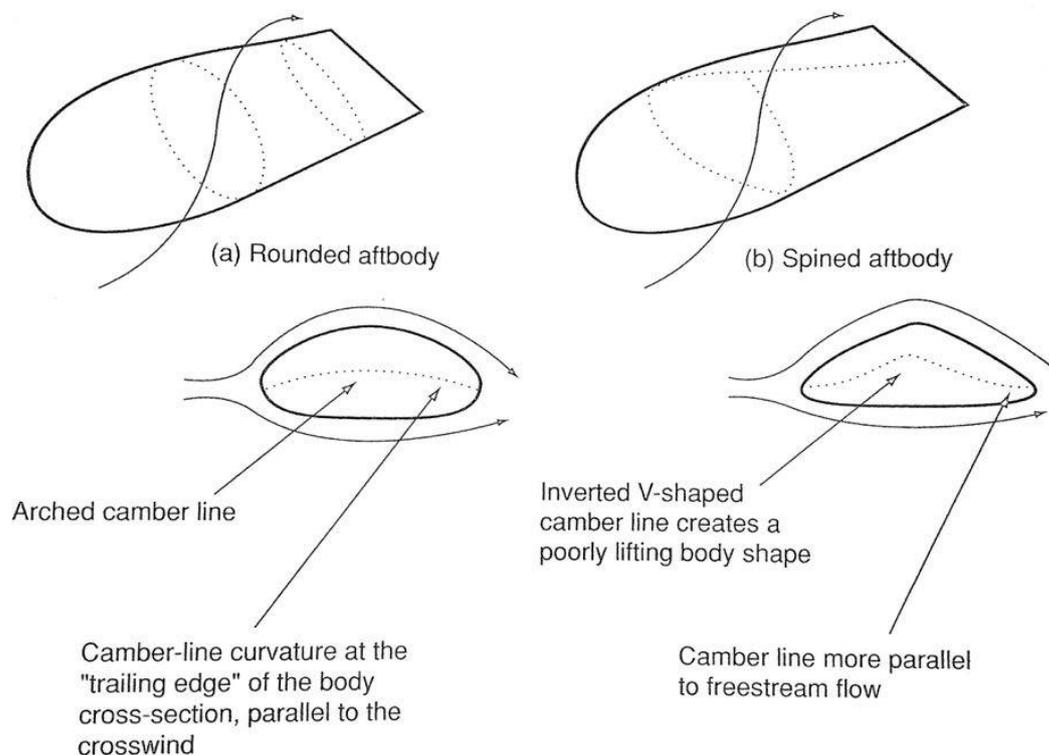


Figura 3.46: "*Rounded aftbody*" e "*spined aftbody*" a confronto ^[2]

trasversale del corpo è un profilo la cui curvatura genera una bassa quantità di portanza, a differenza della sezione classica arrotondata (caso a figura 3.46) la cui linea di camber line è un arco simile a quella dell'ala di un aeroplano. Questa configurazione riduce inoltre la curvatura della camber line al bordo d'attacco e del bordo d'uscita della sezione trasversale del corpo, rendendola più parallela al flusso indisturbato. È chiaro che stiamo parlando di un corpo il cui cupolino è integrato all'interno del corpo principale. Vediamo allora come ridurre la resistenza su un corpo con cupolino esterno, sfruttando il “*sailing effect*”, visibile in figura 3.47. In essa è rappresentata la vista in pianta di una “vela” a forma di profilo alare montata verticalmente su un veicolo terrestre. La funzione di “vela” può essere svolta o dalle carene o da un profilo alare verticale montato sulla parte superiore dell'auto.

Il profilo, in presenza di venti trasversali, è investito da un flusso la cui velocità V_∞ è diretta con angolo α rispetto alla corda. L'angolo θ_{dw} è l'angolo di downwash, che riduce l'effettivo angolo di attacco. La forza risultante sul profilo è R e la sua componente perpendicolare a V_∞ è la portanza, mentre la componente parallela a V_∞ è la resistenza indotta. Infine, vi è un'interessante componente parallela alla direzione del moto T , la spinta o “*sailing force*” la quale, se il flusso resta attaccato, può contrastare la resistenza.

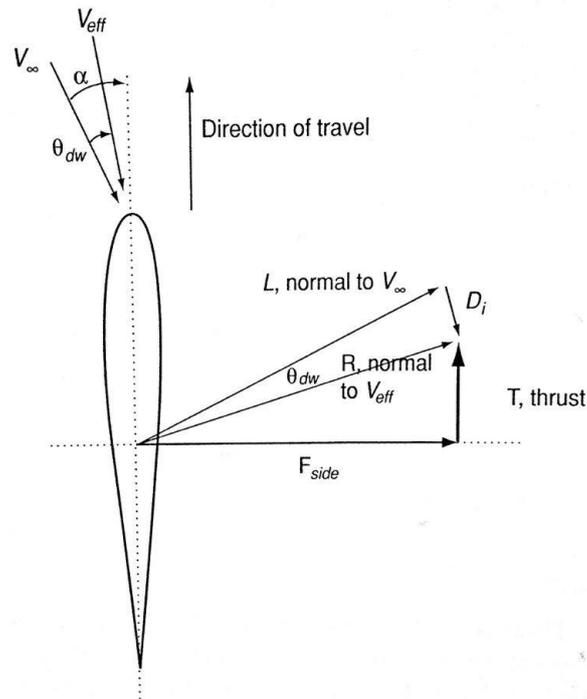


Figura 3.47: Vista in pianta di una "vela" a forma di profilo alare verticale in grado di sviluppare una forza di spinta T . [2]

Questa può infatti ridurre la potenza erogata dal motore e, se come "vele" si usano le carene, questa spinta è da moltiplicare per il numero di carene. Vi è però un piccolo aumento della resistenza al rotolamento dovuto alla forza laterale (*side force*). Il guadagno è comunque maggiore pertanto, se vi sono venti trasversali, è estremamente vantaggioso sfruttare il *sailing effect* per ridurre la resistenza.

Un esempio di auto che sfrutta pienamente questo effetto è la Mana La, visibile in figura 3.48. Il problema però è che, oltre ad avere un grande quantitativo di superficie bagnata, in assenza di venti trasversali, la resistenza associata a questa configurazione è estremamente elevata. Un'altra auto la cui configurazione è stata sviluppata per trarre vantaggio in presenza di venti trasversali è la *Santa Cruz Pumpkin Seed* visibili in figura 3.49. Questa auto, nei giorni in cui erano presenti i venti trasversali, montava ai lati del cupolino due profili alari verticali, controllabili tramite un collegamento all'interno dell'abitacolo.



Figura 3.48: *Manta La*, auto progettata per sfruttare i venti trasversali. [18]



Figura 3.49: *La Santa Cruz Pumpkin Seed* ha con corpo principale aerodinamico con "vele" removibili e orientabili. [19]

Capitolo 4

Emilia III: le basi di un progetto efficiente

4.1 Introduzione

Nel 2013, con Emilia III, è la terza volta che il team Onda Solare partecipa al World Solar Challenge, dopo il 2005 con Emilia I, la bicicletta elettrica, e il 2011 con l'auto solare Emilia II.



