

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
- Sede di Forlì -

CORSO DI LAUREA

IN INGEGNERIA AEROSPAZIALE

Classe 10

ELABORATO FINALE DI LAUREA

in

Disegno Tecnico Aerospaziale L

Studio e ottimizzazione dell'aerodinamica della vettura Astura

CANDIDATO

RELATORE

Marco Cattalani

Chiar.mo Prof. Ing. *Luca Piancastelli*

Anno Accademico 2013/14

Sessione II

Ringraziamenti

Di sicuro non è stato un percorso facile; gli anni che mi hanno portato fino a qui sono stati lunghi e spesso complicati ma il giorno tanto sognato è finalmente diventato realtà. E questo è solo grazie al sostegno delle persone a me care. Voglio ringraziare la mia famiglia che mi ha permesso di frequentare un'università lontana da casa, permettendomi di vivere un'esperienza che mi ha fatto crescere.

Voglio dire grazie a mia mamma che mi ha sempre sostenuto nonostante le difficoltà e a mia sorella. Alla mia ragazza Veronica, che negli ultimi tre anni mi è sempre stata vicino motivandomi e credendo sempre in me, e a tutta la sua famiglia. Avrei voluto condividere questa gioia anche con te, papà, perché so che ci tenevi molto. Spero tanto che da lassù tu stia guardando insieme a nonna Cecilia e a nonna Ermana. Sappiate che il mio dispiacere più grande è di aver impiegato più tempo del previsto.

Ringrazio il Professor Piancastelli per l'aiuto e la disponibilità mostrata e soprattutto Filippo Fiore e Roberto Dalla Barba che, pur non conoscendomi, mi hanno dedicato il loro tempo e, con i loro preziosissimi consigli, mi hanno aiutato e mi hanno permesso di superare le difficoltà incontrate.

INDICE

Premessa	p. 1
Capitolo 1: Lancia Astura	
1.1 La Storia	p. 3
Capitolo 2: La nuova Astura	
2.1 Il progetto	p. 9
2.2 Scelte stilistiche	p. 10
2.3 Design esterno	p. 11
2.4 Modellazione in SolidWorks	p. 13
Capitolo 3: L'aerodinamica in campo automobilistico	
3.1 Introduzione	p. 19
3.2 La resistenza aerodinamica	p. 20
3.3 L'evoluzione in campo automobilistico: dalle carrozze alle vetture dei giorni nostri	p. 23
3.4 Formule per il calcolo sperimentale della resistenza aerodinamica	p. 25
Capitolo 4: Simulazioni ed elaborazione dei risultati ottenuti	
4.1 Simulazione con Flow Simulation ed elaborazione dei dati per il calcolo del coefficiente di resistenza	p. 29
4.2 Metodi di ottimizzazione del coefficiente di resistenza	p. 36
4.3 Influenza di uno spoiler posteriore sulla resistenza aerodinamica	p. 39
4.4 Campo di flusso attorno ad un'automobile	p. 41

4.5 Il concetto di attrito e di aderenza	p. 43
4.6 Verifica all'imbardata nel caso di raffica di vento laterale	p. 48
4.7 Verifica all'imbardata nel caso di frenata con raffica di vento laterale	p. 54

Conclusioni	p. 59
--------------------	-------

Bibliografia	p. 61
---------------------	-------

PREMESSA

Lo scopo del “progetto ASTURA” è realizzare una vettura sportiva in cui siano coniugate le caratteristiche stilistiche proprie del design di questa categoria di veicoli, con le esigenze funzionali di un’auto concepita per utenti con ridotta capacità motoria e/o diversamente abili.

La prima versione dell’Astura aveva dimensioni ridotte ed era caratterizzata da un aspetto aggressivo ed elegante, ma non era funzionale; un individuo di taglia media non riusciva ad alloggiare al suo interno, inoltre la percezione dell’ambiente esterno dall’abitacolo era molto ridotta.

Tesi successive avevano cercato di correggere i difetti “ergonomici” dell’auto modificandone il design, ma il risultato causò un allontanamento dalle specifiche di progetto; l’Astura finì con l’assomigliare più ad una monovolume piuttosto che ad un’auto sportiva.

Nell’ultima versione è stata fatta una riprogettazione generale della vettura e questo ha comportato una completa rivisitazione del design al fine di ottenere linee morbide e gradevoli, consone ad una vettura sportiva, soddisfacendo però tutti i vincoli del progetto originale.

Lo scopo di questa tesi è lo studio aerodinamico partendo dall’ultimo design realizzato. E’ stata simulata una galleria del vento con un software di fluidodinamica computazionale e, attraverso diverse simulazioni, si è studiato il coefficiente di resistenza aerodinamica e la potenza assorbita dalla resistenza aerodinamica. Conoscendo i rischi delle vetture a passo lungo, si è poi studiato il comportamento del modello in caso di raffica trasversale alla direzione del moto, verificando le condizioni in cui si può presentare una perdita di aderenza.

Capitolo 1

Lancia Astura

1.1 La storia

La Lancia Astura fu un'automobile prodotta dalla casa torinese Lancia dal 1931 al 1939 e fu la prima vettura del marchio a non adottare un nome greco: prese il nome da uno storico castello nelle vicinanze della città romana di Nettuno.

Il primo esemplare, derivato dalla Dilambda, era prodotto con carrozzeria berlina e divenne ben presto la “regina delle fuoriserie” grazie ad un ottimo rapporto peso/potenza e al prestigioso stile, che fu scelto per la realizzazione di automobili uniche dai più grandi carrozzieri del tempo.

Presentata per la prima volta al Salone di Parigi nel 1931, l'Astura prima serie presentava un motore longitudinale anteriore 8 cilindri a V di 2600 cc di cilindrata e dimensioni molto generose: lunga 4,5 m e larga 1,6 m poteva raggiungere i 125 km/h e aveva un prezzo dalle 38.000 alle 47.000 Lire.

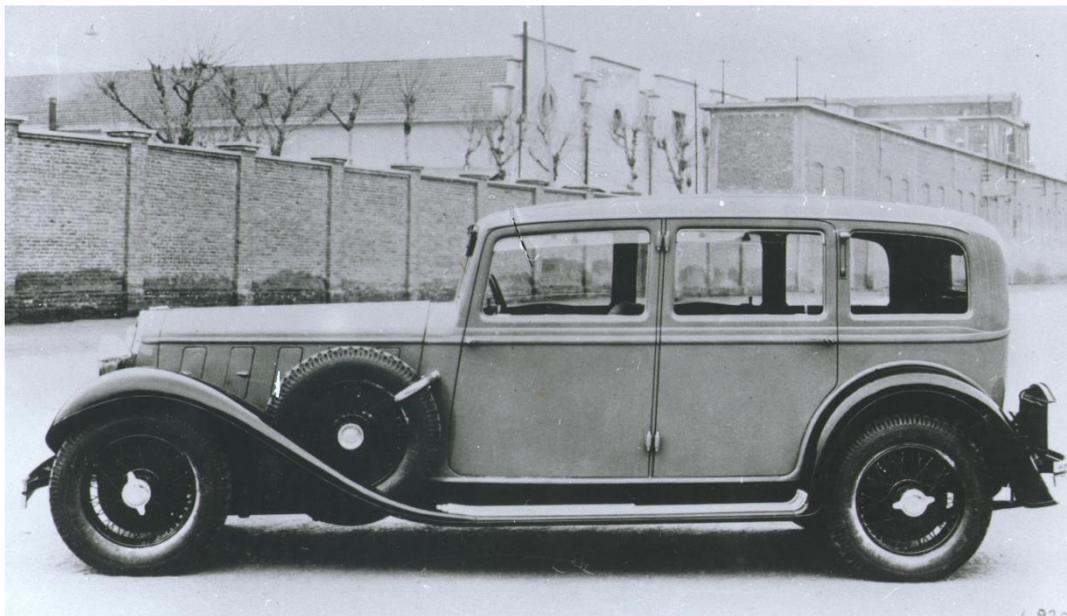


Figura 1 L'Astura berlina 4 porte, prima serie

La produzione dell'Astura prima serie iniziò praticamente nel 1932 e tutti i 496 esemplari furono ultimati nell'estate dello stesso anno, quando uscì, in sordina, la seconda serie.

Poche le variazioni che contraddistinguevano la seconda serie e riguardavano dettagli del telaio (tra cui l'applicazione di silentbloc alle balestre) e dei freni; furono anche modificati gli attacchi della carrozzeria al telaio.

Nel 1933 fu presentata l'Astura terza serie, disponibile con due differenti telai, a passo corto e a passo lungo, caratterizzati dal passaruota posteriore mobile che ospitava, tra l'estremità della carrozzeria e la ruota di scorta, un baule. In assenza di questo la ruota di scorta era inclinata, mentre con il baule risultava essere in posizione verticale. La cilindrata passò a 3000 cc e le dimensioni divennero sempre più generose; infine l'ultima serie nel 1937 con passo ancora più lungo, circa 3,5 m, è stata la base per creazioni, talvolta prestigiose, da parte di carrozzieri italiani come Pininfarina.



Figura 2a Lancia Astura terza serie



Figura 2b Lancia Astura terza serie



Figura 3a Lancia Astura Spider disegnata da Pinin Farina nel 1938



Figura 3b Lancia Astura Spider disegnata da Pinin Farina nel 1938

La nascita di queste fuoriserie era favorita dal fatto che, com'era uso al tempo, l'automobile non presentava una carrozzeria portante ma poteva essere venduta anche la sola parte telaistica e meccanica, la quale poteva essere "vestita" dai carrozzieri secondo il loro stile caratteristico, senza alcun vincolo.

L'Astura è stata una delle auto più personalizzate dai carrozzieri dell'epoca: bicolore, Mille Miglia, cabriolet tipo "Bocca" sono solo alcune versioni di questa vettura.



Fig. 4 Lancia Astura bicolore con motore a V da 2600 cc.



Figura 5 Lancia Astura cabriolet tipo “bocca”

Nel 1947 gli Stabilimenti Farina vollero stupire il mondo con una vettura dalle dimensioni esagerate, il “*magnifico dinosauro*”, la Lancia Astura cabriolet.

Massiccia, faraonica ed irrazionale, in mancanza di un telaio adatto venne recuperato un telaio di una vecchia Astura 233L costruita negli anni '30, dove “L” stava ad indicare la tipologia di telaio a passo lungo.



Figura 6 Vista frontale del modello proposto dagli Stabilimenti Farina nel 1947



Figura 7 Vista laterale della Lancia Astura cabriolet

Le soluzioni stilistiche proposte da questa automobile erano molto interessanti: i parafranghi anteriori si allungavano all'indietro verso il basso fino a cingere la coda e a richiudersi nel paraurti posteriore; il "movimento" della carrozzeria nella fiancata e nel posteriore snellivano la massiccia carenatura; i parafranghi chiusi facevano sì che la linea rientrasse perfettamente nell'ideale del "monolito levigato" che si stava facendo strada nel mondo dell'auto; infine, il contrasto dato dai materiali utilizzati per l'interno, conferivano un'idea di leggerezza contrapposta alla pesante materialità dell'esterno.

Si presentò a Villa d'Este nello stesso anno e vinse il prestigioso concorso d'eleganza, ma presto venne definita "orribilmente bella" e nessuno ne seguì lo stile; non era certo la vettura più adatta nel dopoguerra.

Negli anni Settanta venne però riscoperta e, riconosciuta la sua bellezza, fu utilizzata come modello di eleganza e prestigio.

Capitolo 2

La nuova Lancia Astura

2.1 Il progetto

Le forme, le dimensioni e le proporzioni di un'autovettura devono essere scelte valutando opportunamente diversi fattori come la volumetria interna, l'aerodinamicità e l'aspetto estetico in funzione del target di mercato. Il progetto propone una vettura sportiva sia per normodotati che per diversamente abili. In un'automobile sportiva, come la nuova Astura, l'aspetto esteriore è di fondamentale importanza; chi acquista questa tipologia di veicolo richiede che abbia un design personale e accattivante.

Considerando tuttavia che si tratta di un'autovettura adatta all'uso anche da parte di persone diversamente abili sono imposti diversi vincoli ergonomici e strutturali nonché la presenza di dispositivi che solitamente mal si conciliano con un design sportivo, quali un sistema automatizzato per l'apertura della portiera, un sedile mobile e un volante retrattile. Nella maggior parte dei casi questi dispositivi non sono presi in considerazione fin dalle prime fasi del progetto e non si armonizzano con gli elementi della vettura "standard".

La delineazione delle forme rappresenta quindi una fase cruciale durante la progettazione e deve tener conto di un giusto compromesso tra il fattore estetico e quello pratico, cercando di sacrificare il meno possibile l'uno a discapito dell'altro.

Da queste valutazioni si traggono decisioni circa le dimensioni e proporzioni della vettura che influenzano parametri come:

- Abitabilità
- Accessibilità
- Visibilità
- Capacità di carico
- Peso
- Risultato di test impatto con pedoni
- Aerodinamicità

In seguito alla decisione di progettare la vettura così da permettere a un utente di altezza massima pari a 190 cm di avere sufficiente spazio a bordo, sono stati imposti i seguenti vincoli, in linea con le principali auto sportive del segmento:

- Altezza della seduta da terra compresa fra i 440 e i 500 millimetri. Questo è un valore abbastanza elevato, tale da permettere movimenti agevoli da parte di persone diversamente abili.
- Passo della vettura compreso fra i 2400 e i 2500 millimetri.
- Lunghezza complessiva inferiore ai 4300 millimetri.
- Distanza dalla seduta al tetto di almeno 950 millimetri.

2.2 Scelte stilistiche

I principali tratti stilistici della nuova Astura sono stati ispirati alla Lancia Astura Spider disegnata da Pininfarina nel 1938.

Caratteristiche di quest'autovetture di abbondanti dimensioni sono le forme tondeggianti e morbide, il cofano molto lungo, l'andamento discendente della coda e i passaruota voluminosi. Si è cercato di richiamare alcuni degli elementi caratteristici della Lancia Astura originale utilizzando un design moderno ma dal gusto retrò, evidenziato in particolar modo da alcuni elementi, quali i passaruota alti e spigolosi, la coda e il tetto disegnati con un'unica linea continua, nonché l'abitacolo piuttosto arretrato e un cofano di importanti dimensioni. Al fine di attualizzare la linea e conferire alla vettura uno stile proprio si è comunque preferito non rimanere troppo legati al design della Lancia Astura originale.

Lo studio per il design complessivo dell'autovetture è stato compiuto tenendo in considerazione la necessità di disporre di porte anteriori di grandi dimensioni per avere un comodo sistema di accesso atto a favorire l'uso da parte di persone diversamente abili, senza tuttavia imporre vincoli stringenti o causare effetti antiestetici. L'intenzione è stata quella di creare un'autovetture che non apparisse marcatamente solo per disabili: la nuova Astura si rivolge sia ad utenti diversamente abili, sia a persone normodotate che apprezzino lo stile e la comodità di una vettura con grande abitabilità.

2.3 Design Esterno

Il punto di partenza del design esterno è quello ottenuto nel progetto di tesi “*Ottimizzazione estetica e funzionale di una vettura sportiva per normodotati e diversamente abili*” di L. Morelli. Si è quindi ricorso all’utilizzo dei disegni delle viste ortogonali della carrozzeria, opportunamente dimensionati secondo le quote indicate in figura 12, per creare un modello tridimensionale in SolidWorks.

