

# 1. SISTEMA DI TRASPORTO SU STRADA

## Sommario

SISTEMA DI TRASPORTO SU STRADA.....	1
SOMMARIO .....	1
1. INTRODUZIONE.....	2
2. VEICOLO STRADALE.....	3
3. ADERENZA .....	9
<u>Ruote Trainate:</u> .....	11
<u>Ruote Frenate:</u> .....	12
4. RESISTENZE AL MOTO DEI VEICOLI .....	18
RESISTENZE ORDINARIE .....	18
<i>Resistenza al rotolamento</i> .....	18
<i>Resistenza dell'aria</i> .....	19
RESISTENZE ACCIDENTALI .....	20
<i>Resistenza dovuta alla pendenza della strada</i> .....	20
<i>Resistenza dovuta alle curve</i> .....	20
<i>Resistenze dovute all'accelerazione</i> .....	21
5. VISUALI LIBERE .....	22
DISTANZA DI VISIBILITÀ PER L'ARRESTO .....	22
EQUAZIONE GENERALE DEL MOTO.....	22
DISTANZA DI VISIBILITÀ PER LA MANOVRA DI CAMBIAMENTO DI CORSIA .....	25
DISTANZA DI VISIBILITÀ PER IL SORPASSO.....	26

Ing. Giovanni Leonardi

## 1. Introduzione

Nel sistema di trasporto su strada si è soliti individuare le seguenti componenti: l'uomo, il veicolo, la strada, l'ambiente:

### L'uomo

è la componente del sistema che presenta la maggiore variabilità: pedone, occupante e conducente dei mezzi pubblici e privati.

### Il veicolo

della vasta gamma di veicolo che circolano sulle strade interessa conoscere per la progettazione geometrica solo alcune caratteristiche e prestazioni: dimensioni, pesi, potenze, velocità massime, accelerazioni.

### La strada

classificazione amministrativa: statali, provinciali, comunali, etc.

classificazione secondo la destinazione d'uso: a traffico misto, di servizio, pedonali, etc.

classificazione secondo l'ambito territoriale: urbane, suburbane, extraurbane.

classificazione tecnica: tipo A, tipo B, etc.

### L'ambiente:

per ambiente si intende l'insieme delle componenti biotiche e abiotiche che in modo diverso interagiscono con l'infrastruttura stradale considerata.

Sulla base di quanto riportato sul Codice della Strada, la Normativa individua le seguenti tre componenti di traffico:

- *pedoni*
- *animali*
- *veicoli*

Le funzioni di traffico ammesse per la circolazione sulla sede stradale risultano:

- il movimento;
- la sosta di emergenza;
- la sosta;
- l'accesso privato diretto.

## 2. Veicolo stradale

### Classificazione dei veicoli

<b>a) veicoli a braccia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) spinti o trainati dall'uomo a piedi</li> <li>b) azionati dalla forza muscolare dello stesso conducente</li> </ul>
<b>b) veicoli a trazione animale</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) veicoli destinati principalmente al trasporto di persone</li> <li>b) veicoli destinati principalmente al trasporto di cose</li> <li>c) carri agricoli destinati a trasporti per uso esclusivo delle aziende agricole</li> </ul>
<b>c) velocipedi</b>	
<b>d) slitte</b>	
<b>e) ciclomotori</b>	
<b>f) motoveicoli</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) motocicli</li> <li>b) motocarrozze</li> <li>c) motoveicoli per trasporto promiscuo</li> <li>d) motocarri</li> <li>e) mototrattori</li> <li>f) motoveicoli per trasporti specifici</li> <li>g) motoveicoli per uso speciale</li> <li>h) quadricicli a motore</li> </ul>
<b>g) autoveicoli</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) autovetture</li> <li>b) autobus</li> <li>c) autoveicoli per trasporto promiscuo</li> <li>d) autocarri</li> <li>e) trattori stradali</li> <li>f) autoveicoli per trasporti specifici</li> <li>g) autoveicoli per uso speciale</li> <li>h) autotreni</li> <li>i) autoarticolati</li> <li>l) autosnodati</li> <li>m) autocaravan</li> <li>n) mezzi d'opera</li> </ul>
<b>h) filoveicoli</b>	
<b>i) rimorchi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) rimorchi per trasporto di persone</li> <li>b) rimorchi per trasporto di cose</li> <li>c) rimorchi per trasporti specifici</li> <li>d) rimorchi ad uso speciale</li> <li>e) caravan</li> <li>f) rimorchi per trasporto di attrezzature turistiche e sportive</li> </ul>
<b>l) macchine agricole</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) SEMOVENTI               <ul style="list-style-type: none"> <li>1) trattrici agricole</li> <li>2) macchine agricole operatrici a 2 o più assi</li> <li>3) macchine agricole operatrici ad un asse</li> </ul> </li> <li>b) TRAINATE               <ul style="list-style-type: none"> <li>1) macchine agricole operatrici</li> <li>2) rimorchi agricoli</li> </ul> </li> </ul>
<b>m) macchine operatrici</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) macchine impiegate per la costruzione e la manutenzione di opere civili o delle infrastrutture stradali o per il ripristino del traffico</li> <li>b) macchine sgombraneve, spartineve o ausiliarie quali spanditrici di sabbia e simili</li> <li>c) carrelli</li> </ul>
<b>n) veicoli con caratteristiche atipiche</b>	
<b>o) veicoli su rotaia in sede promiscua</b>	
▪ PEDONI	▪ AUTOBUS

<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ANIMALI</li> <li>▪ VEICOLI A BRACCIA E A TRAZIONE ANIMALE <ul style="list-style-type: none"> <li>- veicoli a braccia</li> <li>- veicoli a trazione animale</li> <li>- slitte</li> </ul> </li> <li>▪ VELOCIPEDI</li> <li>▪ CICLOMOTORI <ul style="list-style-type: none"> <li>- ciclomotori</li> <li>- motocicli (&lt; 150 cc)</li> <li>- motocarrozze (&lt; 250 cc)</li> <li>- motoveicoli con massa a vuoto ≤ 400 kg</li> <li>- motoveicoli con massa tot. ≤ 1300 kg</li> </ul> </li> <li>▪ AUTOVETTURE <ul style="list-style-type: none"> <li>- motoveicoli con massa a vuoto &gt; 400 kg</li> <li>- motoveicoli con massa tot. &gt; 1300 kg</li> <li>- autovetture</li> <li>- autoveicoli ad uso promiscuo</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- autobus</li> <li>- autosnodati</li> <li>- filoveicoli</li> <li>▪ AUTOCARRI <ul style="list-style-type: none"> <li>- autocarri</li> <li>- autocaravan</li> <li>- trattori stradali</li> </ul> </li> <li>▪ AUTOTRENI E AUTOARTICOLATI <ul style="list-style-type: none"> <li>- autotreni</li> <li>- autoarticolati</li> <li>- caravan</li> <li>- mezzi d'opera</li> </ul> </li> <li>▪ MACCHINE OPERATRICI <ul style="list-style-type: none"> <li>- macchine agricole</li> <li>- macchine operatrici</li> </ul> </li> <li>▪ VEICOLI SU ROTAIA IN SEDE PROMISCUA</li> <li>▪ SOSTA DI EMERGENZA</li> <li>▪ SOSTA</li> <li>▪ ACCESSO PRIVATO DIRETTO</li> </ul>
---	--