Figura 4.1: *Emilia I.* [5]

Emilia III è stata progettata in base ai dettami forniti dalla letteratura e, in parte, dall'esperienza maturata con Emilia II. Con il nuovo regolamento, infatti, non è più possibile sviluppare un progetto che abbia come riferimento le auto che hanno gareggiato nelle

Figura 4.2: *Emilia II.* [5]

scorse edizioni e le relative prestazioni, richiedendo così lo studio di nuove configurazioni vettura. Nel 2013, come abbiamo visto nel capitolo precedente, si impone infatti l'uso di quattro ruote, un cono di visibilità per il pilota molto preciso e si riducono le dimensioni massime della vettura. Il nuovo regolamento risulta essere penalizzante in termini aerodinamici in quanto, ora, gli oggetti da alloggiare sotto il corpo principale sono cinque e non più tre e la loro posizione è alquanto vincolata.

Lo studio aerodinamico è stato condotto esclusivamente per via numerica con codice di simulazione fluidodinamica STAR-CCM+. Tempi e costi non hanno permesso test in galleria del vento. La questione "budget", come emergerà dai prossimi paragrafi, penalizzerà molto la configurazione finale di Emilia III.

L'obiettivo primario del team è stato quello di produrre un'auto efficiente. Abbiamo detto che, per essere efficiente, un'auto solare deve essere progettata in modo tale da ottimizzare il bilancio tra l'energia prodotta e l'energia utilizzata per vincere la resistenza aerodinamica. Essa deve poi essere stabile ed affidabile.

Nei prossimi paragrafi vedremo se e come Emilia III ha realizzato questo obiettivo.

Figura 4.3: *Emilia III.* [20]

4.2 Il raggiungimento dell'efficienza

4.2.1 Scheda tecnica

Vediamo nel dettaglio la scheda del veicolo. ^[20]

Tipo di veicolo : Veicolo Elettrico ad energia solare.

Dimensioni del veicolo:

Lunghezza: 4.50 m

Larghezza: 1.8 m

Altezza: 1.2 m

Peso veicolo (incluse batterie): 195kg

Aerodinamica:

Superficie frontale: $0.994 m^2$

Simulazione StarCCm+ 0.129

Performance:

Velocità massima: 110km/h

Consumo (a 70km/h): 17Wh/km

Consumo petrolio equivalente (a 70km/h): 0.15 L/100km

Autonomia solo a batteria (a 70km/h): 300km

Pannello fotovoltaico:

Produttorecelle: Sunpower Corporation

Fornitore Solbian Energie alternative

Tipo di cella Silicio Monocristallino

Efficienza massima(25°C) 22%

Numero celle installate 391

Superficie totale installata $6m^2$

Potenza massima pannello 1200W

Maximum Power Point Tracker:

Produttore Onda Solare – Università di bologna – ST Microelectronics

Tipologia Boost Converter, generazione distribuita

Potenza nominale singolo stadio 100W

Efficienza max. 98%

Peso singolo stadio 125g

Numero MPPT 16

Pacco Batteria:

Produttore Panasonic

Tipo Li-Ion NCR18650B 3.3Ah

Tensione nominale 120V

Ah nominali 43Ah

Energia totale 4800 Wh

Peso 21kg

Numero totale celle 403

Meccanica

Ruote frontali 2

Ruote posteriori 2 motori ruota

Materiale telaio Fibra di Carbonio

Sospensioni Balestre

Pneumatici Michelin

Freni A disco, doppio impianto idraulico

Motori

Produttore Onda Solare – Università di Bologna –

TemElectricMotors

Tipologia Motoruota sincrona a magneti permanenti

Potenza nominale 1100 W

Potenza massima 2200 W

Coppia massima 45Nm

Peso 10kg

Numero motori installati 2 posteriori

Inverter di trazione

Produttore Università di Bologna

Tipologia Inverter trifase, controllo ad orientamento di campo

Tensione massima ingresso 200V

Corrente massima RMS 70 A

Peso 1.0 kg

BatteryManagement System

Produttore Università di Bologna - TBE

Tipologia Controllo tensioni di cella ed equalizzazione passiva

4.2.2 Ottimizzazione energetica

In questo paragrafo verrà illustrato come Emilia III è stata equipaggiata per massimizzare la produzione di energia, utilizzarla e gestirla al meglio.

Moduli fotovoltaici

La componente fotovoltaica di Emilia III è costituita da 391 celle solari al silicio monocristallino ricoprendo tutti i $6m^2$ di superficie consentiti da regolamento grazie alla riduzione delle spaziature tra celle e moduli. Queste celle, prodotte negli Stati Uniti dalla Sunpower, grazie alla tecnologia "*back-contact*" offrono un eccellente rendimento del

22.8%, fornendo così poco più di 1.3 kW. Inoltre, i pannelli sono in grado di ricaricare il pacco batterie in 5 ore. Nuna 7 è equipaggiata con le stesse celle fotovoltaiche, in particolare 392.

Le celle sono racchiuse tra strati di materiali plastici tra cui l'Etfè, un film trasparente e ultra sottile di polivinilfluoruro resistente all'invecchiamento e il Tpo, poliofelina termoplastica. Inoltre le celle stesse sono ultra-sottili (135 micron rispetto alle tradizionali spesse 180-200 micron). Tutto ciò permette di curvare i moduli e adattarli alla forma dettata dall'aerodinamica. Sempre a tal scopo, per inglobare le celle alla superficie senza danneggiarsi, si è prestata una particolare attenzione al processo di laminazione, ovvero dell'incollaggio ad alta temperatura dei diversi strati di cui il modulo è costituito. Le celle sono state infatti lavorate dalla Solbian Energie Alternative che le incapsula all'interno di uno speciale film polimerico, in grado di proteggerle dagli agenti esterni e di permettere la loro curvatura. I polimeri utilizzati proteggono inoltre le celle dall'invecchiamento e mitigano il fenomeno del "*mismatching*" ovvero il fenomeno per cui, a causa delle diverse caratteristiche termiche e meccaniche dei materiali che costituiscono il pannello, la resa dell'intera serie di moduli è limitata dal comportamento di quello con prestazione più bassa. Infine, la sostituzione del vetro con materiali polimerici riduce il peso del pannello conferendo all'intera componente fotovoltaica un peso complessivo di 18 kg. L'uso di 16 MPPT (*Maximum Power Point*) per la gestione del pannello, consente di individuare istante per istante il punto di massima efficienza energetica e, quindi, di estrarre la massima potenza erogabile dei pannelli. Infine, poiché le celle solari sono collegate elettricamente in serie tra loro, se una di esse è in ombra, la corrente prodotta da tutte le altre viene ad annullarsi. Il problema delle ombre, presente soprattutto laddove è posizionato il cupolino, viene risolto inserendo in parallelo un diodo di by-pass sotto ogni cella presente in questa zona, un circuito che scollega le celle in ombra da quelle esposte. Questi diodi, per limitare cablaggi e ingombri, sono inglobati all'interno della laminazione.