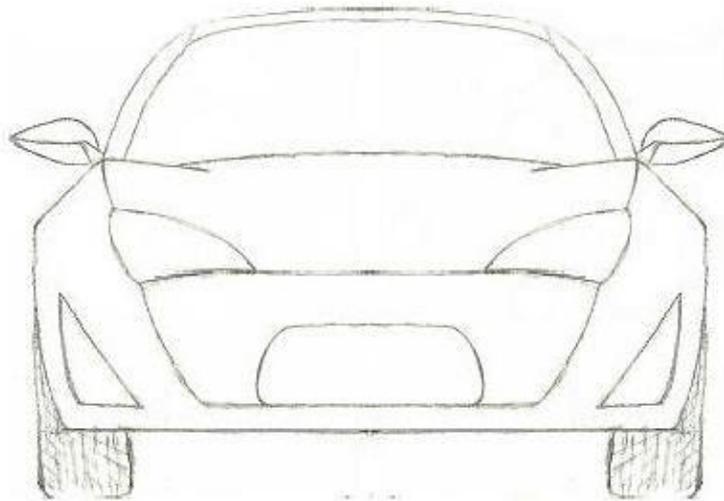


Figura 8 Disegni cartacei ortogonali in scala: vista frontale

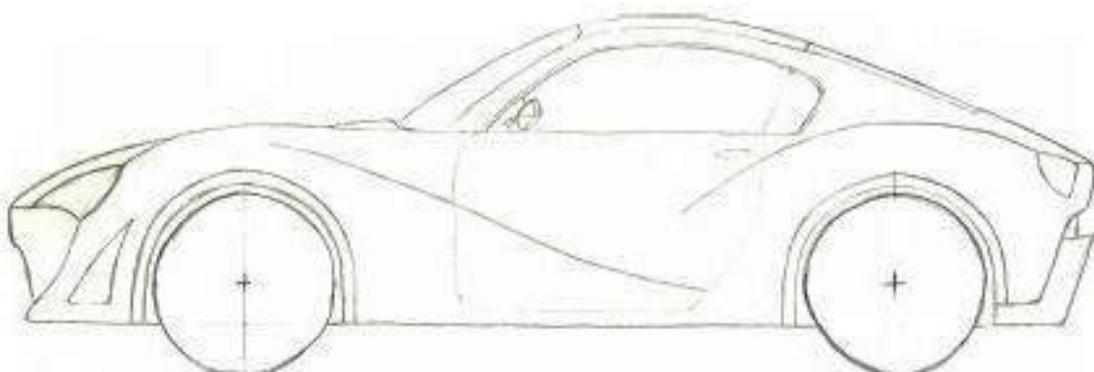


Figura 9 Disegni cartacei ortogonali in scala: vista laterale

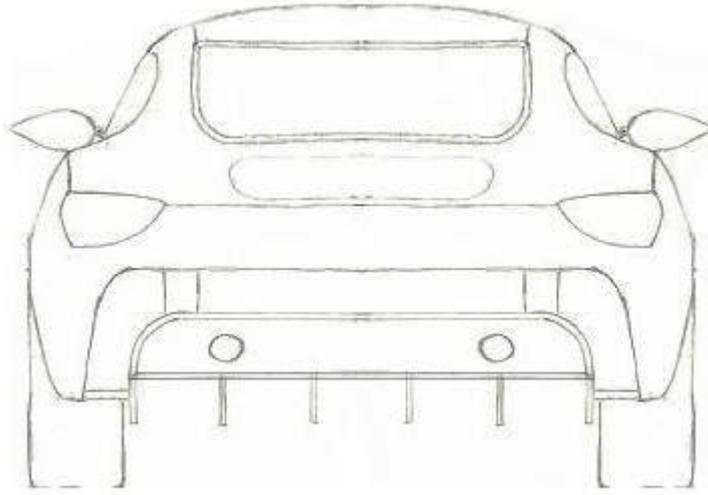


Figura 10 Disegni cartacei ortogonali in scala: vista posteriore

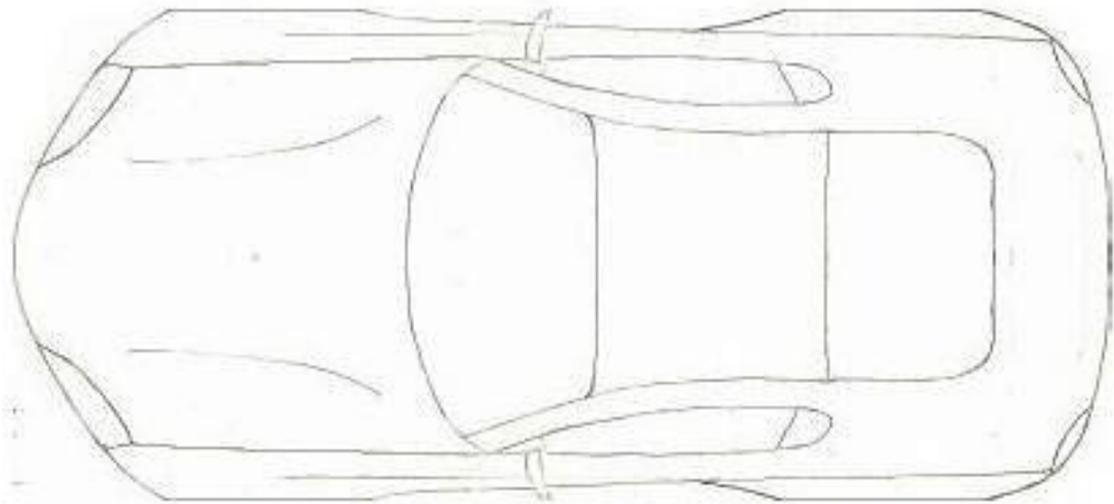


Figura 11 Disegni cartacei ortogonali in scala: vista superiore

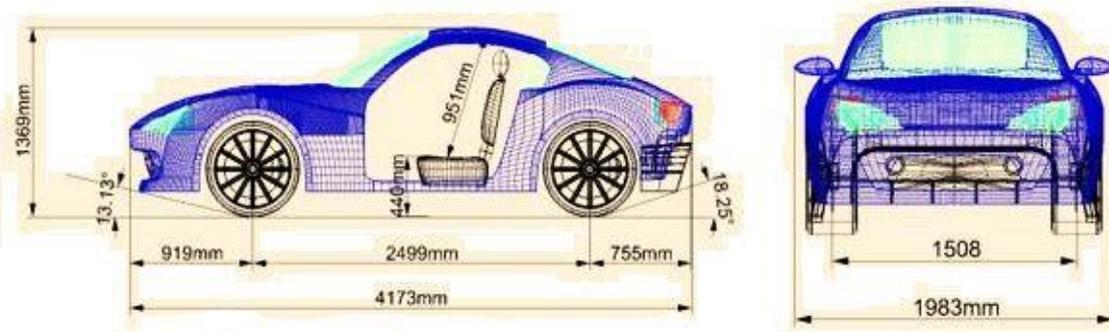


Figura 12 Quote

2.4 Modellazione in SolidWorks

SolidWorks è un software di disegno e progettazione tridimensionale parametrica. Si è scelto di utilizzare questo software perché contiene il pacchetto *SolidWorks Flow Simulation*, il quale semplifica il calcolo della fluidodinamica computazionale, rendendo quindi possibile simulare il flusso dei fluidi attorno ad un corpo. Non è stato possibile utilizzare il modello realizzato precedentemente nel progetto di tesi di L. Morelli *Ottimizzazione estetica e funzionale di una vettura sportiva per normodotati e diversamente abili* in quanto realizzato attraverso il software Rhinoceros. Al momento dell'importazione in SolidWorks, il programma fatica a riconoscere le funzioni di Rhinoceros. Il modello, aperto in SolidWorks, risulta formato da lamine senza spessore e le superfici del modello non sono chiuse. Per poter funzionare, Flow Simulation, necessita di un corpo solido con un dato volume. Si è quindi proceduto con la realizzazione di un nuovo modello dell'automobile, direttamente in SolidWorks.

Con la creazione di un nuovo file, viene automaticamente aggiunto un sistema di assi XYZ con i relativi piani:

- Piano Frontale: XY
- Piano Destro: YZ
- Piano Superiore: XZ

Come tipo di approccio si è deciso di aggiungere dei piani su cui inserire l'immagine di ogni vista ortogonale della vettura. Partendo quindi dal piano frontale XY, si inizia disegnando un nuovo schizzo e, nel menù *Strumenti*, cliccando sulla voce *Strumenti dello schizzo*, è possibile inserire l'immagine della vista frontale. Nella colonna *Proprietà* che compare a sinistra si impostano le dimensioni dell'immagine in modo da rispettare le quote di *Figura 12*.

Una volta inserita la vista frontale si procede allo stesso modo con la vista laterale applicata sul piano destro YZ, verificando che l'estremo della parte frontale del disegno della vista laterale della vettura si trovi sull'intersezione tra il piano destro e il piano frontale.

Per inserire la vista posteriore è necessaria l'aggiunta di un nuovo piano: utilizzando lo strumento *Geometria di riferimento* è possibile inserire un piano parallelo al piano frontale. Si imposta poi la distanza tra il nuovo piano aggiunto e quello di riferimento, che sarà esattamente la lunghezza della vettura. Una volta verificato che il punto di intersezione tra il piano appena inserito, che verrà chiamato piano posteriore, e il piano laterale coincide con l'estremo posteriore del disegno della vista laterale, vi si inserisce l'immagine della vista ortogonale posteriore, opportunamente dimensionata.

Per concludere la preparazione si passa all'inserimento della vista superiore nel piano superiore XZ;

Una volta terminato si ha un sistema di piani. Su ognuno di questi è presente la relativa vista correttamente dimensionata.

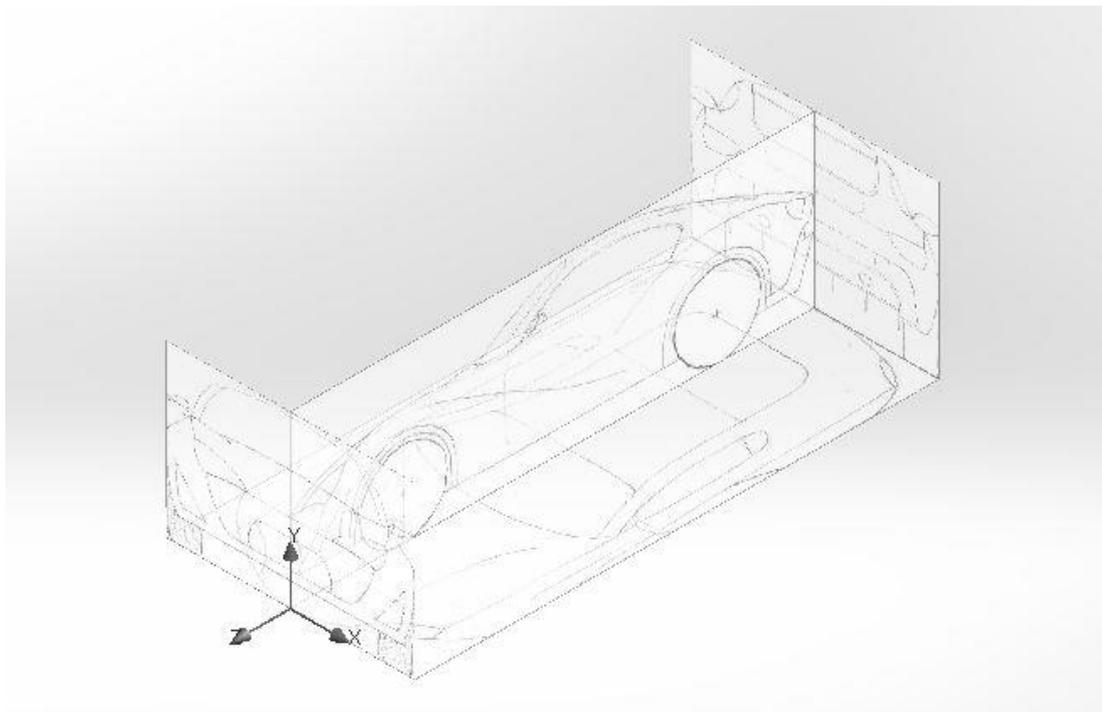


Figura 13 Piani con viste ortogonali

Come detto, l'obiettivo finale per lo studio aerodinamico è un modello solido. Il design originale è ricco di curve e bombature creabili in ambiente SolidWorks solo attraverso l'opportuna e molto complicata modellazione di superfici e il successivo riempimento del modello ottenuto.

Si è deciso quindi di procedere attraverso l'estrusione e il taglio di schizzi creati sui vari piani cercando di mantenere fede il più possibile alle dimensioni e alle forme del design di partenza.

Per prima cosa, utilizzando lo strumento *Spline*, si è realizzato uno schizzo della vista laterale a meno delle ruote. Questo tipo di curva è modellabile e permette di riprodurre fedelmente le curve della vista originale. Lo schizzo disegnato sul piano destro si trova quindi sulla mezzeria longitudinale del modello. Con lo strumento *Estrusione base* si ricava il solido relativo allo schizzo appena fatto. Si imposta la lunghezza dell'estrusione che sarà metà della larghezza complessiva prevista dalle quote. Il risultato ottenuto è quindi una semivettura; con la funzione *Specchia*, l'estrusione appena fatta viene specchiata rispetto al piano destro, ottenendo così la prima bozza tridimensionale dell'automobile. All'altezza dell'assale anteriore e di quello posteriore vi è un foro della dimensione dei passaruota. Per riempire questo foro, lasciando lo spazio necessario per l'inserimento delle ruote, si è disegnato, sul piano destro, uno schizzo di due rettangoli: uno sull'assale anteriore e uno su quello posteriore, di larghezza e altezza maggiori rispetto alle dimensioni dei passaruota, in modo tale che, estrudendoli, andassero a riempire lo spazio vuoto. L'estrusione è stata fatta di una larghezza minore rispetto alla semilarghezza della vettura, e precisamente di 680 millimetri, in modo da lasciare lo spazio per l'inserimento delle ruote. L'estrusione è stata poi specchiata rispetto al piano destro in modo da avere simmetria.

Sempre attraverso la curva *Spline* si sono ottenuti gli schizzi sul piano frontale e sul piano posteriore della rispettive viste, a meno degli specchietti retrovisori. Gli schizzi ottenuti sono stati utilizzati per modellare il solido fin qui ottenuto. Questa modellazione avviene attraverso lo strumento *Taglio Estruso*. In questo modo, cliccando sull'opzione *ribalta il lato da tagliare*, si va a modificare il modello solido eliminando le parti in eccesso e dandogli l'aspetto delle viste frontale e posteriore.

La stessa procedura viene eseguita sul piano superiore XZ, contenente la vista superiore; effettuando il taglio dello schizzo ricavato, si ottiene un modello con le curvature ricavate dai disegni del design originale. Prima di procedere alla simulazione aerodinamica bisogna rimuovere il più possibile gli spigoli vivi che si sono inevitabilmente formati dopo i processi di taglio: per questo motivo si utilizza lo strumento *Raccordo*. Questo strumento permette di raccordare due o più facce realizzando diversi tipi di raccordo. Per gli spigoli sono stati utilizzati dei raccordi radiali

costanti di raggio che varia tra i 10 e i 30 millimetri a seconda delle facce interessate. Ogni raccordo effettuato è stato fatto simmetricamente, sia sulla semivettura destra che su quella sinistra.

Come ultima cosa si è aggiunto un piano, parallelo al piano destro YZ e distante da questo 700 millimetri. Su questo piano è stato disegnato, sull'assale anteriore e su quello posteriore, uno schizzo contenente un cerchio di raggio pari al raggio degli pneumatici. Questo schizzo è stato estruso ottenendo così gli pneumatici. Si è poi passati al raccordo delle facce degli pneumatici e alla successiva specchiatura rispetto al piano destro YZ.

La riproduzione della presa d'aria frontale è stata fatta attraverso lo schizzo della forma della bocca anteriore sul piano frontale XY e al successivo taglio per una profondità di 160 millimetri.