La categoria più importante è costituita dagli *autoveicoli* (veicoli a motore con almeno due assi e quattro ruote) e si distinguono in:

1. *autovetture*: veicoli destinati al trasporto di persone, aventi al massimo nove posti, compreso quello del conducente;
2. *autobus*: veicoli destinati al trasporto di persone equipaggiati con più di nove posti compreso quello del conducente;
3. *autoveicoli per trasporto promiscuo*: veicoli aventi una massa complessiva a pieno carico non superiore a 3.5 t o 4.5 t se a trazione elettrica o a batteria, destinati al trasporto di persone e di cose e capaci di contenere al massimo nove posti compreso quello del conducente;
4. *autocarri*: veicoli destinati al trasporto di cose e delle persone addette all'uso o al trasporto delle cose stesse;
5. *trattori stradali*: veicoli destinati esclusivamente al traino di rimorchi o semirimorchi;
6. *autoveicoli per uso speciale o per trasporti specifici*: veicoli destinati al trasporto di determinate cose o di persone in particolari condizioni, caratterizzati dall'essere muniti permanentemente di speciali attrezzature relative a tale scopo;
7. *autotreni*: complessi di veicoli costituiti da due unità distinte, agganciate, delle quali una motrice.
8. *autoarticolati*: complessi di veicoli costituiti da un trattore e da un semirimorchio;

9. *autosnodati*: autobus composti da due tronconi rigidi collegati tra loro da una sezione snodata.
10. *autocaravan*.

### Sagoma Limite

Larghezza massima = 2.50 m

Altezza massima dal piano stradale = 4.00 m

Lunghezza massima

Veicolo a motore isolato:	12.00 m
Rimorchio:	12.00 m
Autoarticolato:	16.50 m
Autotreno:	18.00 m

### Peso massimo

Veicolo isolato a due assi:	18 t
Rimorchio a tre assi:	24 t
Autotreni e autoarticolati a 5 o 6 assi	40 t

Come sopra accennato è necessario conoscere le possibili prestazioni dei veicoli, segnatamente le velocità e le accelerazioni massime, che dipendono in larga misura dalla potenza specifica (per unità di peso). Si ricorda in proposito che la potenza è data dal lavoro svolto nell'unità di tempo e che l'unità di misura è il watt (W) o il cavallo vapore (CV):

$$1 \text{ W} = 1 \text{ joule/sec} = 1 \text{ N}\cdot\text{m/sec}$$

$$1 \text{ CV} = 75 \text{ kg}\cdot\text{m/sec} = 75 \cdot 9,81 \text{ N}\cdot\text{m/sec} = 0.735 \text{ kW}$$

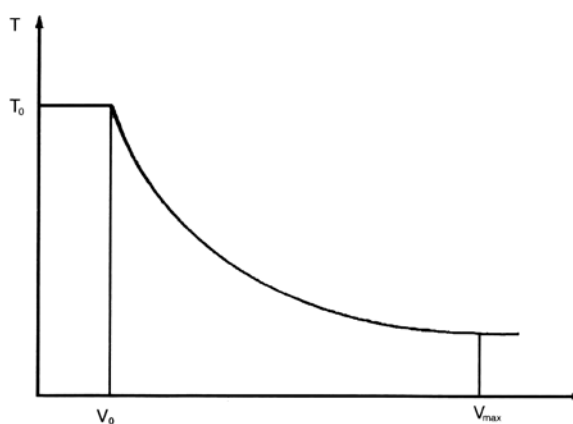
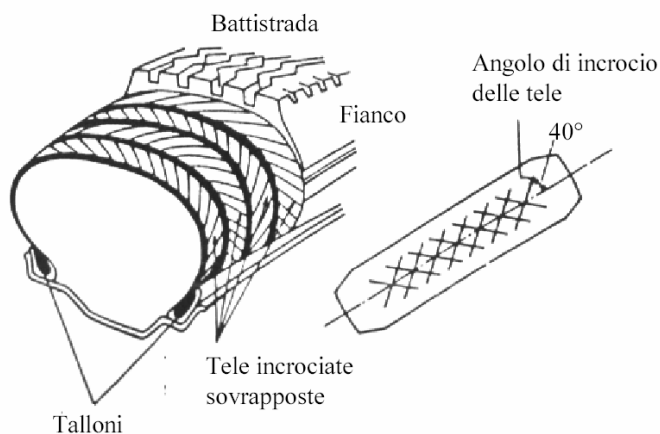


Figura 2.1 – Caratteristica ideale per la trazione

Si chiama caratteristica di trazione di un veicolo la relazione  $T = f(V)$  che fornisce la legge di variazione dello sforzo di trazione in funzione della velocità: la caratteristica ideale è quella a potenza costante:  $T = f(V)$  è una iperbole.

I veicoli su strada ordinaria si muovono su ruote provviste di pneumatici, che sono in genere formati da una camera d'aria interna e da un copertone esterno. Taluni pneumatici per autovetture sono però costituiti dal solo copertone, entro il quale si immette direttamente l'aria per il gonfiaggio. Il copertone è formato da diversi strati di tela e caucciù ed è sagomato a superficie torica con dei ringrossi in corrispondenza della fascia che poggia sulla superficie stradale (battistrada), la quale è opportunamente sagomata e seghettata in modo da aumentare l'aderenza sul manto. I copertoni per veicoli industriali sono irrobustiti da treccie di fili di acciaio disposte entro gli strati di caucciù.



**Figura 2.2 – Caratteristiche di un pneumatico tradizionale**

La superficie d'impronta, determinata dal contatto fra copertone e sovrastruttura stradale, assume diversa forma e grandezza secondo il carico ed il valore della pressione di gonfiaggio.

Il contorno dell'area è quasi sempre ellittico per carichi limitati e bassa pressione, mentre tende a trasformarsi, con il crescere della pressione, in un rettangoloide con i lati più corti leggermente curvilinei.