Pacco batterie

Emilia III dispone, come Nuna 7 e Tokai, di 21 kg di batterie agli ioni di litio (Li-Ion) da 4800 Wh, che garantiscono oltre 300 km di autonomia in caso di scarso irraggiamento solare e ad una velocità di crociera di 80 km/h. Sono state montate 416 batterie divise in 32 pacchi da 13 al fine di adattarle al meglio allo spazio e alle modalità di gestione. Ogni pacco batteria è in grado di fornire 5kW come potenza nominale e nel picco 6.8 kW con corrente di 43 Ah e tensione nominale di 120 V. Le batterie agli ioni di litio hanno un ottimo rapporto peso/potenza, nessun effetto memoria e una perdita della carica lenta quanto esse non sono in uso. Esse però necessitano di una accurata gestione della potenza. Ad adempiere a tale funzione vi è un *Battery Management System* che, per ottenere un'ottima equalizzazione, tiene sotto costante controllo tensioni e temperature delle celle

che compongono il pacco batteria. Esso è stato sviluppato dal Dipartimento dell'Energia Elettrica e dell'Informazione con il supporto dell'azienda di automazione industriale TBE.

Motoruota

Per aumentare il rendimento del sistema veicolo, i motori elettrici, ciascuno del peso di 10 kg, sono stati integrati all'interno delle ruote posteriori. Questa soluzione riduce i pesi, permette di semplificare i cinematismi, eliminare gli organi di trasmissione e, quindi, aumentare l'efficienza di trasmissione. Il motore è quindi, una motoruota, brushless a magneti permanenti con potenza nominale di 1100 W e massima di 2200 W con coppia massima di 45 Nm. Il suo rendimento è del del 92% mentre il driver del 97%. Per ciascun motore vi è un apposito inverter, il cui peso è solo di 1 kg, che controlla lo stesso per ottenere le massime prestazioni. L'inverter permette infatti lo sfruttamento ottimale del motore in ogni condizione operativa. Infine, un microprocessore a 32 bit gestisce il controllo dell'energia e permette di equalizzare la potenza tra i vari apparati.

4.2.3 Ottimizzazione aerodinamica

Con soli 1.3 kW a disposizione, come già detto, l'aerodinamica è estremamente importante. Le forme che caratterizzano Emilia III sono infatti il frutto di un attento studio aerodinamico, coadiuvato da simulazioni numeriche. Queste hanno permesso di ottimizzare le geometrie tramite l'osservazione dei diagrammi del coefficiente di pressione, avendo cura che questi fossero regolari e senza picchi.

Ripercorriamo, quindi, l'iter presentato nel precedente capitolo che porta allo sviluppo di un buon progetto aerodinamico, illustrando le soluzioni adottate da Emilia III, esaminando se queste si conciliano con quelle suggerite da letteratura e paragonandole a quelle adottate dai team Nuon e Tokai, vincitori consolidati della WSC. Verranno inoltre evidenziate le principali differenze da Emilia II, molte delle quali derivanti dal nuovo regolamento.



Figura 4.4: *Nuna 7, vincitrice WSC 2013.* [6]



Figura 4.5: '13 Tokai challenger, seconda classificata WSC 2013. [9]

Corpo principale

Il nuovo regolamento, riduce le dimensioni massime della lunghezza della vettura da 5 m a 4.5 m. Pertanto dal punto di vista della forma in pianta, il profilo troncato risulterebbe svantaggioso in quanto, per rispettare le dimensioni imposte, sottrarrebbe molta superficie pannellabile. Da qui, la prima sostanziale differenza da Emilia II: Emilia III presenta una vista in pianta rettangolare e non più ad ogiva, forma peraltro quasi sempre adottata dai team "vincenti", che le permette di utilizzare tutti i 6 m^2 di superficie pannellabile permessi.

Da un punto di vista laterale la forma è quella di un profilo alare, in particolare un NACA 660206 modificato per promuovere il flusso laminare, con uno spessore percentuale massimo del 6.5% e con una curvatura del 2%, scelta di compromesso per ridurre la resistenza indotta tra una curvatura del 4% e una macchina più bassa e una curvatura minore e auto più alta. Per Emilia II, era stato invece usato un profilo simmetrico NACA 0006-45 modificato in modo da avere il punto di massimo spessore massimo di circa 6% al 45% della corda.

Da un punto di vista frontale ha una sezione ellittica variabile lungo la lunghezza del corpo.

Lo spessore del corpo è molto contenuto (spessore massimo di 34 cm, mentre in Emilia II era di 29 cm) ma, soprattutto, presenta una rastremazione verso il posteriore graduale e con un bordo d'uscita estremamente sottile, caratteristiche fondamentali per la riduzione della resistenza di forma.

Per la riduzione della resistenza d'attrito, la quale è il tipo di resistenza predominante su un corpo aerodinamico come le auto solari, abbiamo detto che, oltre all'estensione del flusso laminare e alla riduzione della superficie bagnata, occorre ridurre la rugosità super-

ficiale e, quindi, avere una superficie del corpo continua, levigata e senza irregolarità. Per motivi di budget però, il raggiungimento di questi requisiti è stato ostacolato. Emilia III, infatti, presenta una superficie e un andamento delle forme diverse da quelle progettate. In figura 4.6, è possibile vedere le irregolarità e le deformazioni della superficie della parte inferiore dell'auto. Sempre per motivi di budget, la colorazione e decorazione di Emilia III

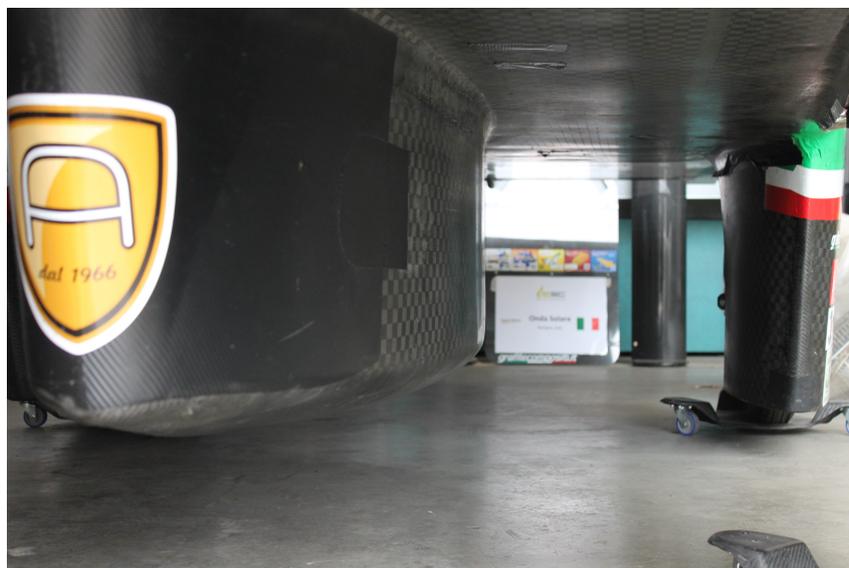


Figura 4.6: *Superficie del ventre di Emilia III.*

è stata effettuata con l'utilizzo di una pellicola adesiva utilizzata in aeronautica e offerta da una azienda di Pescara. Visibile in figura 4.7, essa presenta una serie di forellini che possono creare disturbi. Tale soluzione è sicuramente penalizzante in termini di resistenza ma è un risultato comunque migliore rispetto a quello ottenuto con Emilia II la cui verniciatura ha comportato un incremento di peso di circa 40 kg. Sempre parlando di omogeneità della superficie, un altro miglioramento rispetto a Emilia II è il perfetto inglobamento del rivestimento delle celle solari all'interno della superficie del corpo principale.