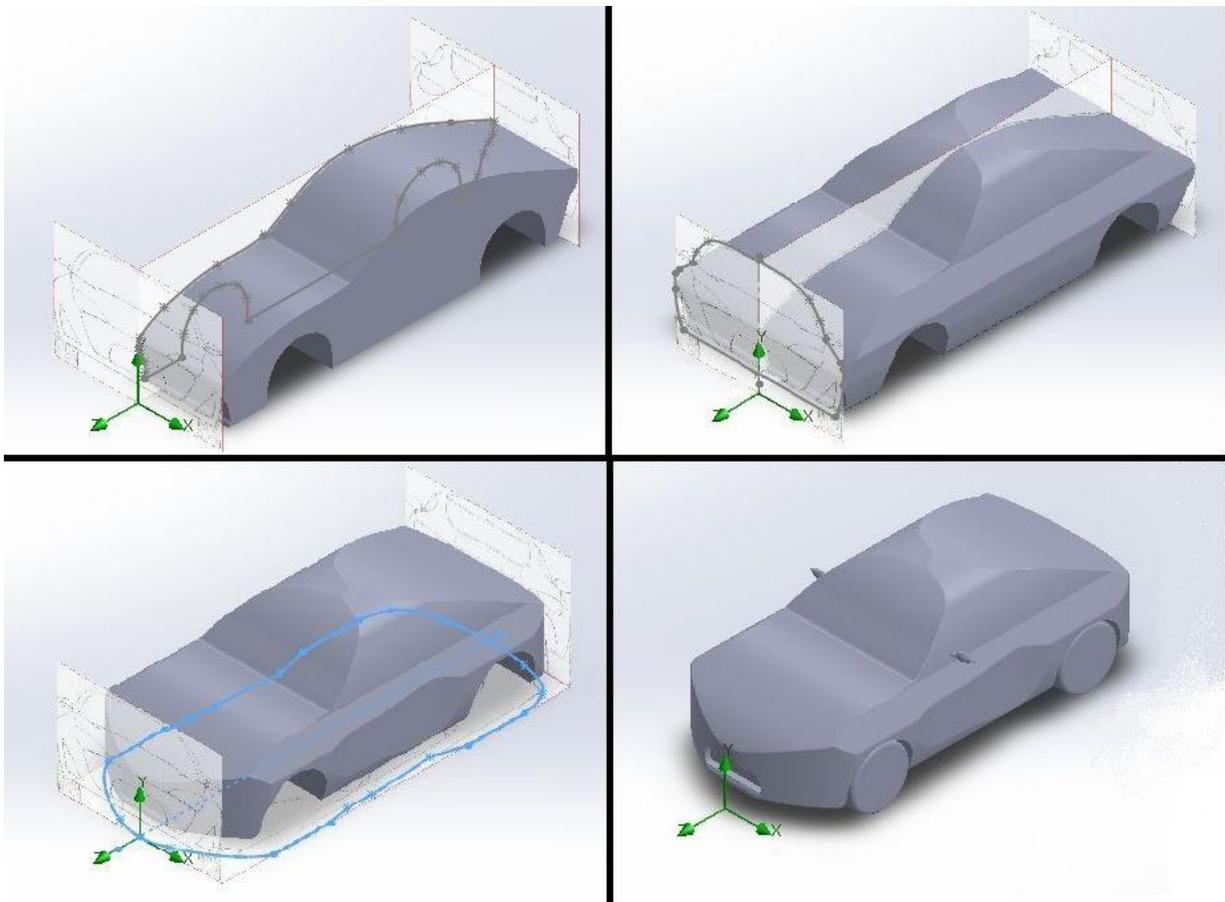


Figura 14 Fasi della modellazione della carrozzeria

Per la realizzazione degli specchietti è stato aggiunto un piano parallelo al piano frontale XY ed è stato collocato all'altezza della sezione maestra degli specchietti retrovisori. Nel progetto originale gli specchietti hanno una forma particolare che richiama quasi una goccia. Nel modello solido sono stati disegnati utilizzando la funzione *Rivoluzione*: come si vede in *Figura 15a*, si è tracciato un asse di simmetria orizzontale e si è disegnata con la *Spline* la parte superiore dello specchietto.

Questa curva, messa in rotazione di 180 gradi attorno all'asse orizzontale precedentemente tracciato, genera così la forma dello specchietto retrovisore (*Figura 15b*). Per la modellazione del supporto dello specchietto si è aggiunto un piano parallelo al piano superiore XZ ed è stato posto in modo che coincidesse con la base inferiore del supporto. Su questo piano è stato fatto uno schizzo che, una volta estruso, richiamasse l'andamento del supporto stesso (*Figura 15c*). Sull'estrusione è stato fatto un raccordo tra facce in modo che prendesse una forma arrotondata (*Figura 15d*).

Il risultato di queste operazioni è stato specchiato rispetto al piano destro YZ in modo da ottenere lo stesso specchietto retrovisore anche sulla fiancata opposta.

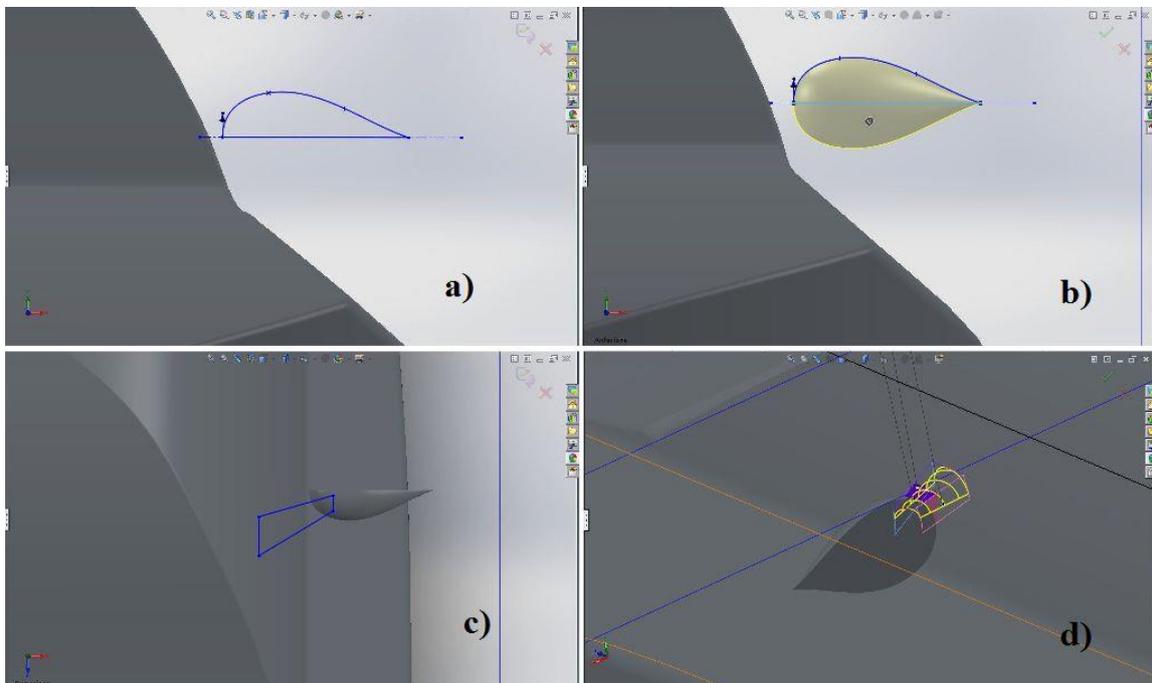


Figura 15 Fasi della modellazione dello specchietto retrovisore

La vettura ottenuta rispecchia così le dimensioni e le forme stabilite in fase di progetto.

Capitolo 3

L'aerodinamica in campo automobilistico

3.1 Introduzione

Qualunque solido in moto traslatorio nell'atmosfera con velocità V , definita come spazio percorso nell'unità di tempo, è soggetto ad una forza aerodinamica F , quale risultante di tutte le azioni che agiscono su di esso; lo stesso vale, per il principio di reciprocità o di relatività galileiana, per un corpo fermo investito da una corrente d'aria, come avviene nella galleria del vento, con una velocità del fluido v . La retta d'azione della forza aerodinamica F ha generalmente una direzione diversa da v . La sua scomposizione presenta due componenti:

- La resistenza R , secondo la direzione della velocità
- La forza deviatrice L , a cui appartiene la portanza

L'aerodinamica è un ramo della fluidodinamica che si concentra sull'analisi delle interazioni tra la corrente fluida ed un corpo immerso in essa. Lo studio di questa scienza ha particolare importanza nel campo automobilistico in quanto l'aria condiziona pesantemente il moto di un veicolo a causa della resistenza che il fluido esercita sul corpo.

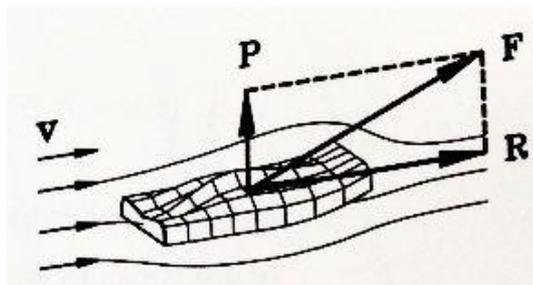


Figura 16 la forza aerodinamica F

Assume particolare importanza il coefficiente di resistenza aerodinamica C_X o C_D . Si tratta di un parametro adimensionale usato per misurare la resistenza aerodinamica di un corpo in moto in un fluido.

3.2 La resistenza aerodinamica

Come si è visto, la resistenza, è la componente della forza aerodinamica nella direzione della velocità.

Considerando la resistenza che un profilo incontra nel suo moto relativo di sola origine viscosa, ed indicandola come resistenza di profilo, questa potrà essere distinta nei seguenti contributi:

- resistenza di attrito R_f , dovuta all'azione diretta degli sforzi tangenziali che si esercitano sulle pareti sia nelle regioni laminari che turbolente degli strati limiti;
- resistenza di scia o forma R_s , che deriva dal mancato recupero di pressione conseguente alla separazione degli strati limiti ed alla formazione delle scie.

Sono valide le seguenti espressioni:

$$R_a = R_f + R_s$$

La resistenza d'attrito R_f di un corpo in movimento viene in genere misurata tramite il coefficiente d'attrito C_f :

$$C_f = \frac{\int_{S_W} \tau dS}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 S_W}$$

Nella quale S_W è la superficie bagnata dal fluido e τ sono gli sforzi tangenziali.

Per un corpo di forma assegnata e con una data posizione relativa rispetto al fluido, il coefficiente di attrito globale C_X dipende dal numero di Reynolds Re della corrente asintotica.

$$Re = \frac{\rho V l}{\mu}$$

Dove μ è la viscosità cinematica.

Sperimentalmente si vede che negli strati limite turbolenti gli sforzi tangenziali, e quindi C_f , sono più elevati di quelli che si incontrano negli strati limite laminari. Altro parametro importante nella resistenza d'attrito è la rugosità superficiale.

Nelle regioni posteriori dei corpi in moto relativo rispetto ad un fluido, gli strati limite si separano e danno origine alle scie, ricche di vortici macroscopici a piccola e grande scala. La resistenza di scia è dovuta a due effetti concomitanti, entrambi dovuti alla viscosità:

- Variazione significativa delle distribuzioni di pressione, rispetto a quelle valutate con teorie di fluido ideale, sulle superfici dei corpi;
- Sensibile diminuzione del livello di pressione sulla base delle geometrie con coda tronca.

Per i corpi tozzi, inoltre, anche ammettendo che i punti di separazione siano localizzati in prossimità delle estremità posteriori, le schiere vorticosi che si dipartono dalle superfici svolgono una continua azione di trascinamento del fluido quasi stagnante presente nelle regioni a poppa, con il risultato che si instaura una ridotta pressione p_b sulle basi tronche, associata alla differenza di pressione tra le regioni anteriori e posteriori dei corpi con coda tronca, che è indicata come resistenza di base.

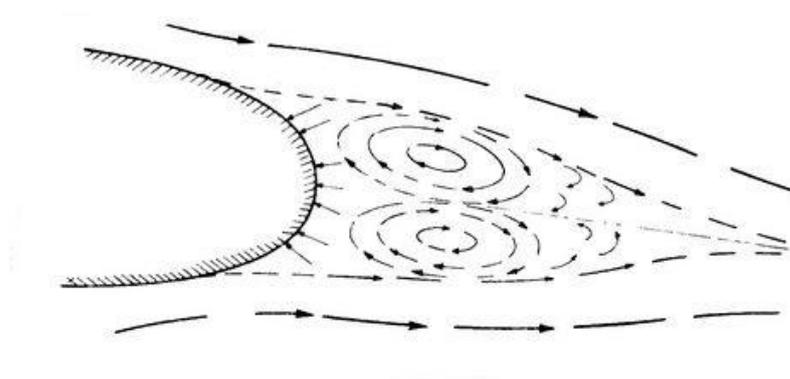


Figura 17 campo di moto nella regione posteriore di un corpo con coda tronca

Un esempio tipico di tale fenomeno si realizza nel moto di una lastra piana ortogonale alla direzione della corrente. In tal caso, infatti, gli sforzi tangenziali sulla lastra non hanno componenti nella direzione del moto, tranne che nelle regioni infinitesime dei bordi laterali, ed è nulla la

resistenza di attrito. La resistenza della lastra è, in effetti, dovuta alla differenza tra la pressione di ristagno sulla faccia esposta alla corrente e la bassa pressione che regna sulla parete a valle.

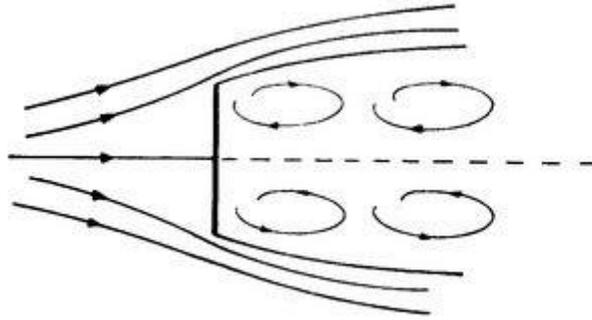


Figura 18 Campo di moto attorno a una lamina piana ortogonale alla direzione della corrente

Si deve anche tenere conto di un altro tipo di resistenza, chiamata resistenza indotta. Questa è generata da sistemi di vortici longitudinali presenti sulla superficie del veicolo a causa di gradienti di pressione esistenti, per esempio, tra il cofano e il fondo del veicolo.

3.3 Evoluzione in campo automobilistico: dalle carrozze alle vetture dei giorni nostri

All'epoca in cui il cavallo da tiro fu sostituito dal motore termico, nessuno pensava all'aerodinamica. L'obiettivo delle vetture, a quel punto senza cavalli, era, come prima, quello di riparare conducente e passeggeri da vento, pioggia e fango. L'idea di applicare l'aerodinamica ai

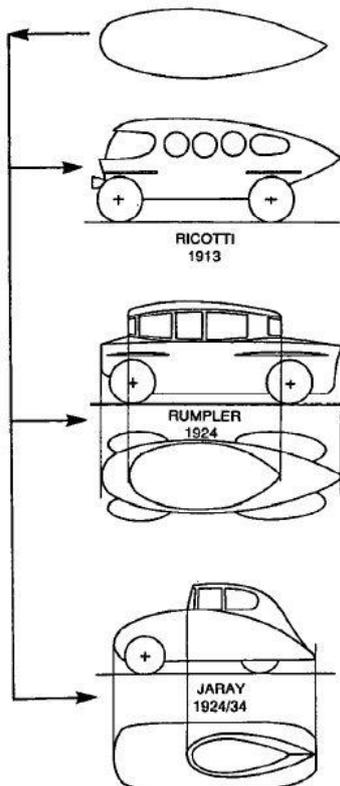


Figura 19 I primi studi aerodinamici su veicoli da strada

veicoli da strada arrivò molto tempo dopo, successivamente ai considerevoli progressi che erano stati compiuti nel campo dell'aviazione. Sia per i dirigibili che per gli aerei vennero sviluppate forme aerodinamiche in grado di abbassare significativamente la resistenza, consentendo ai velivoli di raggiungere velocità di crociera più elevate, con motori di qualsiasi (limitata) potenza.

I primi tentativi di costruire vetture aerodinamiche conciliando la pratica aeronautica ed adattando le forme dell'architettura navale, fallirono per due semplici motivi: in primo luogo, i benefici dell'aerodinamica erano, semplicemente, non necessari. Le cattive condizioni delle strade e la scarsa potenza erogata dai motori non consentivano infatti che una moderata velocità di guida. In secondo luogo, l'idea di trapiantare direttamente e senza l'apporto di sostanziali modifiche, forme concepite per scopi marini ed aeronautici era assolutamente inappropriata. Tali forme aerodinamiche si sarebbero potute adattare solo se subordinate ad alcuni importanti dettagli propri al design della vettura, come ad esempio la collocazione del motore e la struttura dell'abitacolo.

La lunga strada percorsa da allora fino ai giorni nostri in materia di aerodinamica applicata al campo dell'industria automobilistica può essere riassunta evidenziando solo gli eventi decisivi.