L'area  $A$  della superficie d'impronta è legata al carico  $P$  dalla relazione:

$$P = h A^n$$

dove  $h$  e  $n$  sono due coefficienti dipendenti principalmente dalla natura del copertone e dalla pressione di gonfiaggio.

L'area di contatto sul suolo ha generalmente dimensioni abbastanza grandi e variabili. Ad esempio, le dimensioni medie dell'orma sono di cm  $10 \times 20$  per una ruota di autovettura e di cm

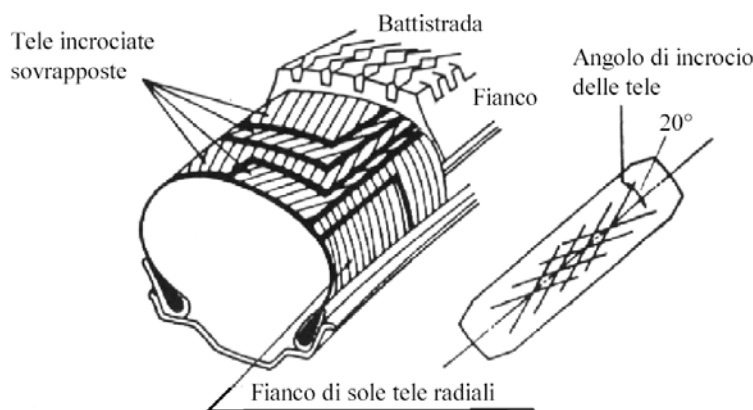
20 × 40 per quelle di un mezzo pesante.

In base all'orditura delle tele sovrapposte, il pneumatico può essere di due tipi:

- convenzionale
- radiale

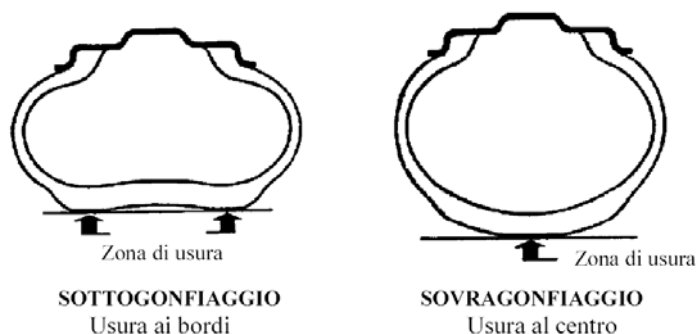
Il “convenzionale” (Figura 2.2) è costituito da tele che si estendono fra i due talloni e che sono sovrapposte ed incrociate in modo da formare un angolo di circa 40°.

Il tipo radiale (Figura 2.3) è invece caratterizzato dal fatto che alcune tele si estendono fra i due talloni con orditura radiale; su questa prima orditura viene sovrapposta una seconda, limitata alla sola zona corrispondente alla fascia di rotolamento (che verrà poi coperta dal battistrada) formata, analogamente al tipo convenzionale, dalla sovrapposizione di tele ad orditura incrociata ma con angolo di circa 20°.



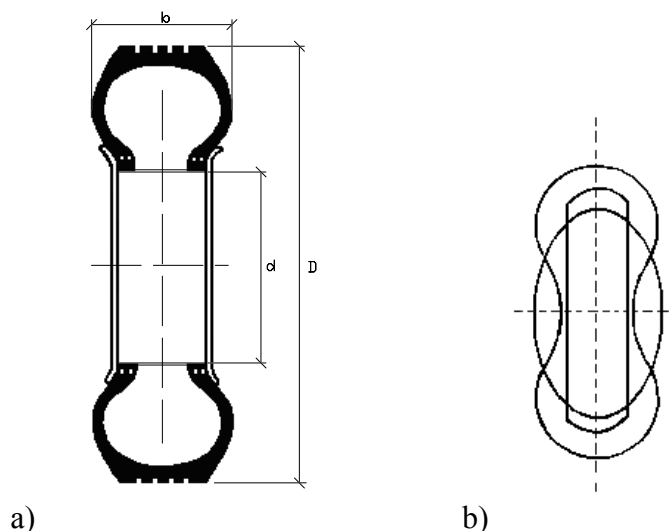
**Figura 2.3 – Caratteristiche di un pneumatico radiale**

Da osservare che la pressione sulla superficie d'impronta non si distribuisce in modo uniforme; per veicolo fermo si hanno zone di maggiore pressione all'incirca nei fuochi dell'ellisse rappresentante l'impronta, mentre se la ruota è in movimento queste zone tendono a spostarsi in avanti nel senso del moto.



**Figura 2.4 - Consumo anomalo di un pneumatico per sottogonfiaggio o per sovragonfiaggio**

Inoltre, nei veicoli commerciali, tenuto conto dell'elevato carico che, di solito, si raggiunge per ragioni di economicità del trasporto, per ottenere una uniforme distribuzione delle pressioni sulla sovrastruttura, si usano assi con ruote 2 a 2 accoppiate (*ruote gemelle*).



**Figura 2.5 – a) Sezione di una ruota con pneumatico; b) Varie forme di area d'impronta**

Nel calcolo delle sovrastrutture stradali, data la notevole differenziazione dei carichi trasmessi dai mezzi, si tiene conto, al fine del dimensionamento della pavimentazione, soltanto del traffico costituito dai veicoli pesanti e, con buona approssimazione, si ammette che il carico di una ruota si distribuisca su un'area circolare. Nel caso di ruote gemelle il carico può considerarsi, per le due ruote, distribuito su un'area circolare unica, ovvero su due aree circolari vicine.

Si precisa che due assi consecutivi si considerano *assi singoli* se le deformate della pavimentazione, tenuto conto della velocità del mezzo e del ritardo dovuto alla natura visco-elastica della struttura non si sovrappongono; in caso contrario tali assi costituiscono un *asse tandem* (distanza minore di 2 metri).

Recenti ricerche hanno mostrato che l'aggressività degli assi tandem è minore di quella ottenuta da un pari numero di assi singoli di eguale peso, in quanto il secondo asse di un tandem determina sulla sovrastruttura deformazioni e sforzi minori di quelli relativi all'asse che lo precede.