Cupolino

La forma ideale del cupolino è caratterizzata da una vista laterale con ampi raggi di raccordo, da una vista frontale con dei piccoli raggi di raccordo e da una vista in pianta a forma di profilo alare.

Su Emilia II esso presenta una forma affusolata, simile a quella ideale. Il cupolino progettato per Emilia III, invece, ha una superficie bagnata minore e si discosta dalla forma ideale solo nella parte posteriore, in cui, seppur ben rastremato, in vista laterale, non presenta alcun raccordo. I cupolini adottati dai Team Nuon e Tokai, infine, si accordano meglio a quelli suggeriti da letteratura.

Al di là della forma, i cupolini dei suddetti team, sono estremamente aderenti al casco del

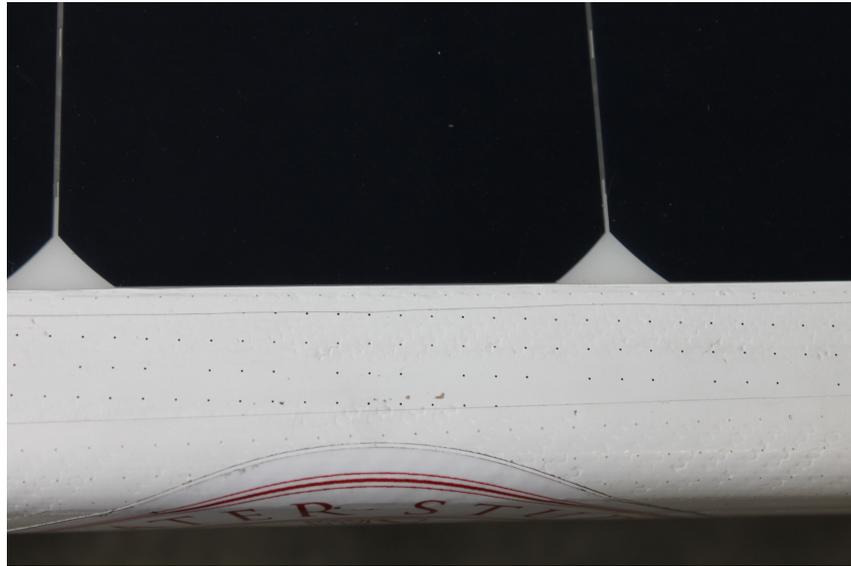


Figura 4.7: *Dettaglio Emilia III: Adesivi aeronautici utilizzati per la decorazione.*



Figura 4.8: *Dettaglio Emilia II: rivestimento celle non perfettamente inglobato nella superficie del corpo principale.*

pilota, riducendo notevolmente la superficie frontale e bagnata.

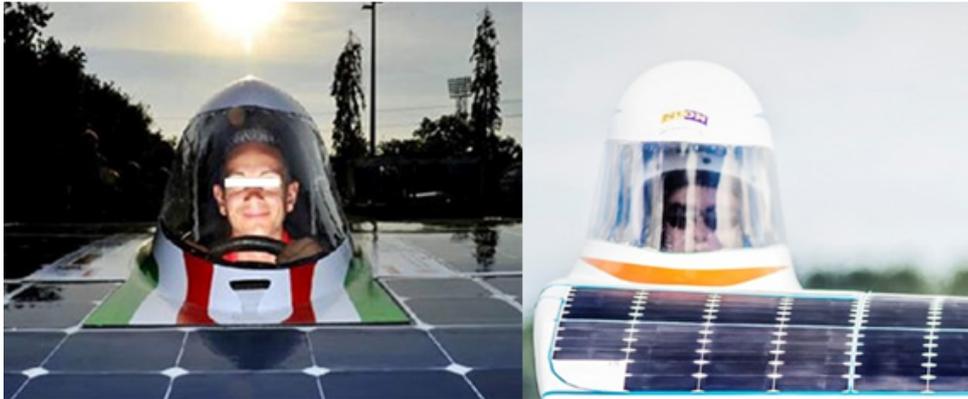


Figura 4.9: Vista frontale cupolini Emilia III, a sinistra, Nuna 7, a destra.

Altrettanto importante è la posizione del cupolino rispetto al corpo principale. Emilia III, per rispettare i nuovi vincoli di visibilità, ha un cupolino centrale più avanzato rispetto ad Emilia II. Il team olandese e giapponese hanno invece scelto un posizionamento laterale del cupolino, scelta che riduce notevolmente la resistenza aerodinamica, soprattutto per il numero di elementi minori sotto l'ala (2 invece che 5). Ciò che è stato realmente

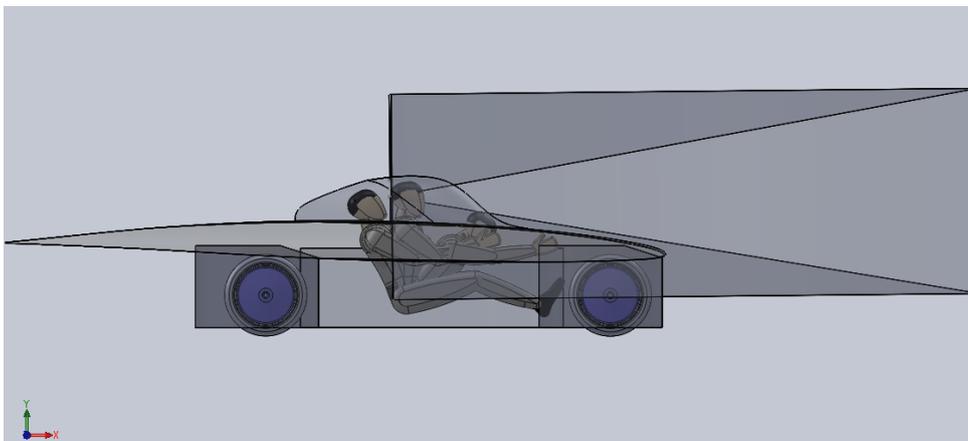
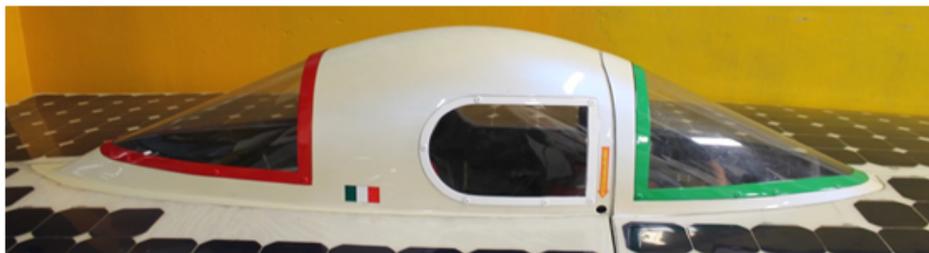


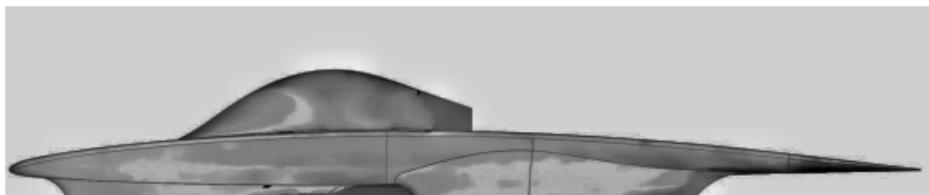
Figura 4.10: Posizionamento del cupolino di Emilia III per rispettare i vincoli di visibilità: visibilità garantita anche nel caso di pilota inclinato di -25° [20]

prodotto, però, differisce da quanto progettato come mostrato in figura 4.11. Il cupolino progettato risultava essere troppo esteso e sottraeva troppa superficie alle celle solari. Per via dei tempi, errori progettuali e di alcune discordanze tra i membri del team, la forma reale del cupolino è il risultato di una scelta tutt'altro che efficiente, ottenuta troncando la parte posteriore del cupolino, con conseguente generazione di vorticità e aumento di resistenza. La posizione del troncamento, molto avanzata rispetto alla lunghezza originale, ha sfavorito l'estensione del flusso laminare. L'apertura creatasi è poi stata lasciata aperta, contribuendo ad incrementare la vorticità.