Si possono quindi identificare 5 momenti:

1) la constatazione che lo schema del flusso intorno ad un corpo in movimento si modifica significativamente qualora questo venga avvicinato al suolo (Klemperer 1922, *Figura 20*).

2) L'accorciamento dell'estremità posteriore di un corpo (Koenig-Fachsenfeld 1936, Kamn 1933, *Figura 20*).

3) L'introduzione della "ottimizzazione dei dettagli" nello sviluppo dei veicoli.

4) La decifrazione dei dettagliati schemi dei flussi sul retro delle auto.

5) L'applicazione di "optionals" come spoiler, minigonne ed ali ad auto per il trasporto passeggeri, camion ed auto da corsa.

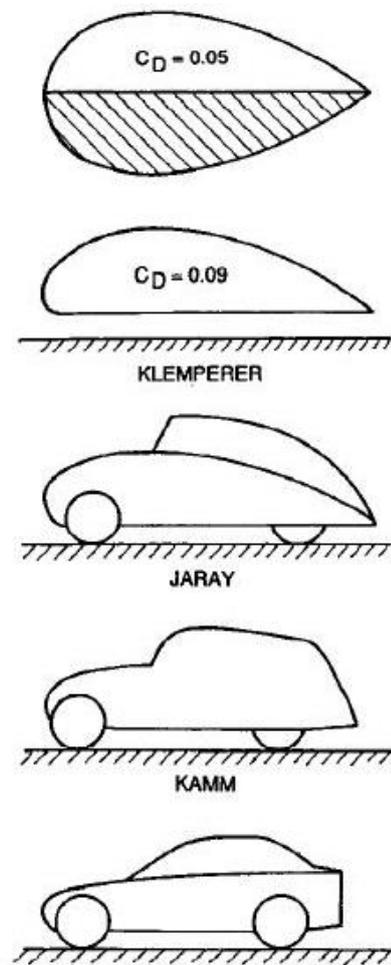


Figura 20 Le idee principali che hanno contribuito allo sviluppo dell'aerodinamica

Grazie a questi 5 passi, la configurazione dei veicoli non è stata subordinata all'aerodinamica ma, al contrario, l'aerodinamica stessa è stata adattata ai veicoli da strada; la forma dei veicoli, nel corso degli anni, è cambiata evolutivamente, piuttosto che rivoluzionariamente, a prescindere dall'aerodinamica. Il gusto, forse influenzato dalle seducenti forme degli aerei, imponeva corpi lisci con fari e paraurti integrati e le tecnologie produttive resero tutto possibile.

Flussi sulle auto migliorati e resistenze minori non furono che una conseguenza, ma finalmente le due crisi petrolifere degli anni 70 imposero il bisogno di un drastico miglioramento per quanto riguardava il risparmio di carburante, dando così la svolta decisiva all'aerodinamica dei veicoli.

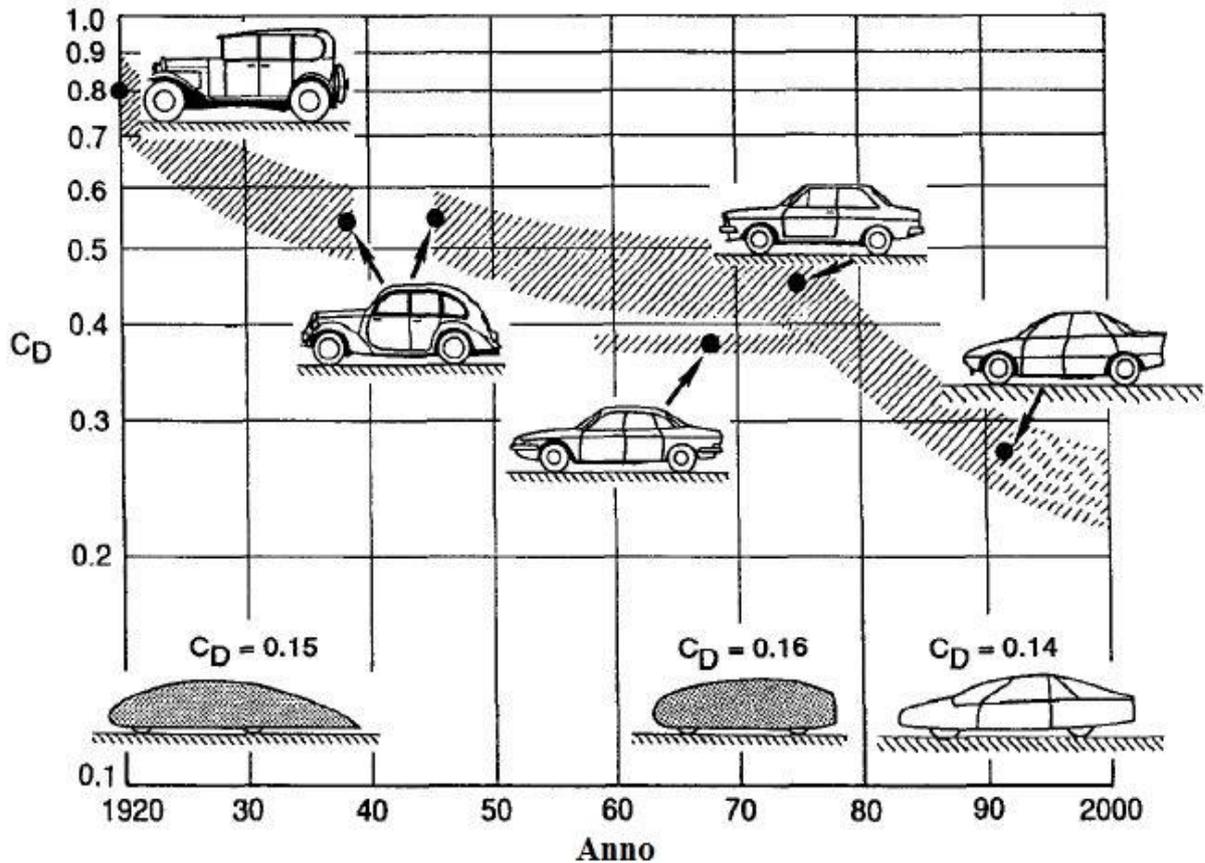


Figura 21 Evoluzione del coefficiente di resistenza delle auto. Usando una scala logaritmica si può vedere quanto sia difficile ottenere un valore molto basso di resistenza

Da allora i coefficienti di resistenza sono calati drasticamente, contribuendo nella misura più significativa agli enormi miglioramenti ottenuti nel risparmio del carburante.

3.4 Formule per il calcolo sperimentale della resistenza aerodinamica

Si ipotizzi un'automobile isolata, in un flusso in quiete, all'infinito, senza interferenze e senza risentire dell'appoggio al suolo. Si può ritenere che la componente R , meglio detta resistenza aerodinamica R_a , sia definibile in funzione della variazione della pressione p_0 nella corrente, che si genera davanti e dietro al corpo in moto. Per una pressione statica o locale p , il valore medio

dell'aumento di pressione davanti al corpo sarà Δp_0 , mentre $\Delta'p_0$ sarà il valore medio della depressione dietro al corpo; definendo con S la superficie maestra del veicolo, la resistenza risulterà quindi:

$$R_a = S[(p + \Delta p) - (p - \Delta'p)] = S(\Delta p + \Delta'p)$$

Le variazioni di pressione, dovute alle diverse velocità di scorrimento della vena fluida intorno al corpo in movimento, sono proporzionali alla pressione dinamica P_d secondo il teorema di Bernoulli.

$$P_d = \frac{1}{2}\rho v^2$$

Qui, oltre alla velocità v , si considera anche la densità, come il rapporto tra la massa e il volume del fluido, e ci si riferisce a gas perfetti in moto stazionario, ovvero a fluidi incomprimibili, prescindendo cioè dalla loro viscosità. In altre parole, il teorema di Bernoulli può scriversi così:

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p = \text{cost}$$

In questo modo si indica costante la somma dell'energia cinetica, indicata dal primo termine dell'equazione, e dell'energia potenziale o di pressione. Vi è quindi un legame di proporzionalità tra la pressione dinamica P_d e le variazioni di pressioni $\Delta p + \Delta'p$ e, se si assume un coefficiente di proporzionalità definito come coefficiente di resistenza C_x , si avrà:

$$C_x = \frac{\Delta p + \Delta'p}{\frac{1}{2}\rho v^2} = \frac{R_a}{\frac{1}{2}\rho S v^2}$$

Con questa formula si giunge alla definitiva formulazione della resistenza aerodinamica di un solido in moto nell'atmosfera. Introducendo il peso specifico γ dell'aria, espresso in Kg/m^3 è possibile vedere la densità come il rapporto tra γ e l'accelerazione di gravità $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$.

Con questa sostituzione si arriva alla formula finale per il calcolo della resistenza aerodinamica:

$$(3.4.1) \quad R_a = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{g} S C_x V^2 \quad [\text{Kg}]$$

Un'ulteriore semplificazione della formula la si può ottenere ponendo:

$$\rho' = \frac{\gamma}{2g}$$

E, per $\gamma = 1,2257 \text{ kg/m}^3$ al livello del mare si avrà $\rho' = 0,0625$.

Nel calcolo della resistenza all'avanzamento di un autoveicolo, anziché riferirsi alla forza che si oppone al suo movimento, è preferibile esprimersi in termini di potenza, ovvero di potenza assorbita dalla resistenza aerodinamica N_a , sia in cavalli [CV] che in kilowatt [kW].

Essendo la potenza uguale al prodotto di una forza per una velocità e assumendo la velocità V in Km/h, la potenza aerodinamica è facilmente ottenibile dalla formula della resistenza; infatti:

$$(3.4.2) \quad N_a = \rho' S C_x \frac{V^2}{3,6} \frac{1}{75} \frac{V}{3,6} \quad [\text{CV}]$$

Dove il termine $1/75$ è il fattore di conversione in cavalli e il termine $3,6$ a denominatore è per la conversione delle velocità in m/s.

Capitolo 4

Simulazioni ed elaborazione dei risultati ottenuti

4.1 Simulazione con Flow Simulation ed elaborazione dei dati per il calcolo del coefficiente di resistenza

Si vuole ora ricavare il coefficiente di resistenza del modello dell'Astura creato in SolidWorks. Come si è visto nelle formule precedenti, il C_x dipende anche dalla velocità del corpo nel fluido; non è possibile calcolare un unico coefficiente di resistenza. La simulazione verrà quindi eseguita a diverse velocità. Per sapere il valore della resistenza aerodinamica generata dalla vettura che si muove all'interno di un fluido ad una determinata velocità, si procederà mettendo il modello della vettura all'interno di questa galleria del vento fittizia e si creerà una corrente che investirà il corpo alla velocità considerata. Al termine della simulazione il programma fornirà il valore della resistenza aerodinamica generata.

Per prima cosa si crea un nuovo progetto in ambiente *Flow Simulation*, cliccando sulla voce *wizard*. Si assegna un nome al progetto della simulazione e si clicca avanti per andare alla schermata successiva. Qui si impostano le unità di misura che si vogliono utilizzare (*Figura 22a*). Nella schermata successiva (*Figura 22b*) si stabilisce se si desidera effettuare un'analisi interna o esterna; in questo caso sarà esterna. Si spuntano inoltre le caselle che consentono di escludere le cavità e gli spazi interni.

La schermata seguente (*Figura 22c*) serve per la scelta del fluido. Nello studio in questione sarà sufficiente cliccare su *aria*. Le schermate successive servono per specificare eventuali condizioni al contorno, le condizioni iniziali e quelle finali.