### 3. Aderenza

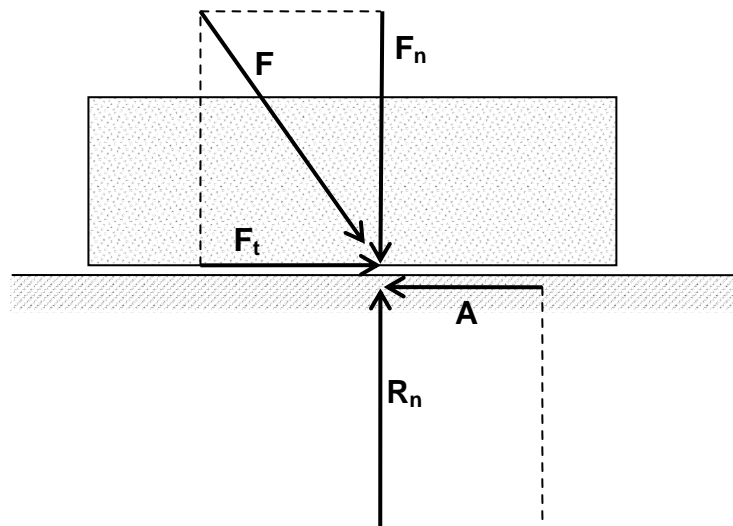
Consideriamo il caso che tra i due corpi a contatto non vi sia moto relativo.

L'esperienza mostra che se applichiamo al corpo una forza  $F$ , anche non perpendicolare al piano, il corpo resta fermo finché la componente  $F_t$  non supera un certo valore  $F_t'$ .

Possiamo perciò affermare che il piano è in grado di esercitare una reazione  $R$  avente una componente  $A$  di valore massimo  $F_a$  (uguale a  $F_t'$ ) capace di opporsi all'azione di  $F_t$  che tenderebbe a muovere il corpo rispetto al piano di appoggio.

Dalle esperienze di Coulomb, risulta che:

$$A = f_a \cdot R_n$$



essendo:

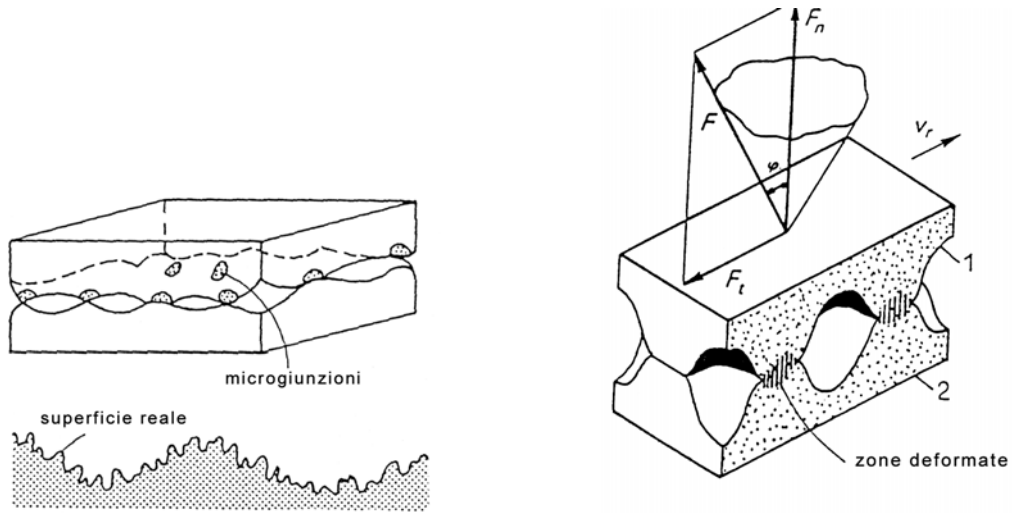
- $R_n$  la componente normale della reazione;
- $f_a$  il coefficiente di aderenza (o attrito statico) dipendente dalla natura dallo stato delle superfici a contatto, indipendente entro ampi limiti dall'estensione dell'area di contatto.

Per cui, affinché non vi sia moto relativo tra le superfici deve valere che:

$$A \leq f_a \cdot R_n$$

Il fenomeno dell'aderenza tra due superfici a contatto è causato dalla presenza di microsaldature tra le parti effettivamente a contatto, la cui superficie complessiva è una piccolissima frazione di quella apparente di contatto.

In seguito alla compressione mutua e alle conseguenti deformazioni plastiche ed elastiche, le aree reali di contatto, fra le quali può verificarsi una vera saldatura, si estendono proporzionalmente alla forza che preme i corpi l'uno contro l'altro.



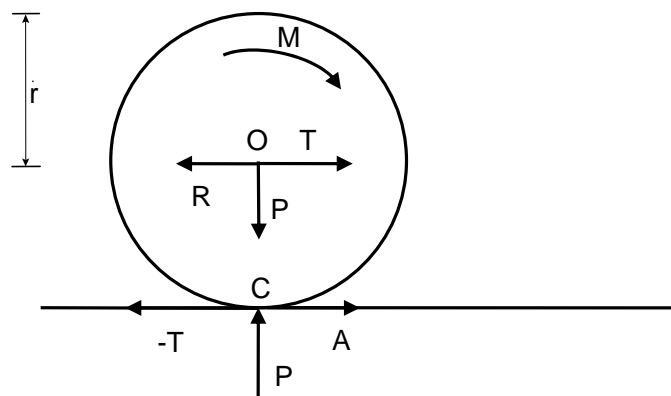
Ruote Motrici:

Consideriamo la coppia di ruote motrici di un veicolo stradale: sul loro asse agisce, trasmesso dal motore, un momento torcente  $M$  che tende a farle girare. Il momento  $M$  può pensarsi sostituito dalle due forze  $T$  e  $-T$  pari a  $M/r$  applicate in O e C. (Figura 3.1)

Siano  $P$  la somma di tutte le forze normali alla strada agenti sull'asse delle ruote motrici;  $R$  la forza che si oppone all'avanzamento del veicolo (somma delle resistenze e dell'eventuale forza d'inerzia) applicata sullo stesso asse e parallela alla direzione del moto di traslazione;  $A$  la componente, nella direzione del moto, della reazione esplicita dalla strada sulle ruote. Questa componente può essere rivolta nel verso del moto o in quello opposto, e può variare fra 0 e un valore limite  $F_a$ :

$$0 \leq A \leq F_a$$

verso del moto



**Figura 3.1 – Equilibrio di una ruota motrice**

L'insieme delle due ruote si comporta come un corpo vincolato nei punti O e C, in cui nascono reazioni vincolari le cui componenti parallele alla direzione del moto sono rispettivamente  $R$  e

A.