Cupolino Emilia II



Cupolino Emilia III: progetto



Cupolino Emilia III: reale



Figura 4.11: *In alto: cupolino Emilia II. In basso: cupolino Emilia III, progetto vs realtà*

Carene e vasca

Il posizionamento non laterale del cupolino comporta la presenza di cinque elementi sotto l'ala: quattro carene e una vasca.

Come visibile dalla figura 4.12, le carene e la vasca centrale sono corpi ben affusolati e,

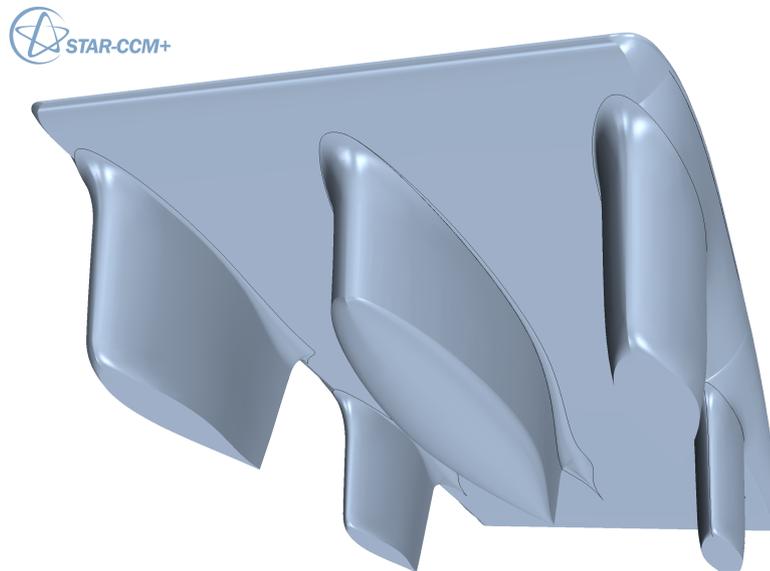


Figura 4.12: *Carene e Vasca Emilia III.* [20]

in particolare, da una vista in pianta, dei profili alari. La vasca, è quasi aderente al fianco del pilota e più piccola rispetto a quella progettata per Emilia II, pur restando comunque molto più grande di quella del team olandese e giapponese. Anche se apparentemente non ha alcuna influenza, la scelta del pilota stesso influenza l'aerodinamica. I team Nuon e Tokai hanno piloti la cui altezza è minore rispetto a quelli del team Onda solare. Ciò gli permette di ridurre sia l'altezza del cupolino che la profondità e lunghezza della vasca, la quale deve alloggiare i piedi senza che le ginocchia tocchino il volante.

Per rallentare l'aria nel canale formato tra carene anteriori e vasca, nel paragrafo 3.5.5, abbiamo visto che sulla Sunswift IV si era allontanato l'abitacolo dalle carene anteriori. Per Emilia III, poiché la posizione relativa tra essi è pressoché vincolata dal regolamento per la visibilità del pilota, si è scelto per le carene anteriori un profilo non simmetrico NACA 65_421 con concavità verso l'interno. Le carene posteriori e la vasca, invece, sono ricavati da profili simmetrici NACA 65_018. Questa configurazione però, dopo che i calcoli CFD hanno evidenziato la presenza di un picco di depressione sulle carene posteriori dovuta ad una incidenza del flusso non ottimale, per non incorrere alla separazione dello stesso, è stata modificata cambiando l'angolazione del bordo d'uscita del profilo della carena anteriore. Il picco risulta ridursi ulteriormente con la presenza delle ruote, anche se queste producono ovviamente un incremento di resistenza. La configurazione, nell'insieme, permette inoltre di avere il punto di ristagno anteriore coincidente con il bordo d'attacco.

Infatti, la presenza di cinque elementi sotto l'ala, per via dell'interferenza tra essi, potrebbe variare l'incidenza del flusso sul profilo della carena posteriore, con il rischio che il punto di ristagno anteriore non coincida con il bordo d'attacco. In figura 4.15 è visibile il progressivo miglioramento dell'andamento delle pressioni sulle carene posteriori.