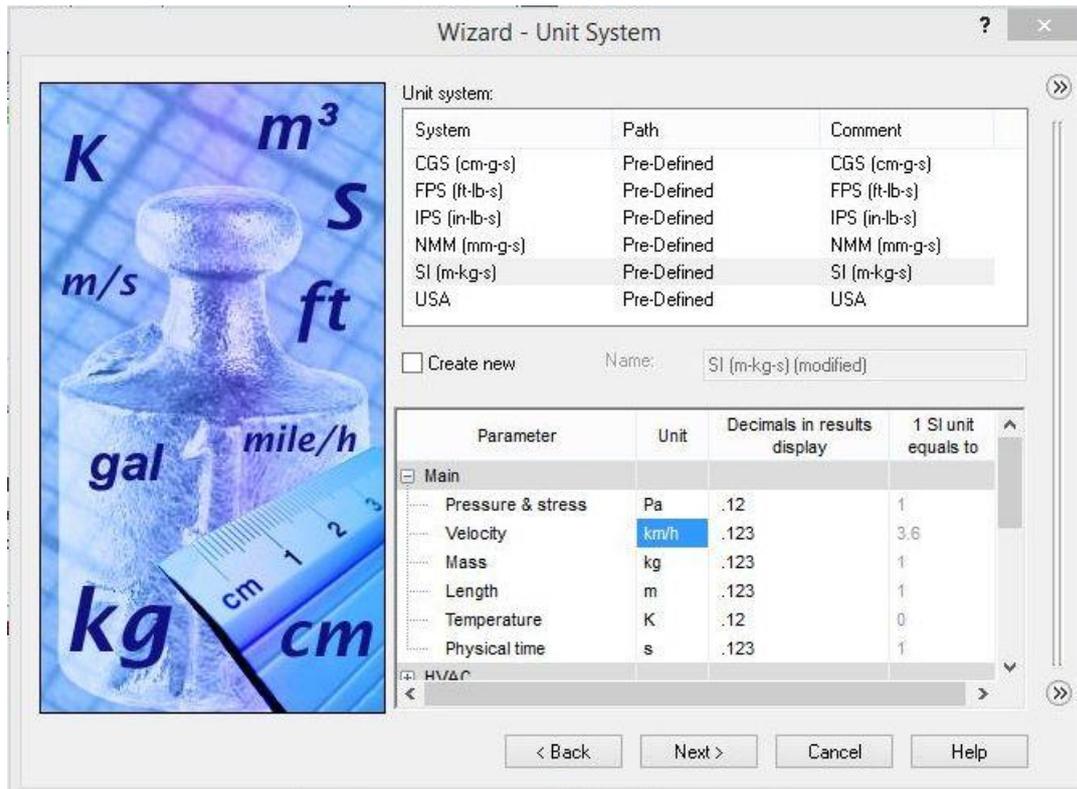


Figura 22a Configurazione del wizard: scelta delle unità di misura

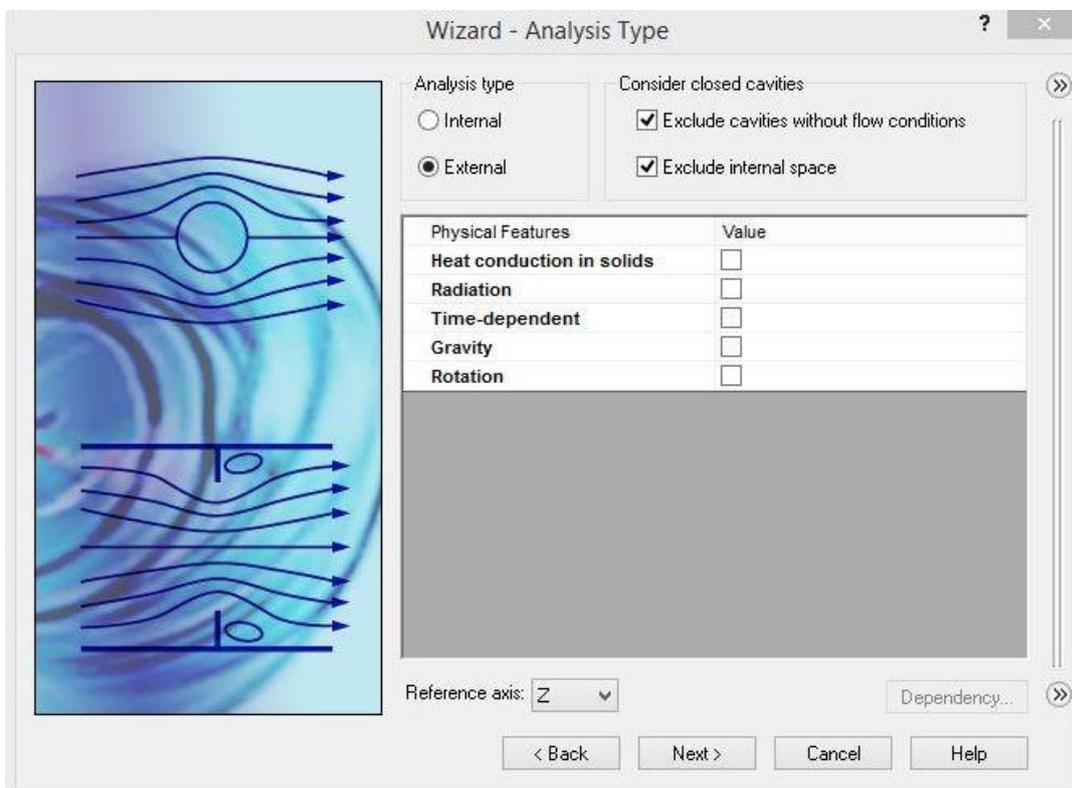


Figura 22b Configurazione del wizard: tipo di analisi

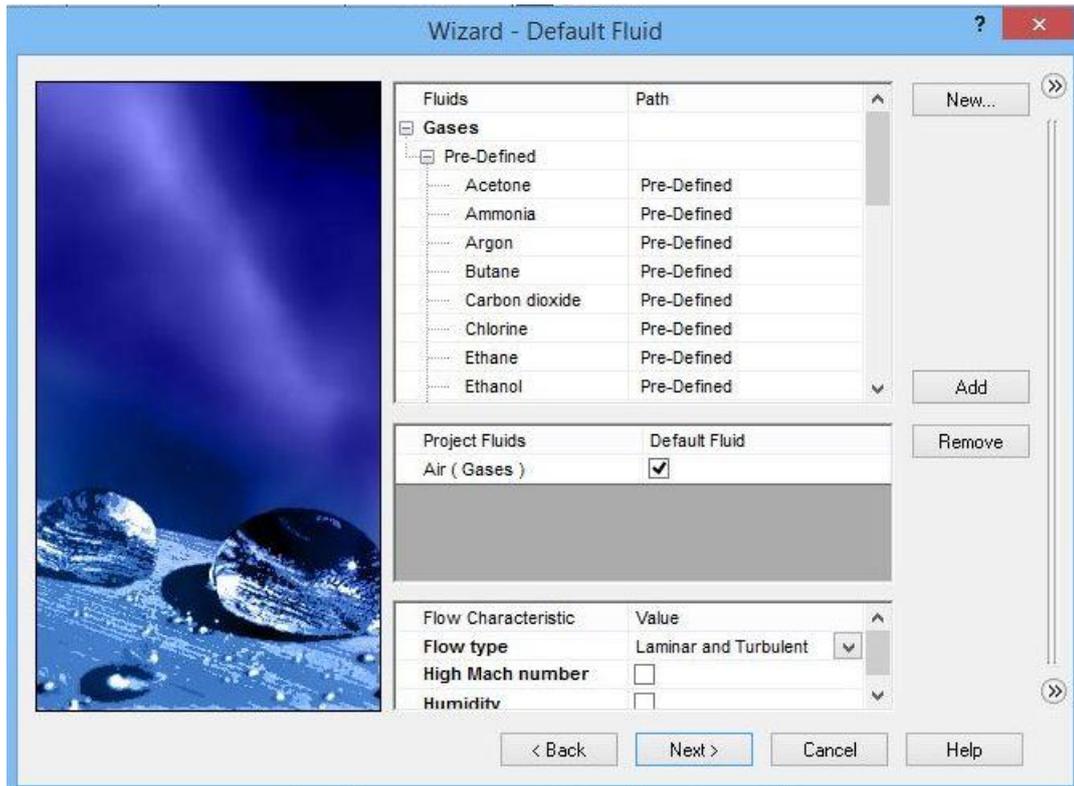


Figura 22c Configurazione del wizard: scelta del fluido

Trattandosi di una simulazione di una galleria del vento, verranno fatti più studi con diverse velocità. Si sono scelte le velocità più rappresentative: 50 Km/h, 90 Km/h, 110 Km/h, 130 Km/h, 150 Km/h, 200 Km/h e 250 Km/h. Sarà sufficiente inserire una di queste velocità lungo l'asse longitudinale del sistema di coordinate del progetto (Asse Z). Essendo l'asse in questione orientato nella direzione del moto, la velocità indicata nella schermata del *wizard* avrà segno meno in modo che vada incontro alla vettura. (Figura 22d).

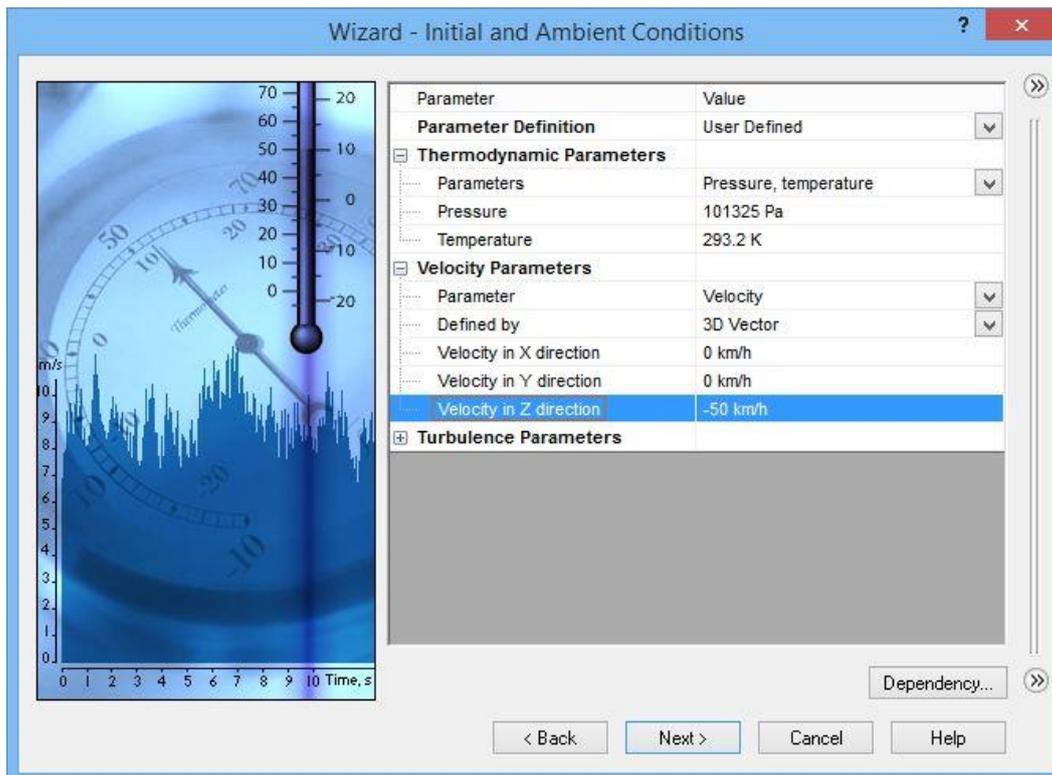


Figura 22d Configurazione del wizard: condizioni iniziali e ambientali

Nell'ultima schermata si chiude la configurazione del *wizard* selezionando il grado di accuratezza della simulazione. Questo parametro va da 1 a 8: un buon compromesso per avere risultati validi senza appesantire troppo il lavoro di calcoli che deve sostenere il calcolatore e il livello 4.

Una volta configurato il progetto si imposta il dominio computazionale: questo rappresenta la galleria del vento fittizia.

In questo modo si delimita l'area all'interno della quale si vuole effettuare lo studio. Si imposta quindi il limite inferiore del dominio tangente alle ruote della vettura, il limite superiore oltre la capote, mentre i limiti frontale e posteriore saranno collocati non troppo lontani dalle rispettive parti anteriore e posteriore dell'automobile. E' bene non esagerare con le dimensioni del dominio computazionale perché, maggiore è il volume dell'area scelta, più tempo sarà richiesto dall'elaboratore per svolgere i calcoli ed inoltre si rischia che i risultati siano errati.

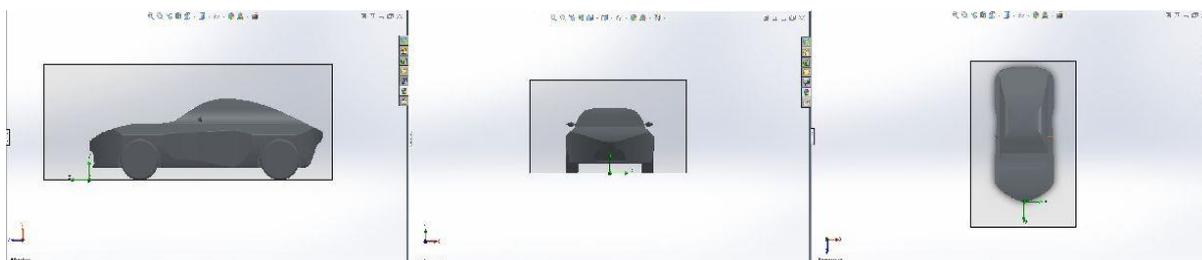


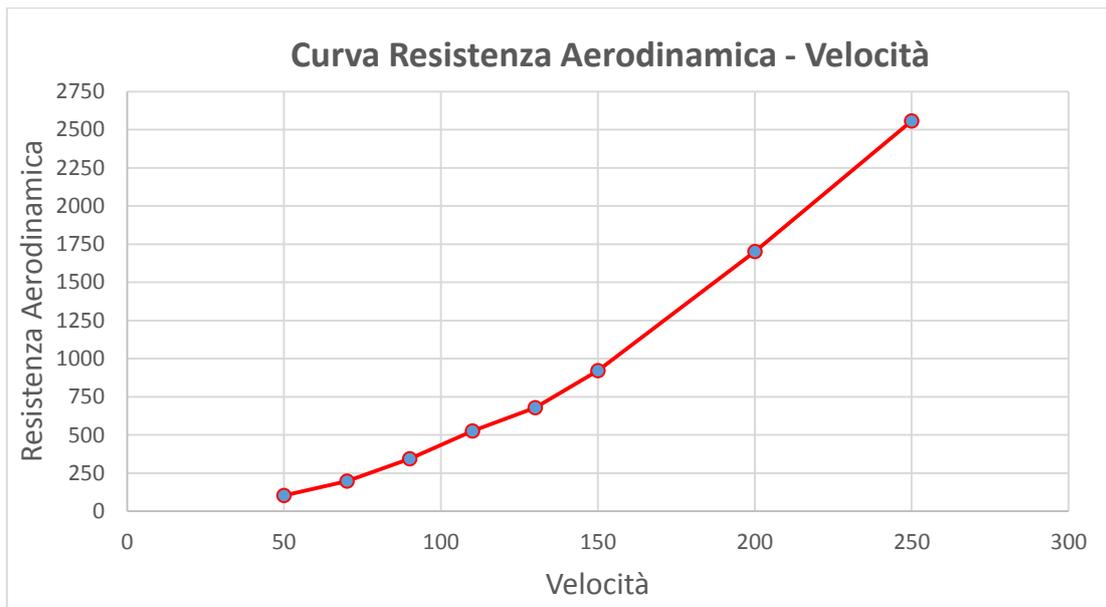
Figura 23 Viste laterale, frontale e superiore della vettura in galleria del vento

Prima di poter eseguire la simulazione bisogna stabilire cosa deve essere calcolato: l'obiettivo di questo studio è quello di calcolare la forza di resistenza R_a generata. Per ottenerla si inserisce un *Global Goal* e si spunta la voce *Force (Z)*.

I dati ottenuti dalle simulazioni sono racchiusi nella seguente tabella:

VELOCITA' [Km/h]	RESISTENZA AERODINAMICA R_a [N]
50	104,19
70	198,179
90	344
110	524,987
130	679,239
150	921,55
200	1700,67
250	2557,06

Tabella 1 Risultati simulazione vento frontale



Dalla formula 3.4.1, con l'opportuno inserimento di ρ' , si riesce ad ottenere il valore del parametro SC_x :

$$SC_x = \frac{R_a}{V^2 \rho'} \quad [m^2]$$

Dove R_a deve essere espressa in chilogrammi e la velocità V in metri al secondo.

A volte è più sensato considerare il prodotto SC_x piuttosto che il solo C_x , ad esempio per confrontare l'aerodinamica di due vetture. Si è visto che anche la superficie frontale S influisce sulla resistenza aerodinamica e quindi sulla potenza. A parità di C_x sarà più efficiente l'automobile con superficie frontale minore; si vedano gli esempi in *Tabella 2*.

Modello	Superficie frontale	C_x	SC_x
Alfa Romeo GT '03	1,99	0,34	0,6766
Audi A3 2.0 TDI '03	2,13	0,32	0,69
Audi Allroad quattro '00	2,3	0,35	0,805
BMW X3 '03	2,5	0,35	0,875
VW Golf '03	2,22	0,32	0,7104

Tabella 2 Confronto tra C_x e SC_x

Per avere il solo coefficiente di resistenza C_x bisogna calcolare l'area della sezione maestra del modello. Questa è facilmente ottenibile attraverso SolidWorks: si fa uno schizzo del perimetro della vista frontale e lo si importa in un nuovo file. Lo schizzo importato viene estruso generando la sezione maestra e, grazie alla funzione *Misura*, selezionando la faccia della sezione che ci interessa, SolidWorks ne calcola automaticamente l'area.

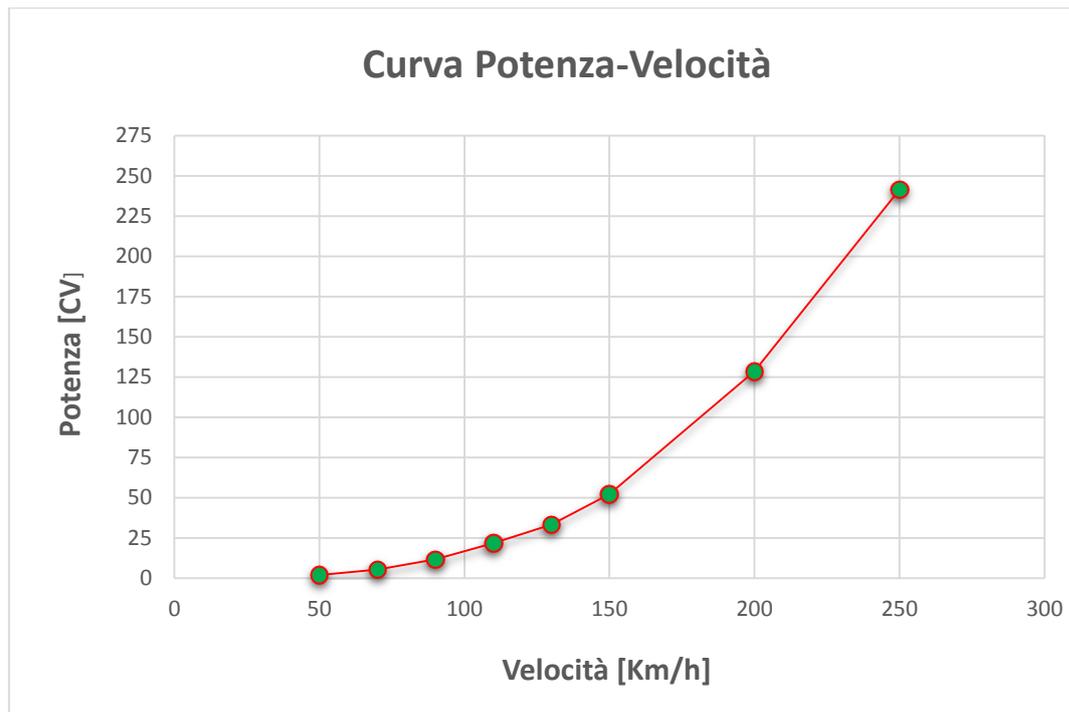
Si ha quindi:

$$S = 2,09 \quad [m^2]$$

Si ottiene quindi la seguente tabella contenente la potenza aerodinamica N_a , il parametro SC_x e il coefficiente di resistenza C_x :

VELOCITA' [Km/h]	POTENZA AERODINAMICA [CV]	SC_x [m²]	C_x [m]
50	1,966814	0,880931229	0,421498196
70	5,237486	0,854904355	0,409045146
90	11,68875	0,897696228	0,429519726
110	21,80261	0,9171052	0,438806316
130	33,33751	0,849555755	0,406486007
150	52,18881	0,865749725	0,414234318
200	128,4154	0,898702679	0,430001282
250	241,3505	0,864802384	0,413781045

Tabella 3 Elaborazione risultati simulazione vento frontale



Facendo la media del C_x ottenuto nelle simulazioni, si ottiene il C_x medio:

$$C_{xm} = 0,420421504$$

4.2 Metodi di ottimizzazione del coefficiente di resistenza

Come visto, il coefficiente di resistenza medio ottenuto è di 0,42. Il valore è all'interno del range previsto per le automobili, ovvero [0,25 ; 0,5]. Questo valore è il risultato di una simulazione su un modello approssimato. La geometria del modello ne influenza sicuramente il risultato: un andamento più sinuoso delle linee della carrozzeria ridurrebbe i distacchi di vena fluida, diminuendo quindi la resistenza.