Condizioni di equilibrio:

$$\begin{cases} \mathbf{T < R} \\ \mathbf{T < F_a} \end{cases} \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{i vincoli non cedono e le ruote restano in equilibrio ferme} \\ \mathbf{ruote in equilibrio} \end{array} \right.$$

Quando, aumentando il momento motore, i vincoli cedono, possono verificarsi due tipi di moto.

$$\begin{cases} \mathbf{T > R} \\ \mathbf{T < F_a} \end{cases} \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{cede il vincolo in O - quello in C resiste} \\ \mathbf{rotazione istantanea intorno al punto C - traslazione di O} \end{array} \right.$$

$$\boxed{R < F_a}$$

Il moto della ruota è costituito da una, ed è la risultante di due moti, uno di rotazione intorno a O e uno di traslazione di O. Il momento motore è equilibrato dalla coppia formata da  $R$  e da una reazione  $A$  uguale a  $R$  e diretta in senso opposto:

$$M = R \cdot r \quad (\text{cede il vincolo in O})$$

$$\begin{cases} \mathbf{T < R} \\ \mathbf{T > F_a} \end{cases} \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{cede il vincolo in C - quello in O resiste} \\ \mathbf{rotazione istantanea intorno al punto O - le ruote slittano} \end{array} \right.$$

$$\boxed{R > F_a}$$

Il centro O e resta fermo e si ha uno scorrimento relativo in C, le ruote slittano. In questo caso il momento motore è equilibrato dalla coppia formata da  $A$ , diretta sempre in senso opposto a  $R$ , e dalla frazione di  $R$  uguale a  $A$ :

$$M = A \cdot r \quad (\text{cede il vincolo in C})$$

Si ricava quindi dallo schema esaminato che, affinché il veicolo possa muoversi, è necessario che risulti:

$$\boxed{R < F_a}$$

Ruote Trainate:

Consideriamo ora una coppia di ruote non motrici di un veicolo stradale. *Avendo applicato tutte le resistenze del veicolo sulle ruote motrici*, l'unica resistenza che agisce direttamente sulle non motrici è l'attrito nei perni (le resistenze al moto si applicano alle ruote motrici), la cui

risultante è un momento  $M_a$  torcente applicato sulle ruote in senso contrario a quello del moto di rotazione (Figura 3.2). Perché questo moto possa verificarsi, è necessario che il momento  $M_a$  sia equilibrato dalla coppia formata dallo sforzo di trazione  $T$  trasmesso dalle ruote motrici a quelle in esame, e dalla reazione  $A$  che questa volta è diretta in senso opposto a quello del moto del veicolo; deve pertanto sussistere la relazione:

$$M_a \leq F_a r$$

che è in pratica sempre verificata per il modestissimo valore di  $M_a$ .

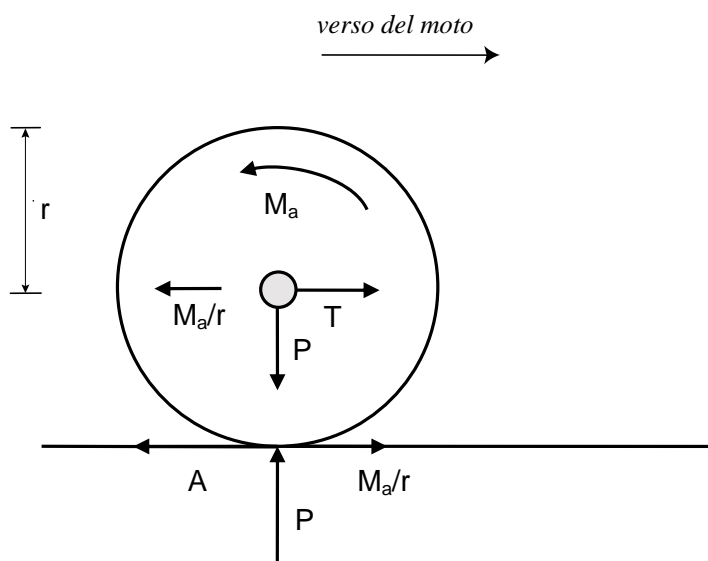


Figura 3.2 – Equilibrio di una ruota trainata

Ruote Frenate:

Durante la fase di frenatura, allo scopo di ottenere il rallentamento del veicolo, viene eliminato il momento  $M$  sulle ruote motrici, e su tutte le ruote s'incrementa, mediante dispositivi di vario genere, il momento  $M_a$  di una quantità  $M_f$  (detta *momento frenante* che agisce su tutte le ruote). In questo caso, non esistendo più distinzione fra ruote motrici e ruote non motrici, la risultante delle resistenze al moto si ripartisce fra i diversi assi del veicolo. Ciascuno di essi è pertanto soggetto, oltre al momento  $M_a + M_f$ , a una forza peso, a una resistenza  $R_r$  e a una forza d'inerzia  $F_i$  (Figura 3.3), mentre sulle sue ruote si esplica la reazione della strada.

Affinché durante la fase di frenatura le ruote non si blocchino sui propri assi, ma continuino a rotolare, è necessario che risulti:

$$A r = M_a + M_f \quad \text{e quindi che:} \quad \frac{M_a + M_f}{r} \leq F_a$$

Da quanto si è detto finora si deduce l'importanza che, nei rapporti fra strada e veicolo

assume la reazione  $A$ , necessaria sia per assicurare il moto di traslazione del veicolo, sia per garantire la sicurezza durante la frenatura.

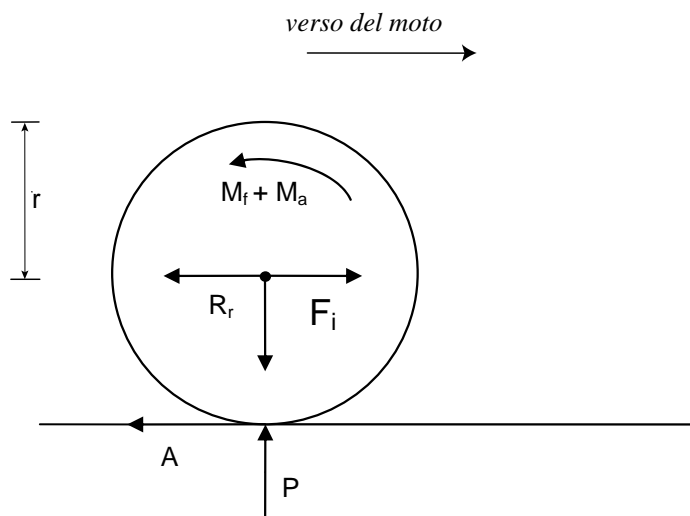


Figura 3.3 – Equilibrio di una ruota frenata

Coefficiente di aderenza:

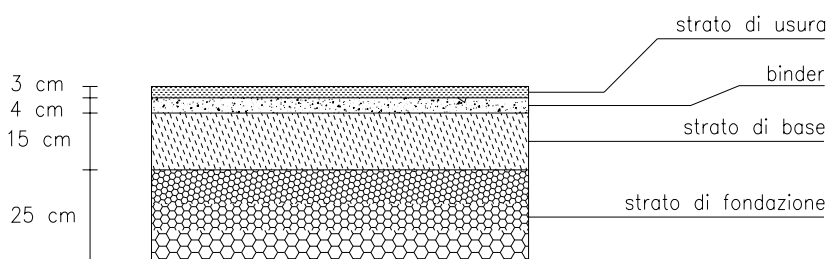
$A$  prende il nome di *forza di aderenza*. Il suo valore limite  $F_a$  è proporzionale alla forza  $P$ , agente sulle ruote, secondo un coefficiente  $f_a$  detto *coefficiente di aderenza*.