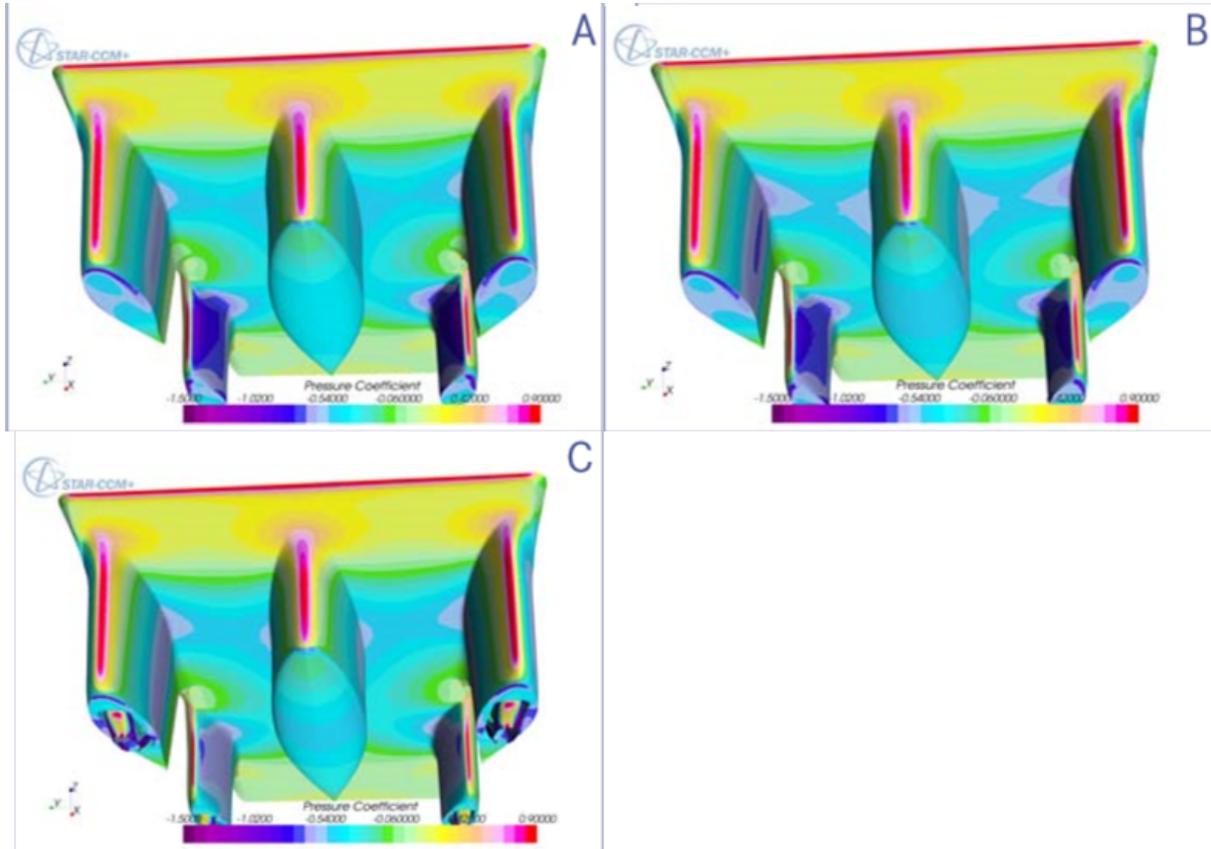


Figura 4.13: *Variazione dell'andamento del coefficiente di pressione nei tre casi: a. configurazione originale, b. carene anteriori modificate, c. con ruote.* [21]

Riduzione resistenza di interferenza

Il posizionamento centrale del cupolino, rispetto a quello laterale, comporta un numero di giunzioni maggiori e quindi una resistenza di interferenza maggiore. Le carene delle ruote, invece, hanno i bordi allineati con quelli del corpo principale, con una resistenza di interferenza associata ridotta rispetto a quella di Emilia II, in cui le carene erano posizionate più internamente rispetto ai bordi del corpo principale. Inoltre, esse e la vasca, sono montate perpendicolarmente al ventre del corpo principale e con le opportune giunzioni, come visibile in figura 4.12.



Figura 4.14: Luci anteriori a confronto: Emilia III, Nuna 7, '13 Tokai Challenger

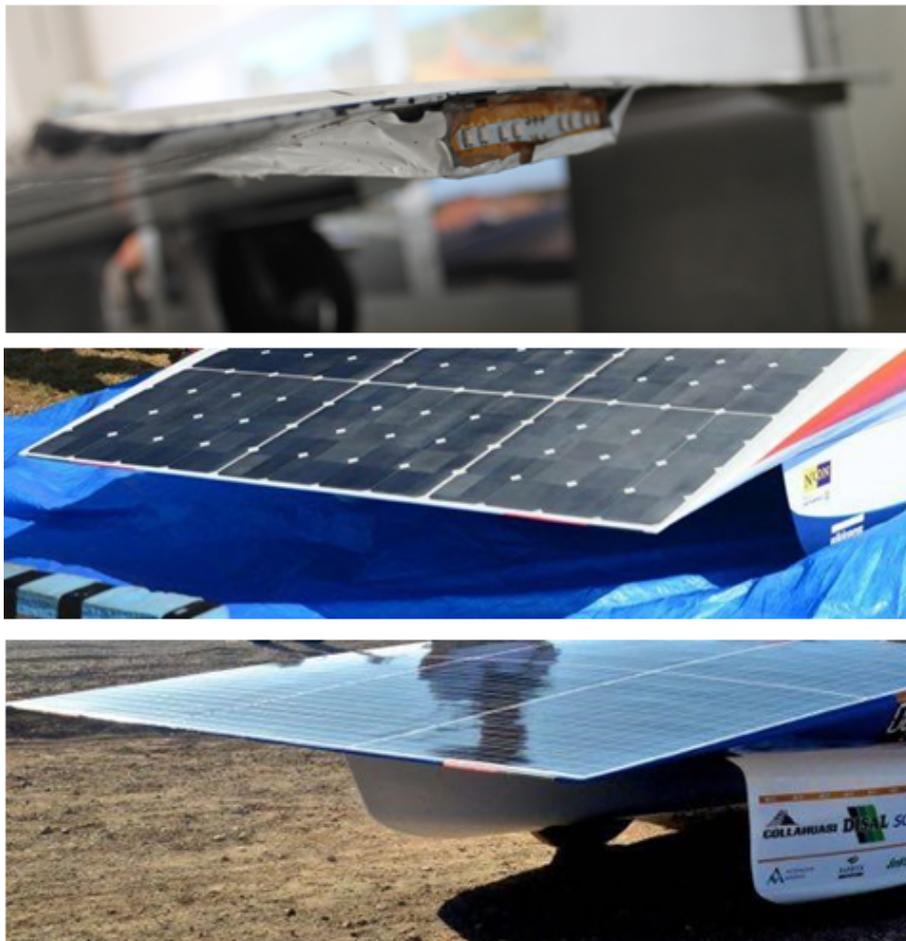


Figura 4.15: Luci posteriori a confronto: Emilia III, Nuna 7, '13 Tokai Challenger

Gli specchietti sono sostituiti da una telecamera posteriore. Le luci anteriori, a differenza di Emilia II, sono integrate all'interno del bordo d'attacco del corpo principale mentre, quelle posteriori non sono state integrate nel bordo d'uscita.

4.2.4 Riduzione resistenza al Rotolamento

Come abbiamo visto, il contributo della resistenza al rotolamento alla resistenza totale dell'auto, è secondario rispetto a quello della resistenza aerodinamica. Esso non è però trascurabile. Vediamo quindi quali elementi di Emilia III permettono di ridurre questo contributo che, ricordiamolo è estremamente dipendente dal peso e dal tipo di pneumatico adottato.

Tra i vari criteri di progettazione di Emilia III vi è, appunto, la ricerca della leggerezza e resistenza. Infatti, parti strutturali e non, come scatola guida, giunti sferici, ammortizzatori, sono realizzate interamente in fibra di carbonio per ridurre al minimo il peso di ogni elemento. Per non perdere in termini di resistenza strutturale il tessuto in fibra di carbonio è stato spesso accompagnato da un 5% di filamenti sottilissimi di titanio. Sempre per ridurre il peso, il telaio è un telaio a tubi, invece che monoscocca, anche esso in fibra di carbonio.

Il nuovo impianto frenante, in fibra di carbonio, permette di ridurre il peso e il consumo di energia. In esso infatti il freno di stazionamento è integrato nella pinza, è migliorato il raffreddamento dei pistoncini e delle pastiglie e sono state eliminate le forze tangenziali sui pistoncini dovute alla frizione tra dischi e pastiglie, in quanto queste vengono scaricate sul corpo pinza.

Le ruote sono di tipo lenticolare, piena e con una struttura in fibra di carbonio senza raggi, in grado così di rotolare con fluidità e di mantenere il flusso più costante.

Infine, le ruote, hanno gomme Michelin a basso attrito di scivolamento, specifici per auto da corsa solari.

Il peso finale della vettura è di 195 kg, contro i 180 kg di Nuna 7 e i 150 kg di Tokai Challenger.