L'esperienza in campo automobilistico ha portato a degli accorgimenti utili ad ottenere benefici sulla resistenza.

Ad esempio, una piccola correzione della forma dell'estremità anteriore del veicolo riduce la resistenza del 6%. Le forme 3, 4, 5 in *Figura 24* rappresentano delle varianti che riducono la resistenza del 10%. Le forme 6 e 7 mostrano significative modifiche rispetto alla forma 1 e comportano una riduzione della resistenza del 14%.

Da prove di questo tipo è risultato che il ‘front end’ ottimale è quello costruito in modo che la corrente attorno alla parte anteriore dell’automobile non si separi.

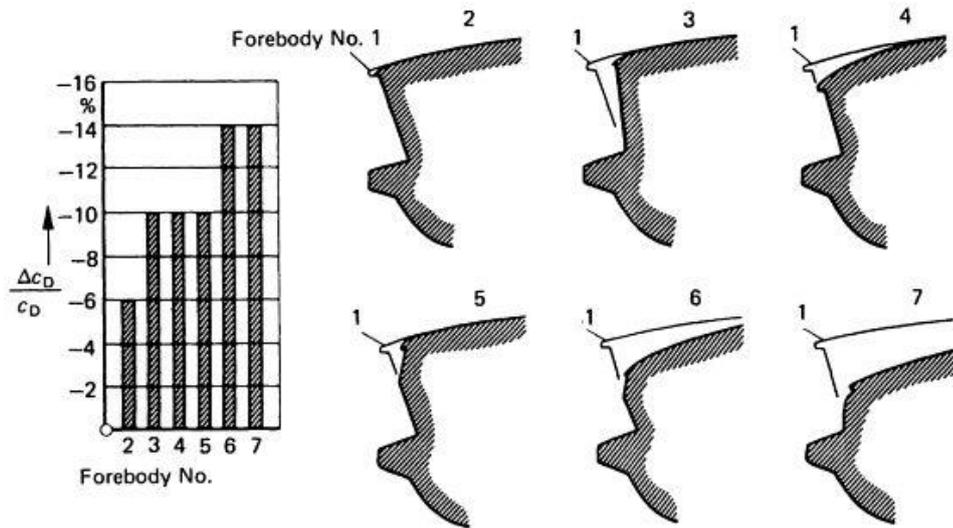


Figura 24 Diverse geometrie front end e benefici

Anche il parabrezza è oggetto di studio; dalla Figura 25 si può vedere come, all’aumentare dell’angolo γ di inclinazione del parabrezza, il punto di separazione S si sposti verso la parte anteriore e il punto di riattacco R verso il retro. Si è stabilito che, se il parabrezza diventa piatto, la resistenza aerodinamica diminuisce.

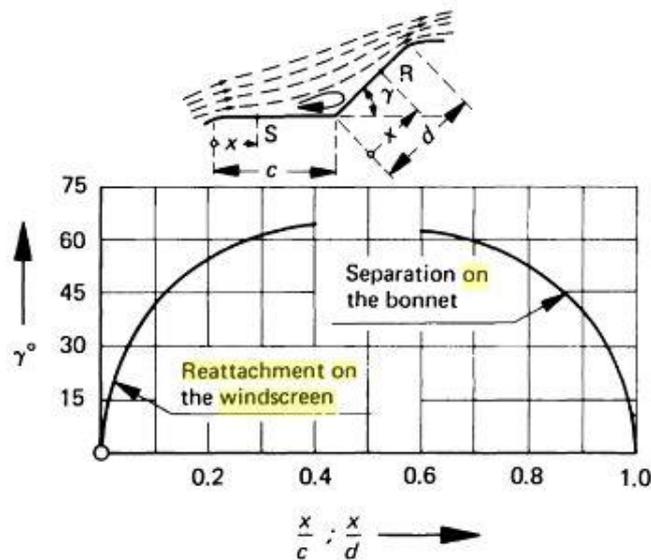


Figura 25 Influenza dell’angolo di inclinazione del parabrezza sulla separazione dello strato limite

L'influenza diretta dell'inclinazione del parabrezza sulla resistenza è, comunque, limitata e riconducibile a due effetti principali:

- la velocità nella zona del montante del parabrezza ("A-pillar" in termini anglosassoni) è minore e ciò porta ad una minore perdita di quantità di moto;
- la deflessione della corrente, nella zona di transizione parabrezza-tetto, è minore e questo implica una minore perdita di quantità di moto nello strato limite, permettendo un recupero di pressione maggiore nella parte posteriore della vettura.

Con le moderate curvature laterali dei parabrezza odierni, a livello dell' A-pillar si ha separazione sotto forma di vortici tridimensionali. Il campo di moto risultante è simile a quello di un'ala a delta ad elevati angoli di incidenza.

Un valido modo per ridurre la resistenza aerodinamica è quello di arrotondare l'A-pillar e di fare in modo che il finestrino rientri il meno possibile rispetto allo stesso.

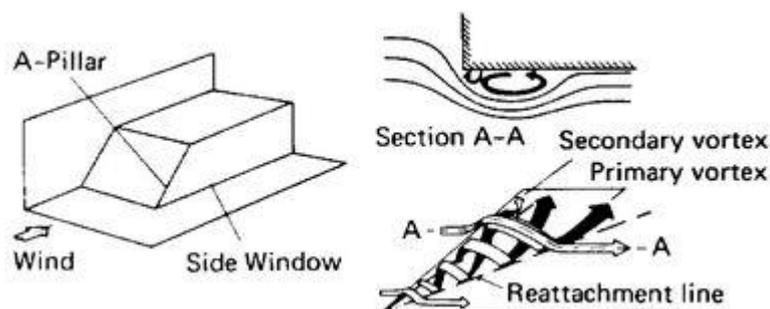


Figura 26 Vortici tridimensionali attorno al montante anteriore

Un ulteriore beneficio si può avere con l'introduzione di spoiler anteriori e posteriori.

Il compito dello spoiler è quello di provocare il distacco e la separazione del flusso, riducendone la velocità e creando un aumento di pressione. Benché la funzione primaria di uno spoiler posteriore sia quella di aggiungere aderenza tramite la nascita di deportanza, in alcune situazioni può anche creare una diminuzione dell'attrito, a seconda dell'altezza dello spoiler stesso, della sua angolazione e della sua lunghezza e sporgenza rispetto al piano. Più l'angolo di attacco sarà verticale, maggiore sarà l'aderenza a spese dell'aumento di attrito. L'esatto risultato varia da veicolo a veicolo e può essere determinato solo empiricamente.

4.3 Influenza di uno spoiler posteriore sulla resistenza aerodinamica

Si è provato ad inserire uno spoiler posteriore sul modello in SolidWorks per vedere l'influenza dello spoiler sulla resistenza aerodinamica.

Per il disegno dell'appendice aerodinamica si è preso esempio dallo spoiler presente su Alfa Romeo 4c.



Figura 27 Spoiler posteriore Alfa Romeo 4c

Per dare allo spoiler la stessa curvatura del retro della vettura si è inserito lo schizzo nel “albero di disegno Feature Manager” prima della funzione di taglio fatta dallo schizzo della vista sul piano superiore XZ; così facendo, una volta che si va ad eseguire il taglio seguendo le linee della vista superiore, lo spoiler verrà automaticamente modellato seguendo il disegno del posteriore della vettura.

Si è quindi creato sul piano destro YZ uno schizzo del profilo con lo strumento *Spline*. Lo schizzo è stato poi chiuso con due segmenti ortogonali.

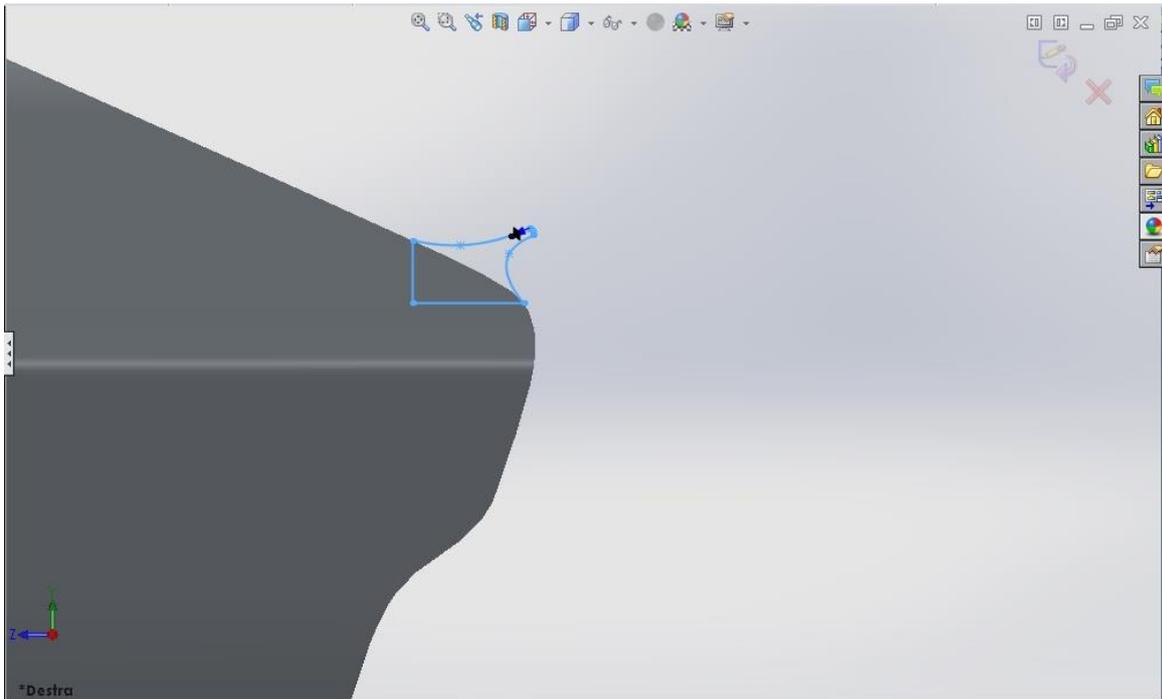


Figura 28 Schizzo dello spoiler posteriore

Disegnato lo schizzo lo si è estruso in entrambe le direzioni in modo che coprisse l'intera larghezza del posteriore della vettura non ancora sagomato. A questo punto si è abilitato il taglio dello schizzo dalla vista superiore e lo spoiler si è automaticamente modellato. Sono stati fatti due raccordi sull'estremo dello spoiler in modo da togliere le sfaccettature dovute al taglio.

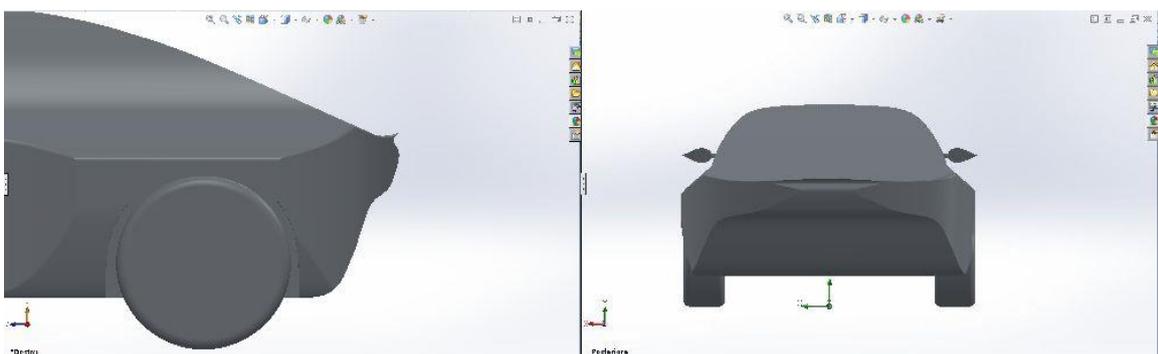


Figura 29 Vista laterale e posteriore dello spoiler posteriore modellato

Una volta creato lo spoiler si sono eseguiti nuovamente i test effettuati precedentemente con SolidWorks, mantenendo le medesime velocità, per vedere in che modo lo spoiler posteriore influisce sulla resistenza aerodinamica.

I risultati ottenuti sono i seguenti:

VELOCITA' [Km/h]	RESISTENZA AERODINAMICA R_a [N]
50	103,33
70	197,33
90	339,935
110	525,935
130	713,272
150	972,34
200	1650,73
250	2735,6

Tabella 4 Risultati simulazione vento frontale con spoiler posteriore

Come si può osservare, confrontando i dati ottenuti in galleria del vento per il modello con lo spoiler con quelli del modello senza spoiler, si ha un lieve calo della resistenza per velocità inferiori ai 110 km/h. Superata questa velocità, la resistenza aerodinamica aumenta per poi tornare a valori simili al modello senza spoiler. Questo perché, su auto con geometria posteriore di questo tipo, lo spoiler non dà grandi benefici dal punto di vista della resistenza, bensì serve principalmente per aumentare il carico sulle ruote, creando deportanza.

Dal punto di vista della resistenza, lo spoiler crea una turbolenza di scia che aumenta di intensità con l'aumentare della velocità, generando quindi un aumento di resistenza.

4.4 Campo di flusso attorno ad un'automobile

Una vena fluida, come una corrente d'aria, che incontra un corpo, ad esempio un veicolo, viene da quest'ultimo disturbata, dovendo modificare il proprio moto. Il contatto tra la vena fluida e la testa

del veicolo impone alla prima di fermarsi localmente e spostarsi per riprendere il proprio moto cercando di adattarsi alla geometria sulla quale deve scorrere. Questi spostamenti di volume sono molto complessi e possono diventare caotici quando devono affrontare geometrie particolari, come gli spigoli vivi.

Generalmente, il flusso attorno ad un'automobile in movimento è asimmetrico rispetto al suo asse longitudinale perché è difficile trovarsi in una condizione di assoluta assenza di vento. La velocità di guida V si combina quindi con la velocità del vento v_w e produce una velocità relativa U_∞ con un angolo con un angolo β .