Se ne ricava l'opportunità, al fine di avere una marcia sicura del veicolo, di rendere massimo il cosiddetto peso aderente, cioè il peso  $P_a$  gravante sulle ruote motrici.

Il coefficiente di aderenza  $f_a$  è molto variabile in funzione delle condizioni dei pneumatici e della strada, e in funzione della velocità; è particolarmente sensibile alla presenza di acqua sulla strada e di eventuali materiali emulsionati.

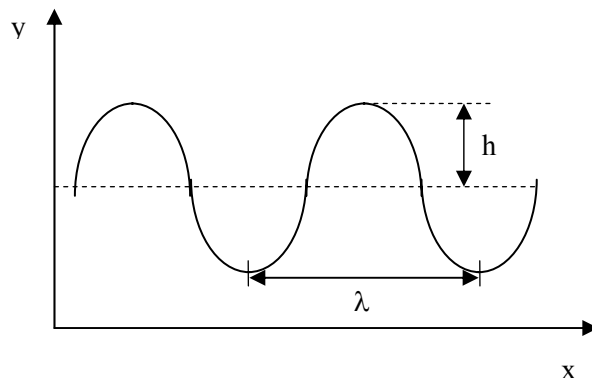
Appare, quindi, evidente come il coefficiente di aderenza  $f_a$  sia strettamente dipendente dalle caratteristiche superficiali delle pavimentazione stradale, in particolare, per le pavimentazioni flessibili, dalla rugosità dello strato di usura.

PARTICOLARE PAVIMENTAZIONE FLESSIBILE



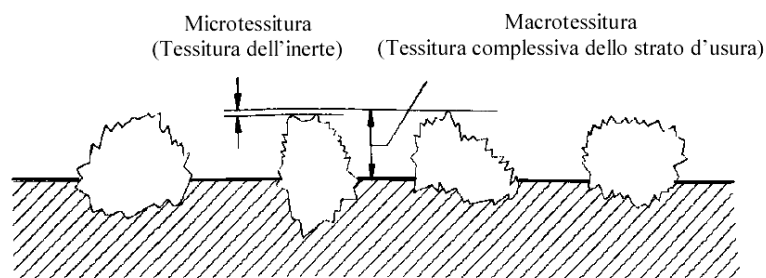
Interessa, pertanto, soffermarsi sulle caratteristiche di rugosità dello strato superficiale. A tale

scopo si può far riferimento ad una schematizzazione basata sull'assimilazione del profilo superficiale stradale ad un profilo ondulato di lunghezza d'onda  $\lambda$  e di ampiezza  $h$  (Figura 3.4).



**Figura 3.4 - Schematizzazione della geometria superficiale del manto stradale**

Si distingue la macro-rugosità dalla micro-rugosità, laddove la prima è dovuta all'insieme delle asperità superficiali della pavimentazione mentre la seconda è dovuta alla scabbrezza dei singoli elementi lapidei granulari impiegati nello strato superficiale della pavimentazione stradale.



	SUPERFICIE	MACRO RUGOSITA'	MICRO RUGOSITA'
A		grossa	aspra/ruvida
B		grossa	levigata
C		fina	aspra/ruvida
D		fina	levigata

0 1 2 3 4 5cm

Valori indicativi del coefficiente di aderenza limite longitudinale:

– conglomerato bituminoso asciutto	0.4 ÷ 0.6
– conglomerato bituminoso umido	0.3 ÷ 0.5
– conglomerato bituminoso bagnato	0.1 ÷ 0.3
– conglomerato cementizio asciutto	0.6 ÷ 0.8
– conglomerato cementizio umido	0.4 ÷ 0.5
– conglomerato cementizio bagnato	0.2 ÷ 0.4
– strada oleosa	0.1 ÷ 0.2
– ghiaccio	0.05 ÷ 0.1

Per esaminare la variabilità di  $f_a$  è necessario fare alcune osservazioni. Innanzitutto, a differenza di quanto si è visto negli schemi teorici, **l'aderenza per esplicarsi ha bisogno che si produca uno scorrimento relativo fra pneumatico e strada.**

Quindi il moto della ruota in parte si trasforma in avanzamento del veicolo, in parte è semplice rotazione intorno al centro O: durante un giro completo di una ruota di raggio  $r$ , l'avanzamento del veicolo è dato da  $(1 - \psi) \cdot 2\pi r$ , e contemporaneamente si verifica uno scorrimento della ruota sulla strada di lunghezza  $2\psi\pi r$  ove  $\psi$  è la *percentuale di scorrimento*. Nella Figura 3.5 è riportato un andamento tipico di  $f_a$  in funzione di  $\psi$ .