Figura 4.16: *Illustrazione di alcuni elementi in fibra di carbonio di Emilia III*

4.2.5 Stabilità della vettura

Il sistema di sospensioni è stato realizzato mediante balestre in fibra di carbonio. Vi sono due possibilità:

- 1- Connessione delle sospensioni anteriori e posteriori attraverso balestre: ciò genera un effetto anti-rollio, senza dover quindi utilizzare barre anti-rollio.
- 2- Connessione delle sospensioni sinistre e destre tramite balestre: ciò genera un effetto

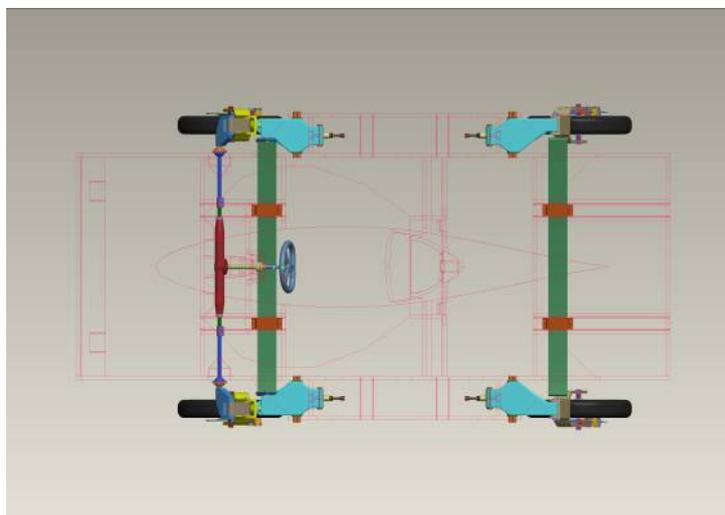


Figura 4.17: *Configurazione sospensione Anti-Rollio* ²⁰

anti-beccheggio.

Tra le due si è scelta la seconda, in quanto con l'effetto anti-beccheggio si ha una maggiore efficienza aerodinamica, si ha un peso ridotto e mantiene comunque una buona stabilità in rollio. Inoltre, in caso di foratura, con questa configurazione si ha una reazione "dolce" delle sospensioni, riducendo così il rischio di sbandamento.

Per incrementare la stabilità del veicolo, in particolare in curva e su terreni irregolari,

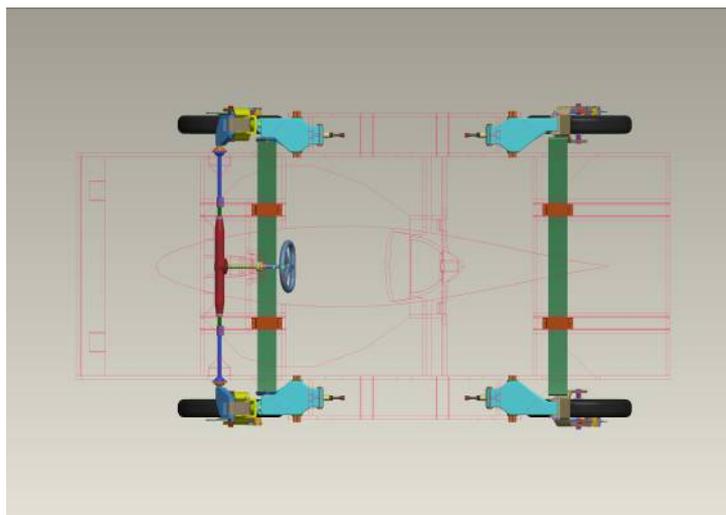


Figura 4.18: *Configurazione sospensione Anti-Beccheggio*

Emilia III è equipaggiata da un sistema sterzante che rende i movimenti delle sospensioni indipendenti dalla rotazione del volante. Inoltre, questo sistema rende i centri di istantanea rotazione di ogni ruota coincidenti in uno stesso punto per ogni angolo di sterzo, aumentando così la stabilità e riducendo i consumi derivanti da variazioni di convergenza non desiderate.

4.2.6 Vettura completa

La velocità massima stimata di Emilia III è di 110 km/h. Ad una velocità di crociera di 70 km/h, il pacco batterie garantisce un'autonomia di 300 km e, il suo consumo, è di 17 Wh/km, il che equivale, in termini di carburante, a circa 0.15 litri ogni 100 km. Per quanto riguarda l'aerodinamica, nel progetto di Emilia III si è deciso inizialmente di conferire all'auto un assetto neutro e con carico verticale minimo, scelta di compromesso tra stabilità ed efficienza e per minimizzare la resistenza indotta. Sempre per ridurre questo contributo, l'auto ha un'altezza di 1.2 m, nettamente maggiore rispetto ai circa 0.30 m suggeriti dalla letteratura per contrastare l'effetto suolo. Nuna 7 ha invece un'altezza di 1.12 m, mentre la Tokai Challenger ha un'altezza di 1 m, entrambe comunque con una curvatura più accentuata. Con un'altezza maggiore si hanno carene più alte e quindi con una superficie frontale e bagnata maggiore e, in più, si riduce la stabilità della vettura. Sulla configurazione finale i risultati delle simulazioni sono stati un $C_x = 0.161$ e un $C_z = -0.24$. Guardando poi la figura 4.19, vediamo che le linee di flusso scorrono sulla superficie con andamento regolare senza separazioni importanti. Per ridurre il carico verticale si è poi deciso di conferire all'auto un assetto leggermente cabrato (1°) che, come mostra la figura 4.20, porta ad azzerare la deportanza. In presenza di vento laterale poi (10°), questo assetto non risulta essere pericoloso. La figura 4.20 evidenzia inoltre

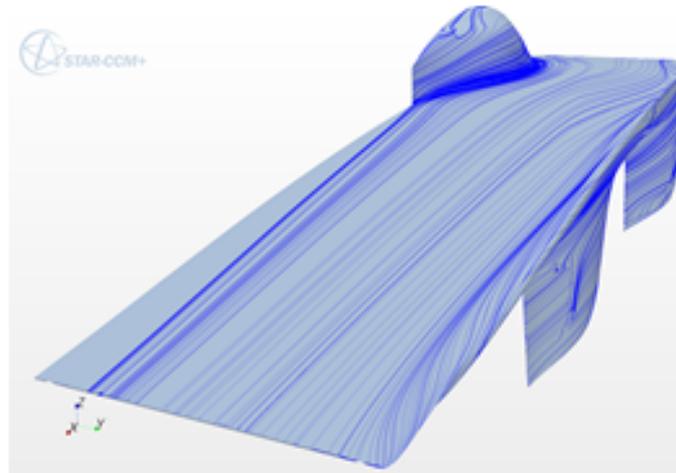


Figura 4.19: *Linee di flusso lungo la superficie del corpo con transizione libera* [20]

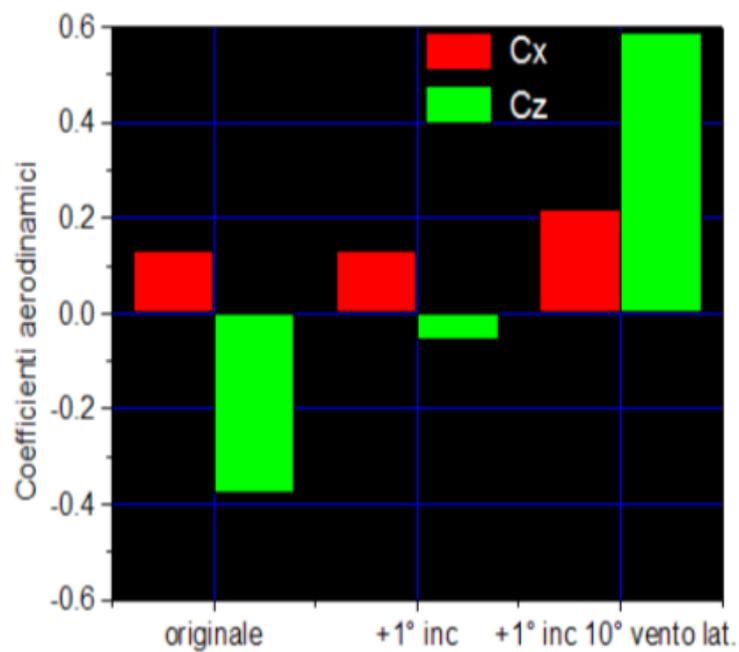


Figura 4.20: *Coefficiente di resistenza e portanza in condizioni di incidenza e vento laterale.* [21]

l'aumento del coefficiente di resistenza in condizioni di vento laterale.