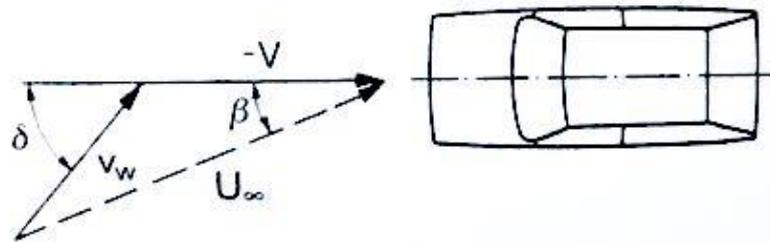


Figura 30 Velocità del vento e del veicolo si combinano creando la velocità relativa U_∞

La presenza di una componente del vento diretta in maniera trasversale rispetto alla direzione del moto del veicolo può portare a tre conseguenze:

- Ribaltamento
- Spostamento laterale
- Imbardata

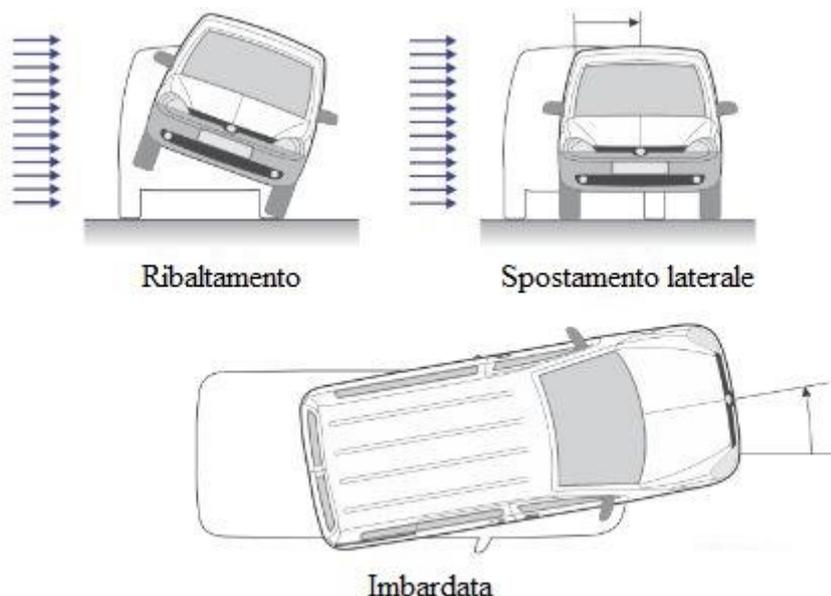


Figura 31 Conseguenze in caso di vento laterale

Il compito di contrastare la forza generata dal vento ed evitare l'innescarsi dei fenomeni sopracitati spetta agli pneumatici ed, in particolare, all'aderenza che si genera al contatto pneumatico-pavimentazione.

4.5 Il concetto di attrito e di aderenza

L'attrito tra due superfici a contatto è causato dalle caratteristiche delle due superfici e dalla forza con la quale le due superfici sono "schiacciate" l'una contro l'altra. Le superfici, infatti, sono in realtà irregolari, sia a livello microscopico che a livello macroscopico, e l'area reale di contatto è solo una parte di quella apparente totale. Tanto è maggiore la forza di compressione tra le due, tanto più le deformazioni elastiche e plastiche delle due superfici aumentano l'area di contatto reale e creano una sorta di "incastro" tra queste irregolarità. Dal punto di vista microscopico, esso è dovuto alle forze di interazione tra gli atomi dei materiali a contatto.

Il moto di rotolamento di una ruota su un piano risulta dalla composizione del moto di rotazione intorno all'asse della ruota e dalla traslazione dell'asse parallelamente al piano. Se si considera la ruota motrice di un veicolo, sul suo asse agisce un momento torcente M trasmesso dal motore che tende a farla girare attorno all'asse di rotazione O . Il momento torcente M può pensarsi sostituito da due forze $+T$ e $-T$, di valore pari a M/r , applicate in O ed in C , punto di contatto ruota-piano. P è il carico agente sulla ruota; R è la somma di tutte le resistenze al moto che si oppongono all'avanzamento del veicolo; A è la reazione tra le due superfici a contatto (pavimentazione e pneumatico) nel punto C .

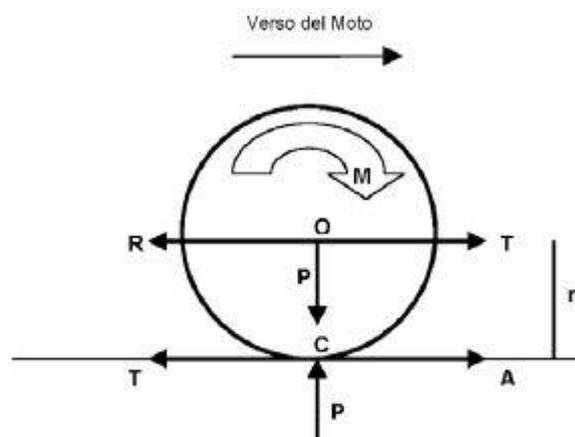


Figura 32 Schematizzazione delle forze durante il moto di rotolamento di una ruota sul piano

La ruota si comporta come un corpo vincolato in O ed in C in cui nascono delle reazioni vincolari le cui componenti parallele alla direzione del moto sono rispettivamente R ed A .

Possono quindi verificarsi tre condizioni diverse:

1. $T < R$

$$T < A_{lim}$$

Le forze di resistenza R e di reazione A sono superiori alle forze di trazione T applicate alla ruota per cui essa resta in equilibrio e non si muove

2. $T > R$

$$T < A_{lim}$$

La resistenza R è inferiore alla forza di trazione T in O ma la reazione A è superiore alla forza di trazione T in C : trasla solo il punto O ed il punto C resta fermo

3. $T < R$

$$T > A_{lim}$$

La resistenza R è superiore alla forza di trazione T in O ma la reazione A è inferiore alla forza di trazione T in C : il punto O resta fermo e la ruota slitta

Pertanto, affinché il veicolo si muova, è necessario che ci si trovi nella situazione 2, ovvero si verifichi una rotazione istantanea attorno al punto C , detto Centro di Istantanea Rotazione. In questo caso il moto della ruota è la composizione contemporanea di due moti: traslazione del punto O e contemporanea rotazione attorno al punto O . In definitiva, affinché si abbia rotolamento e non slittamento, occorre che lo sforzo di trazione T sia almeno pari alle resistenze ma che sia inferiore alla reazione tangenziale della strada:

$$\frac{M}{r} = T \geq R$$

$$\frac{M}{r} = T < A_{lim}$$

Quanto detto fino ad ora permette di comprendere l'importanza della reazione A necessaria sia per permettere la traslazione del veicolo sia per garantirne la sicurezza in frenatura.

A prende il nome di forza di aderenza ed il suo valore limite A_{lim} è proporzionale, attraverso un coefficiente di aderenza μ , alla componente perpendicolare al piano viabile della forza che grava sulla ruota. Questa forza corrisponde normalmente alla quota parte del peso del veicolo agente sulla ruota. Ne segue che per aumentare la forza di aderenza è opportuno aumentare più possibile il peso gravante sulle ruote:

$$A_{lim} = \mu \cdot P$$

Per valutare la reazione di aderenza, ovvero il coefficiente di aderenza μ , è innanzitutto necessario rilevare che in realtà, a differenza di quanto visto nel precedente schema teorico dell'attrito radente, affinché si sviluppi una reazione di aderenza è necessario che vi sia uno scorrimento relativo Ψ tra pneumatico e pavimentazione.

L'andamento del coefficiente di aderenza μ in funzione dello scorrimento Ψ è rappresentato in *Figura 33*. Le misure sono solitamente condotte in senso longitudinale, cioè nella direzione del moto, oppure in senso ortogonale e danno origine ad un diverso andamento della curva.

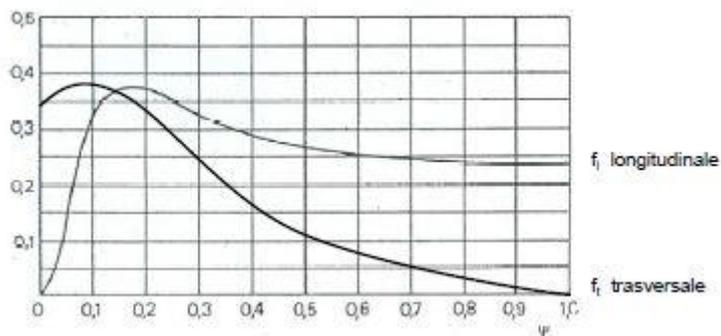


Figura 33 Grafico coefficiente di aderenza - scorrimento

Il valore del coefficiente di aderenza μ è molto variabile e dipende innanzitutto dalla natura delle superfici di contatto, ovvero dal tipo e dalle condizioni del battistrada e dalla pavimentazione. Inoltre dipende anche dall'eventuale presenza di uno strato di acqua o polvere, dalla pressione dello pneumatico e dalla velocità di marcia. La sua misura sperimentale è strettamente connessa al tipo di apparecchiatura utilizzata e alle modalità operative del test, pertanto, nei casi in cui è necessario assumere un valore del coefficiente di aderenza è opportuno utilizzare un coefficiente di sicurezza.

Come già detto, su un veicolo in movimento non agiscono solamente forze nel senso del moto ma anche trasversali, ovvero ortogonali al senso del moto. Ovviamente anche tali sollecitazioni generano sulla superficie di contatto pneumatico-pavimentazione una reazione di aderenza che permette al veicolo di non traslare lateralmente. Nel caso di forze longitudinali si parla di aderenza longitudinale e quindi di coefficiente di aderenza longitudinale μ_l , nel caso di forze trasversali si parla di aderenza trasversale e quindi di coefficiente di aderenza trasversale μ_t .

Il coefficiente di aderenza μ non è, a rigore, uguale in tutte le direzioni, tuttavia la piccola differenza tra il valore longitudinale e quello trasversale può essere trascurata nella pratica.

Il legame presente tra il coefficiente di aderenza longitudinale μ_l e il coefficiente di aderenza trasversale μ_t può essere rappresentato mediante l'ellisse di aderenza che riporta l'andamento del coefficiente di aderenza al variare della risultante delle forze longitudinali e trasversali applicate allo pneumatico. La quota parte di aderenza longitudinale y e di aderenza trasversale x che è possibile impegnare contemporaneamente è data dall'equazione dell'ellisse:

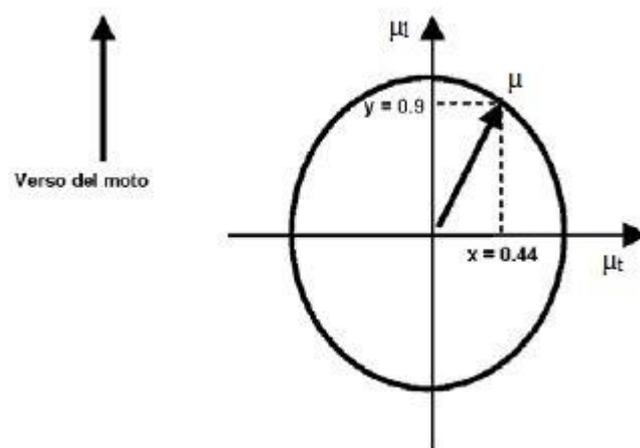


Figura 34 Ellisse di aderenza

Il significato dell'ellisse di aderenza è estremamente importante perché permette di calcolare, in base al coefficiente di aderenza impegnato in una direzione, quello disponibile nella direzione ortogonale.

Infatti, tra lo pneumatico e la pavimentazione si può sviluppare al massimo una forza di aderenza $A_{lim} = \mu \cdot P$ in qualsiasi direzione, ma questa va scomposta tra le sue due componenti. Ad esempio, se tutta l'aderenza disponibile è utilizzata in senso longitudinale per frenare, non esiste una riserva di aderenza trasversale per compensare eventuali forze trasversali. Ciò significa che, nel caso queste si presentino, provocheranno la perdita del controllo del veicolo.

Per questo motivo nei calcoli si utilizza sempre solo una quota parte del coefficiente di aderenza, al fine di garantire una riserva di aderenza a disposizione per eventuali manovre di emergenza.

Il D.M. 05.11.2001 ipotizza di utilizzare lo 0,9 dell'aderenza disponibile in senso longitudinale per l'azione di frenatura; la quota parte che rimane disponibile per compensare eventuali forze tangenziali si può ottenere dall'equazione dell'ellisse vista prima.

Assumendo $\mu = \mu_l = \mu_t$ si avrà:

$$1 = \frac{x^2}{\mu^2} + \frac{(0,9 \mu)^2}{\mu^2}$$

Da cui:

$$x^2 = \mu^2 - (0,9 \mu)^2 = 0,19 \mu^2$$

Pertanto, la quota parte x disponibile trasversalmente è pari a:

$$x = 0,44 \mu$$

4.6 Verifica all'imbardata nel caso di raffica di vento laterale

Per verificare che, in caso di forte raffica laterale, non si arrivi ad una perdita di aderenza sull'asse anteriore dell'automobile, verrà utilizzato il più semplice modello di veicolo possibile; vale a dire che il veicolo verrà considerato come un unico corpo rigido con massa di una tonnellata, che si muove in linea retta e che viene investito da una raffica uniforme.

La forza esercitata dal vento, F_s si considera applicata nel centro di pressione (CP) dell'automobile, ove si ipotizzano applicate tutte le forze aerodinamiche generate dal flusso dell'aria sul veicolo stesso.

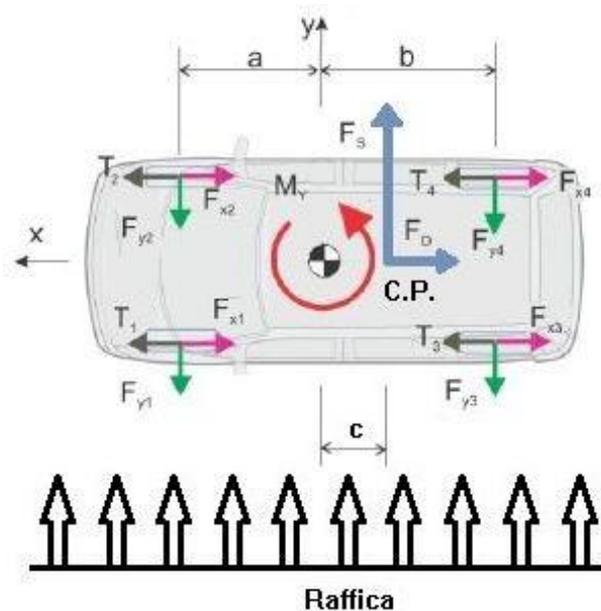


Figura 35 Forze agenti sulla vettura

Il centro di pressione, perciò, è quel particolare punto di un qualsiasi corpo, nel quale si può pensare di concentrare, in un'unica risultante, tutte le forze aerodinamiche agenti sul corpo stesso.

I momenti aerodinamici rispetto al centro di pressione sono nulli, ma, rispetto ad un qualsiasi altro punto appartenente al corpo, la forza aerodinamica genererà un momento con braccio pari alla distanza tra il punto in considerazione ed il centro di pressione.

Le uniche forze che contrastano questa forza sono le reazioni vincolari F_{y1} , F_{y2} , F_{y3} , F_{y4} esercitate dagli pneumatici a contatto con la strada, in quanto sono dirette in maniera opposta alla direzione del vento.

Si calcolano le forze agenti sulle ruote dovute al solo peso del veicolo. Considerando solo la mezzeria longitudinale dell'automobile si ha:

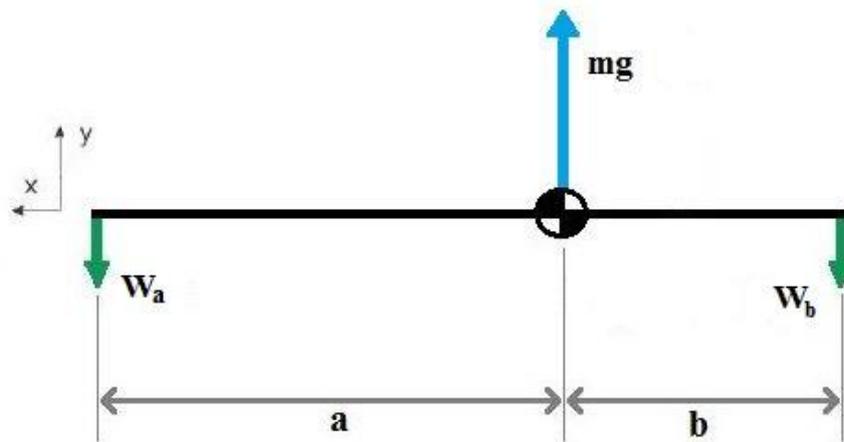


Figura 36 Semplificazione ad una trave

Impostando l'equazione di equilibrio delle forze si ha:

$$(4.6.1) \quad W_a + W_b - mg = 0$$

Le reazioni vincolari generano un momento di rotazione attorno al baricentro.

Impostando l'equazione di equilibrio dei momenti si ha:

$$(4.6.2) \quad W_a \cdot a - W_b \cdot b = 0$$

Per poter risolvere le due equazioni di equilibrio è necessario conoscere il valore del braccio a e del braccio b , quindi serve la posizione del baricentro. Questa viene calcolata automaticamente da SolidWorks. Andando nella scheda *Proprietà di massa* presente nel menù *Strumenti*, oltre alle coordinate del centro di massa, è possibile visualizzare anche la massa, il volume e altre caratteristiche del modello.