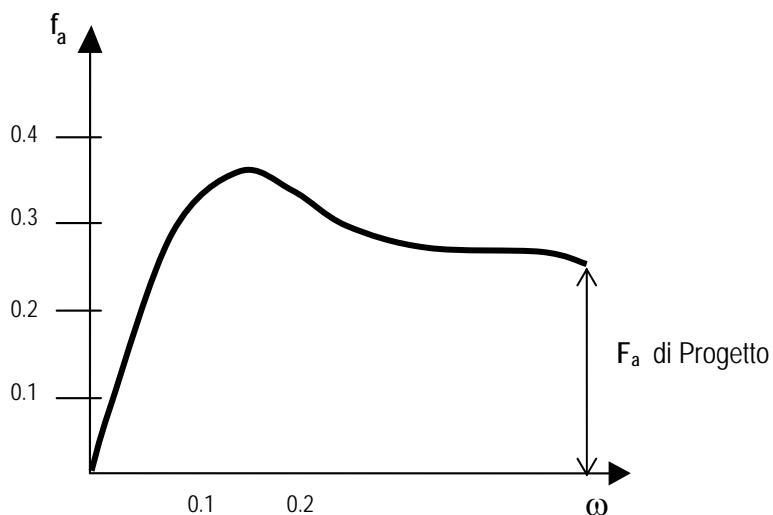
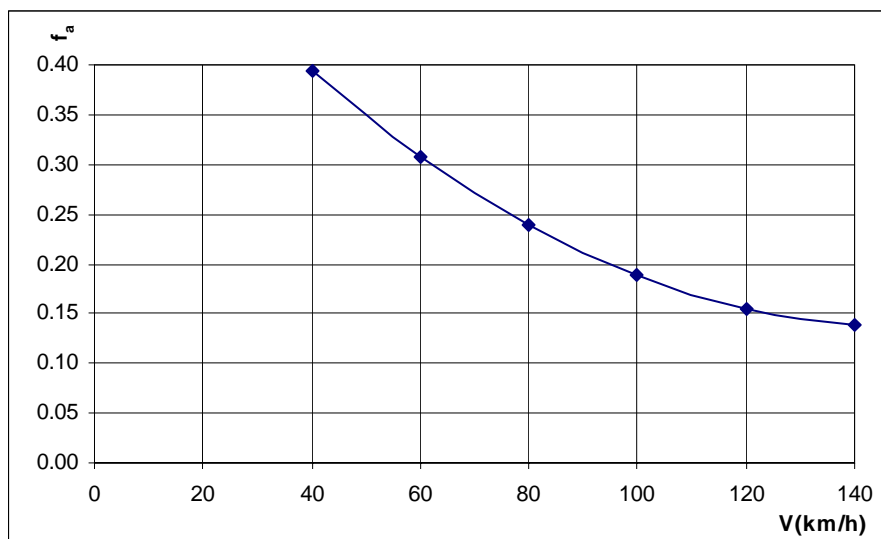


Figura 3.5 – Andamento del coefficiente di aderenza in funzione dello scorrimento



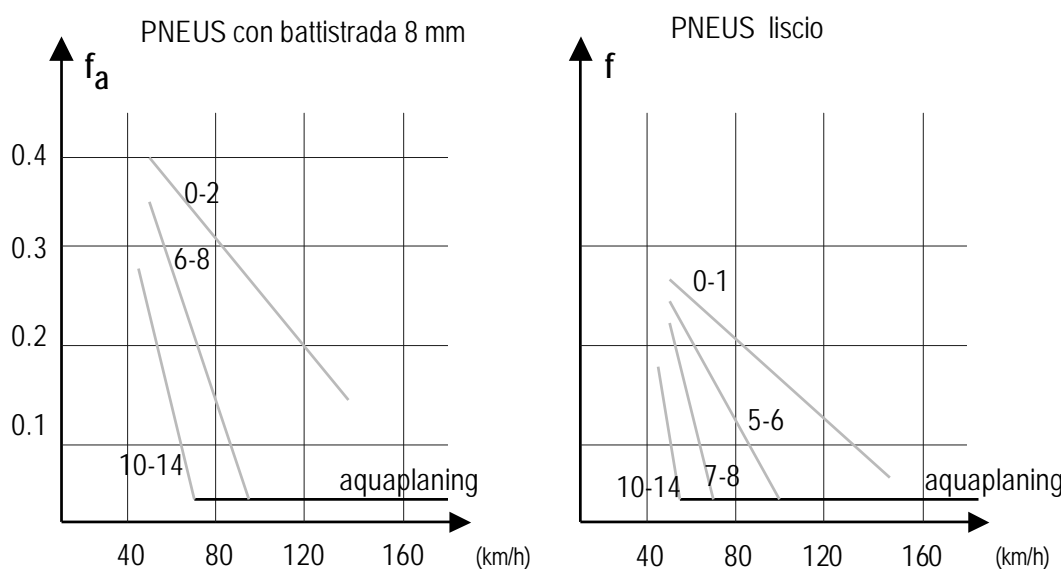
**Figura 3.6 – Andamento del coefficiente di aderenza  $f_a$  in funzione della velocità V (in km/h)**

Il coefficiente di aderenza diminuisce con l’aumentare della velocità, poco quando la strada è asciutta, più sensibilmente quando è bagnata.

Nella progettazione stradale, per motivi di sicurezza, è necessario riferirsi ai valori di aderenza su strada bagnata e con pneumatici in condizioni medie. Questi valori possono ricavarsi dalla seguente relazione sperimentale:

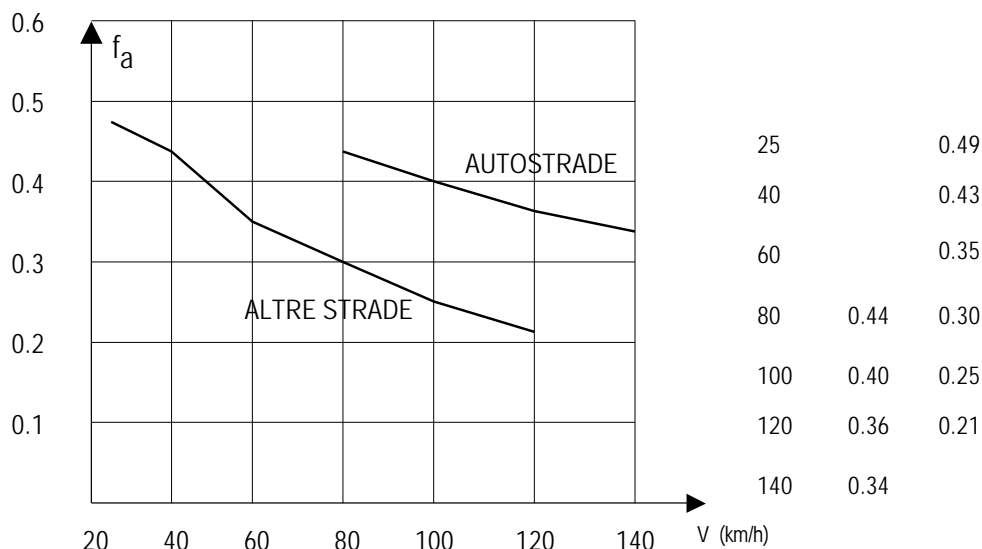
$$f_a = 0.214 \left( \frac{V}{100} \right)^2 - 0.64 \left( \frac{V}{100} \right) + 0.615 \tag{2.1}$$

con la velocità espressa in km/h, l’andamento della (2.1) è riportato Figura 3.6.