Nel complesso e da progetto risulta un'auto piuttosto efficiente. La vettura prodotta, invece, nonostante essa sia differente da quella progettata, con un assetto leggermente picchiante e un centro di pressione molto vicino al centro di gravità, è riuscita ad arrivare al traguardo dopo poco meno di 5 giorni di gara, classificandosi, al di là delle aspettative, decima su ventidue partecipanti. La velocità media durante la gara è stata di 61.92 km/h contro i 90 km/h previsti, mentre Nuna 7, prima classificata e Tokai Challenger, seconda classificata, hanno sostenuto una velocità media rispettivamente di 90.71 km/h e 8.43 km/h. Emilia II, invece, classificatasi nel 2011 ventunesima su trentasette partecipanti, ha sostenuto una velocità media di circa 51 km/h.

Il podio non è stato conquistato ma questo è un risultato più che soddisfacente perché, Emilia III, a differenza delle prime due classificate, le quali hanno budget e sponsor incomparabili, è riuscita ad ottenere un decimo posto con poche risorse a disposizione e con il lavoro eccezionale di un team che, spinto e sostenuto dalla passione, ha spesso lavorato senza profitti.

Capitolo 5

Conclusioni

In questo studio è stato evidenziato il ruolo dell'aerodinamica sulle prestazioni di una vettura a propulsione solare che concorre alla *World Solar Challenge*. La riduzione della resistenza aerodinamica, nel progetto di un'auto efficiente la cui potenza a disposizione è estremamente limitata, è infatti tra gli obiettivi principali. L'auto è stata suddivisa nei suoi componenti principali, illustrando la forma che minimizza la resistenza e, inoltre, l'accoppiamento ottimale che realizza tale intento. È stata poi studiata la stabilità dell'auto attorno agli assi di imbardata, rollio e beccheggio e il suo comportamento in presenza di venti trasversali. Infatti, l'ottimizzazione aerodinamica, in questo tipo di competizioni, è sì determinante ma, non bisogna dimenticare che l'auto debba essere stabile ed affidabile. Infine è stata riportata l'esperienza del team Onda solare nel progetto di Emilia III, esaminando se e come essa risulti efficiente.

Nello ricerca della configurazione "ideale" si è stati vincolati e limitati dalle norme del regolamento in quanto, molte di queste, sono penalizzanti in termini aerodinamici. Ma, queste, hanno proprio come obiettivo, quello di spronare i progettisti a ottenere l'efficienza con meno energia a disposizione, oltre a salvaguardare e tutelare la sicurezza del pilota (il regolamento del 2017 riduce la superficie pannellabile a $4 m^2$). Inoltre, essendo (*the purpose of the Event is to stimulate research into and development of sustainable transport.*[7]), molte norme nascono per rendere queste vetture più simili a quelle convenzionali, con la speranza, un giorno, di sostituire i veicoli con motore a combustione interna e, quindi, ridurre l'inquinamento e le conseguenze ad esso correlate.

È chiaro che sostituire completamente i veicoli tradizionali con le auto a propulsione solare è ancora troppo rivoluzionario e poco pratico. Inoltre, la diffusione di queste tecnologie, è ostacolata dai costi e dalle efficienze delle celle solari e dalla gestione delle batterie, la cui sostituzione, oltre che costosa, obbliga il loro smaltimento. Inoltre, occorre tenere in considerazione che non sempre l'irraggiamento solare è disponibile.

Pertanto, l'opzione oggi praticabile per ridurre i consumi e rendere le auto commerciali meno inquinanti è quella di applicare quanto possibile ciò che è stato presentato in questo elaborato per ridurre la resistenza aerodinamica e, utilizzare l'energia solare,

come ausilio alla locomozione, soprattutto per le tratte brevi ed urbane. Inoltre, alle velocità tipiche delle auto per uso urbano, la resistenza al rotolamento è altrettanto importante. Quindi, lo sfruttamento dei materiali compositi per ridurre il peso della vettura, contribuirebbe a raggiungere questo obiettivo.

Bibliografia

- [1] Carroll, *The winning solar car*, SAE international, 2003
- [2] Goro Tamai, *The leading Edge. Aerodynamic design of ultrastreamlined land vehicles*, Robert Bentley Publishers, 1999
- [3] Joseph Katz, *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*, Bentley Publishers, 1995
- [4] Barnard, *Road Vehicle Aerodynamic Design*, MechAero Publishing 2001
- [5] Sito internet: www.ondasolare.com
- [6] Sito internet: www.nuonsolarteam.nl
- [7] Sito internet: www.worldsolarchallenge.org
- [8] Appunti di Aerodinamica Subsonica, Alessandro Talamelli
- [9] Sito internet: www.deka.challe.u-tokai.ac.jp
- [10] Sito internet: www.tech.mit.edu/V117/N40/sunrayce.40.gif
- [11] Sito internet: www.wsc.pv.unsw.edu.au
- [12] Sito internet: www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-1347465/Worlds-fastest-solar-car-54mph-runs-power-TOASTER.html
- [13] Sito internet: www.zdp.co.jp/2013
- [14] Devanshu Singla, Aakash Tayal, Rajat Sharma, Dr J. P Kesari, *Aerodynamic Development of a Solar Car*, in International Journal of Engineering Research & Technology, Vol. 4 Issue 06, June-2015
- [15] Doig G., Beves C., *Aerodynamic design and development of the Sunswift IV solar racing car*, in International Journal of Vehicle design, 144-167, 2014
- [16] Sito internet: www.teamsolaris.com
- [17] Pablo Pacheco, Daniel Garrido, Nelson Moraga, Alejandro Abarcia, *Aerodynamic design of solar energy cars for australian and chilean race competitions*

- [18] Sito internet: www.oldcarsweekly.com/news/mana-la-race-car-donated
- [19] Sito internet: www.evalbum.com/031.html
- [20] Materiale onda solare
- [21] Marco Giachi, *Countdown per l'avventura australiana di Onda Solare*, in A&C Analisi e Calcolo, n 57, agosto 2013
- [22] Yunus A. Cengel, John M. Cimbala, *Fluid Mechanics*, Published by McGraw-Hill, 2006
- [23] Sito internet: www.dida.fausser.edu/aero/terza/alainfin/resisten.htm