Volendo avere una massa di una tonnellata, ed essendo questa data dal prodotto tra densità e volume, sapendo il volume, è stato possibile creare un materiale di densità voluta in modo che la massa totale del modello fosse effettivamente di una tonnellata.

I dati finali sono i seguenti:

$$\text{Volume} = 6,1 \text{ m}^3$$

$$\text{Massa} = 1000005.26 \text{ grammi}$$

Centro di massa: (millimetri)

$$X = 0$$

$$Y = 640.62$$

$$Z = -2205.80$$

Le quote ottenute sono calcolate rispetto al sistema di assi preimpostato da SolidWorks.

E' possibile visualizzare il baricentro sul modello e, tracciando due assi verticali sul piano laterale, passanti rispettivamente per la mezzeria dello pneumatico anteriore e per la mezzeria dello pneumatico posteriore e utilizzando la funzione *quota intelligente* si ottiene il passo della vettura. Sempre con lo strumento *quota intelligente*, si ottiene la distanza tra il sistema di coordinate e l'assale anteriore.

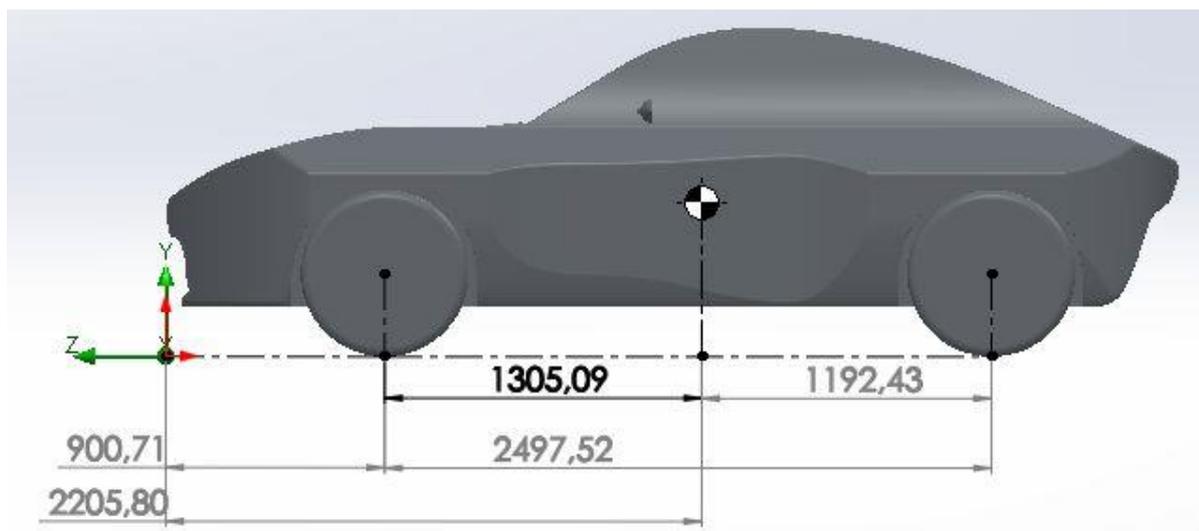


Figura 37 Distanza assali dal baricentro

Si ottiene quindi:

$$a = Z_{CG} - 900,71 = 2205,80 - 900,71 = 1305,09 \quad [mm]$$

$$b = 2497,52 - a = 1192,43 \quad [mm]$$

Facendo un sistema con le due equazioni di equilibrio 4.6.1 e 4.6.2 e risolvendo rispetto a W_a e W_b si ottiene:

$$W_a = \frac{b \cdot mg}{a + b} = 4683,7 \quad [N]$$

$$W_b = \frac{a \cdot mg}{a + b} = 5126,3 \quad [N]$$

Questa è la ripartizione del peso sull'assale anteriore e su quello posteriore.

Ora è possibile calcolare la reazione vincolare degli pneumatici; considerando un coefficiente di attrito $\mu=0,7$ si avrà:

$$F_{y1,2} = \mu \cdot W_a = 3278,59$$

$$F_{y3,4} = \mu \cdot W_b = 3588,41$$

Per procedere con la verifica è necessario conoscere la posizione del centro di pressione. Per ottenerla si ricorre a SolidWorks. In *Flow Simulation* è possibile calcolare la forza laterale esercitata dal vento e il momento. Essendo il momento dato dalla forza per il braccio è immediato ricavare il braccio e, di conseguenza, la posizione del centro di pressione.

Si imposta quindi il *wizard* in *Flow Simulation*: le prime schermate sono come quelle viste nel caso di vento frontale; si nomina il progetto, si scelgono le unità di misura, si imposta un'analisi di tipo esterno escludendo le cavità e si sceglie il tipo di fluido. Nella schermata delle condizioni iniziali, facendo riferimento alla terna d'assi in SolidWorks, si imposta una velocità di 100 km/h lungo l'asse X e si prosegue fino al completamento della configurazione.

I *Global Goal* da inserire sono: *Force (X)* e *Torque (Y)*. Impostato il dominio computazionale si avvia la simulazione; per una raffica laterale di 100 km/h si ottiene:

$$Force (X) = F_w = 1059,62 \text{ N}$$

$$Torque (Y) = 2339,33 \text{ N}\cdot\text{m}$$

La distanza del centro di pressione, punto di applicazione della forza aerodinamica, rispetto al sistema di assi di SolidWorks è:

$$Z_{CentroPressione} = \frac{Torque(Y)}{Force(X)} = 2,208 \quad [m]$$

Quindi si ottengono le distanze dell'assale anteriore e posteriore rispetto al centro di pressione:

$$a_{ForzaAero} = Z_{CentroPressione} - 900,71 = 2208 - 900,71 = 1307,29 \quad [mm]$$

$$b_{ForzaAero} = 2497,52 - a = 1190,23 \quad [mm]$$

A questo punto è possibile calcolare, come fatto precedentemente, la ripartizione di F_w tra assale anteriore e posteriore:

$$F_{wANT} = \frac{b_{ForzaAero} \cdot F_w}{a_{ForzaAero} + b_{ForzaAero}} = 504,9 \quad [N]$$

$$F_{wPOST} = \frac{a_{ForzaAero} \cdot F_w}{a_{ForzaAero} + b_{ForzaAero}} = 554,6 \quad [N]$$

Per vedere se l'automobile perde aderenza è sufficiente confrontare la forza esercitata dal vento sull'assale anteriore e posteriore con le forze trasversali $F_{y1,2}$ e $F_{y3,4}$. Essendo la forza di aderenza maggiore rispetto a quella esercitata dal vento, la stabilità della macchina non è compromessa.

Gli stessi calcoli vengono fatti con i risultati della simulazione con una raffica laterale di 150 km/h:

$$Force(X) = F_w = 3439,96 \text{ N}$$

$$Torque(Y) = 7795,1 \text{ N}\cdot\text{m}$$

La distanza del centro di pressione, punto di applicazione della forza aerodinamica, rispetto al sistema di assi di SolidWorks è:

$$Z_{CentroPressione} = \frac{Torque(Y)}{Force(X)} = 2,266 \quad [m]$$

Quindi si ottengono le distanze dell'assale anteriore e posteriore rispetto al centro di pressione:

$$a_{ForzaAero} = Z_{CentroPressione} - 900,71 = 2266 - 900,71 = 1365,29 \quad [mm]$$

$$b_{ForzaAero} = 2497,52 - a = 1132,23 \quad [mm]$$

A questo punto è possibile calcolare, come fatto precedentemente, la ripartizione di F_w tra assale anteriore e posteriore:

$$F_{wANT} = \frac{b_{ForzaAero} \cdot F_w}{a_{ForzaAero} + b_{ForzaAero}} = 1559,48 \quad [N]$$

$$F_{wPOST} = \frac{a_{ForzaAero} \cdot F_w}{a_{ForzaAero} + b_{ForzaAero}} = 1880,48 \quad [N]$$

Anche in questo caso la forza di attrito generata dagli pneumatici è superiore alla forza generata dalla raffica di vento laterale e la stabilità della vettura non è compromessa.

4.7 Verifica all'imbardata nel caso di frenata con raffica di vento laterale

Visto l'ampio margine di sicurezza nel solo caso di presenza di vento laterale, si è provato a vedere il comportamento della vettura nel caso ci si trovasse a dover effettuare una frenata, sempre in presenza di una raffica di vento laterale.

In questo caso è evidente che l'indice di aderenza μ dovrà scomporsi nella componente longitudinale μ_l , che sarà quella necessaria alla frenata, e in quella trasversale μ_t , che sarà quella incaricata di opporsi alla raffica.

Si ipotizza che il veicolo stia procedendo ad una velocità di 108 km/h e che sia soggetto ad una raffica di vento laterale di 150 km/h che genera una forza sull'assale anteriore di 1560 N, calcolata nella simulazione precedente. Si ipotizza inoltre che il peso sia tutto applicato sull'assale anteriore e che lo spazio di frenata necessario per fermare completamente il veicolo sia di 60 metri; si tratta quindi di moto uniformemente decelerato.

Le equazioni che descrivono questo moto sono:

$$V_{fin} = V + a \cdot t$$

(4.7.1)

$$S = V \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2$$

Inserendo i dati e risolvendo rispetto a t si ottiene:

$$t = 4 \text{ s}$$

$$a = -7,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

La forza dovuta alla frenata è quindi data da:

$$F_{frenata} = m \cdot a = 1000 \cdot 7,5 = 7500 \quad [N]$$

Ipotizzo il coefficiente di attrito μ , generato dallo pneumatico, pari a 0,8. Verifico quindi il coefficiente di attrito longitudinale minimo richiesto facendo il rapporto tra la forza dovuta alla frenata e la forza peso:

$$\mu_l = \frac{7500}{9810} = 0,77$$

Ipotizzo di utilizzare come coefficiente di attrito longitudinale 0,78.

Questo significa che mi resta una parte di attrito disponibile per contrastare anche la forza dovuta alla raffica trasversale.

Ora si ricorre all'equazione dell'ellisse di aderenza per poter calcolare la quota parte del coefficiente di attrito trasversale disponibile:

$$1 = \frac{x^2}{\mu^2} + \frac{(0,78)^2}{\mu^2}$$

Da cui si ottiene:

$$x^2 = \mu^2 - (0,78)^2 = 0,03$$

Quindi:

$$x = 0,17$$

Il coefficiente di attrito trasversale μ_t è quindi 0,17.

Per verificare che l'automobile non perda aderenza bisogna accertarsi che la risultante ottenuta dalla composizione della forza dovuta alla frenata e la forza dovuta dalla raffica, non termini fuori dall'ellisse di aderenza.

Si utilizza quindi l'equazione dell'ellisse, mettendo a numeratore le forze generate dalla frenata e dal vento mentre a denominatore le forze di aderenza ottenute dal prodotto tra la forza peso e i coefficienti di aderenza calcolati:

$$\frac{F_W^2}{(mg \cdot \mu_t)^2} + \frac{F_F^2}{(mg \cdot \mu_l)^2} - 1 = 0$$

Sostituendo i valori numerici si ottiene:

$$\frac{1560^2}{(9810 \cdot 0,17)^2} + \frac{7500^2}{(9810 \cdot 0,78)^2} - 1 = 0$$

Risolvendo l'equazione mi aspetto tre tipi di soluzione:

- Un numero maggiore di zero: indica che la risultante termina esternamente all'ellisse quindi non c'è sufficiente aderenza.
- Un numero minore di zero: indica che la risultante termina internamente all'ellisse quindi c'è aderenza.
- Zero: significa che sono al limite della condizione di aderenza

Il risultato ottenuto è 0.83 quindi non ho sufficiente aderenza. Questo significa che, in caso di frenata con vento laterale, bisogna frenare più dolcemente.

Per verificare questo concetto si è studiato il caso limite ovvero, dati i coefficienti di attrito longitudinale e trasversale, si è calcolato lo spazio minimo di frenata che garantisce che la risultante si trovi all'interno dell'ellisse di aderenza.

Si è ipotizzata una velocità di 108 km/h e una raffica diretta trasversalmente alla direzione del moto con intensità di 150 km/h che genera sull'assale anteriore una forza F_w di 1560 Newton. Il peso nella frenata viene considerato tutto sull'assale anteriore; il coefficiente di attrito μ utilizzato è di 0,8 e, in particolare, si è considerato scomposto in coefficiente longitudinale μ_l di 0,72 e coefficiente trasversale μ_t di 0,35 (dati ottenuti sempre ricorrendo all'equazione dell'ellisse di aderenza).

A questo punto, per calcolare lo spazio minimo necessario per la frenata, si è proceduto a ritroso, ovvero:

$$(3.11.2) \quad \frac{F_F^2}{(mg \cdot \mu_l)^2} = 1 - \frac{F_w^2}{(mg \cdot \mu_t)^2}$$

Sostituendo i dati noti, si ottiene che la forza frenante F_F è di 6317 Newton.

Sapendo che la forza si ottiene dal prodotto tra massa e accelerazione si ottiene il valore di quest'ultima, ovvero:

$$a = 6,317 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

L'accelerazione andrà presa negativa perché si tratta di una decelerazione.

Impostando il sistema di equazioni 4.7.1 valido per un moto uniformemente decelerato, si ottengono il tempo t necessario alla frenata e lo spazio s :

$$t = 4,75 \text{ s}$$

$$s = 71 \text{ m}$$

Si è così ottenuto lo spazio minimo necessario che permette alla vettura, che viaggia a 108 km/h e sottoposta ad una raffica trasversale di 150 km/h, di fermarsi senza che si causi una perdita di aderenza.

Per verificare i dati ottenuti si utilizza nuovamente l'equazione dell'ellisse e, sostituendo tutti i dati calcolati, si ottiene l'identità $1=1$.

E' stato quindi verificato che in caso di raffica laterale di 150 km/h, ipotizzando un coefficiente d'attrito di 0,8, lo spazio minimo di frenata è di 71 metri.

Conclusioni

Lo scopo dello studio dell'aerodinamica della vettura Astura era calcolare il coefficiente di resistenza aerodinamica, la potenza aerodinamica assorbita e studiare il comportamento della vettura in caso di raffica di vento laterale.

Per quanto riguarda il coefficiente di resistenza C_X , il risultato ottenuto, seppur soddisfacente se confrontato con il C_X di altre vetture, è maggiore rispetto a quello atteso: ci si aspettava un valore intorno a 0,40.

La curva della potenza ottenuta è in linea con quella attesa.

Lo studio del comportamento della vettura in caso di una raffica laterale non ha evidenziato particolari problemi di aderenza se la vettura viene sottoposta alla sola raffica. Nel caso invece sia necessaria una frenata è stato verificato che lo spazio di frenata aumenta, in modo da evitare che si verifichi una perdita di aderenza.

Bibliografia

L. Morelli, *Ottimizzazione estetica e funzionale di una vettura sportiva per normodotati e diversamente abili*, Tesi di Laurea in Ingegneria Aerospaziale, relatore Prof. Ing. L. Piancastelli, Università degli studi di Bologna, A.A. 2010/2011.

S. Filoni, *Indagine sperimentale con sonda a cinque fori e anemometro a filo caldo di correnti separate prodotte su autoveicoli da elementi esterni*, Tesi di Laurea in Ingegneria Aeronautica, relatore Prof. Ing. G. P. Russo, Università degli studi di Napoli, A.A. 1998/1999.

Milan Batista, Marko Perkovič, *A simple static analysis of moving road vehicle under crosswind*, University of Ljubljana, Faculty of Maritime studies and Transport.

Ing. P. Perco, *Dispense del corso di strade, ferrovie ed aeroporti*, Università degli studi di Trieste.

Enrico Benzing, *Dall'aerodinamica alla potenza in Formula 1*, Nada Editore, 2007.

Vivek Yakkundi, Shankar Mantha, *Aerodynamics of cars*, Lap Lambert Academic Publishing, 2011.

Hucho, W.H., *Aerodynamics of road vehicles*, 4th edition edited W.H. Hucho, 1998.

Prof. G. Buresti, *Aerodinamica*, , Università di Pisa.