**Figura 3.7 – Influenza dell’acqua sul coefficiente di aderenza**

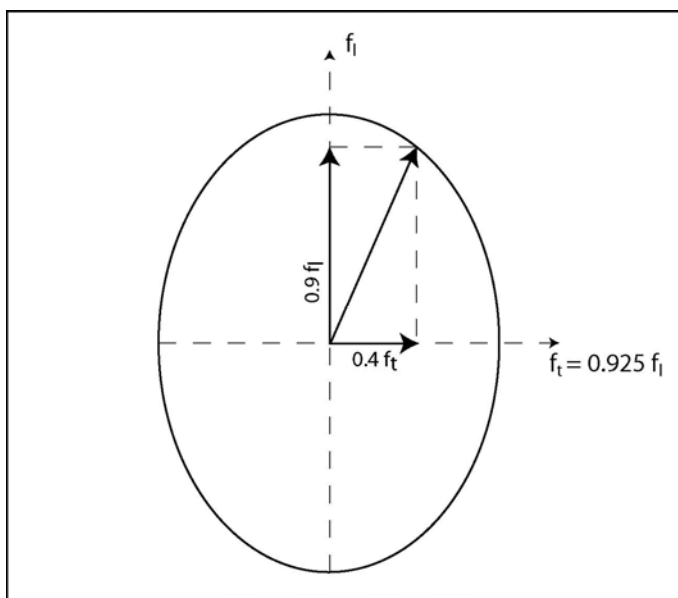




Se sul veicolo agiscono anche forze trasversali, dovute al vento o ad azioni centrifughe in curva, si desta anche una reazione di aderenza trasversale ortogonale al piano di rotolamento della ruota: si distinguono, in questo caso, un *coefficiente di aderenza longitudinale*  $f_l$  ed un *coefficiente di aderenza trasversale*  $f_t$ :

$$f_t = 0.925 f_l$$

Il legame tra  $f_l$  e  $f_t$  può essere rappresentato attraverso l'*ellisse di aderenza* (Figura 3.8), riportando l'andamento del coefficiente di aderenza al variare della direzione delle forze tangenziali applicate al pneumatico:



**Figura 3.8 – Ellisse di aderenza** ( $f_a^2 = f_t^2 + f_l^2$ )

#### 4. Resistenze al moto dei veicoli

Un veicolo incontra nel suo moto sulla via delle resistenze.

Se ad una ruota motrice su cui grava un carico  $P_a$ , peso aderente, si applica un momento motore, il cui corrispondente sforzo di trazione  $T$ , potrà verificarsi e mantenersi in movimento solo se  $R \leq T \leq 1000 f_a P_a$ , ove  $R$  rappresenta le resistenze in kg riferite ad una tonnellata di carico trainato.

Esse si distinguono in *resistenze ordinarie* e *resistenze addizionali*:

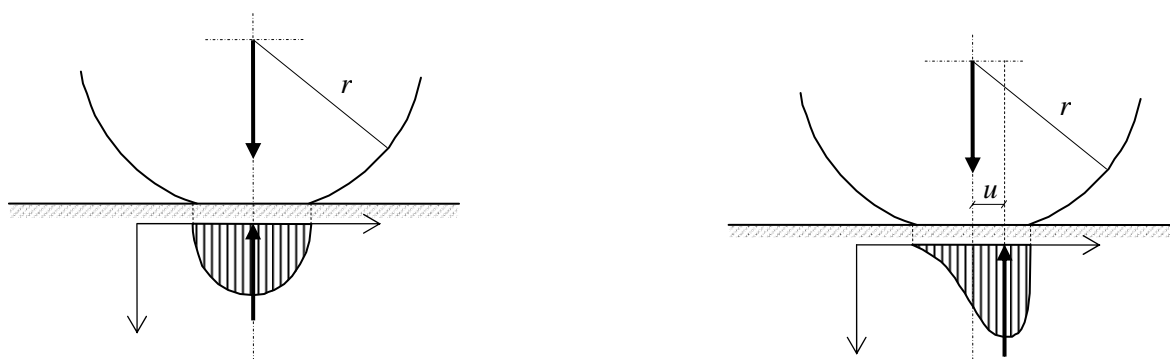
##### *Resistenze ordinarie*

Le resistenze ordinarie sono: la resistenza al rotolamento, la resistenza dell'aria, la resistenza di attrito ai perni e tutte le altre resistenze per urti e moti anomali dovuti alla irregolarità della strada.

##### *Resistenza al rotolamento*

Durante il moto l'area d'impronta del pneumatico assume una configurazione diversa da quella statica, sia per l'inerzia meccanica delle parti del pneumatico soggette a deformazioni, sia per l'isteresi elastica assorbita per deformazione; si generano, inoltre, slittamenti fra le superfici a contatto nella zona d'impronta, oltre ad un lavoro passivo a causa del movimento dell'aria entro il pneumatico per effetto del restringimento di sezione in corrispondenza della zona di contatto.

A tutte queste azioni è dovuta principalmente la resistenza al rotolamento e l'aumento di temperatura che si riscontra nei pneumatici dopo un certo percorso.



**Figura 4.1 – Spostamento della reazione della pavimentazione**

Da quanto detto la *resistenza al rotolamento* di un veicolo automobilistico dipende oltre che dalla natura e dallo stato delle superfici a contatto, dalla pressione di gonfiaggio, dalla temperatura e dalla velocità. Essa è principalmente dovuta allo spostamento della reazione della pavimentazione dal lato del moto rispetto all'asse della ruota (Figura 4.1), questo comporta una deformazione del diagramma delle pressioni per cui la risultante delle forze di reazione è eccentrica

rispetto alla forza che la ruota esercita sulla pavimentazione. Questo valore di eccentricità cresce con l'aumentare della velocità di avanzamento.

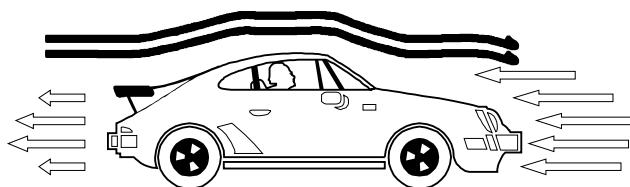
Esistono, quindi, delle relazioni empiriche per esprimere tale correlazione ( $V$  espressa in piedi al secondo):

$$\mu = 0.01 \left[ 1 + \frac{V}{147} \right] \quad [\text{kg/t}] \quad (\text{Taborek})$$

Si può anche fare riferimento ai seguenti valori approssimati espressi in [kg/t]:

- per  $V = 20$  km/h  $\mu = 15$  per autovetture
- $\mu = 20$  per autocarri
- per  $V = 100$  km/h  $\mu = 20$  per autovetture
- $\mu = 30$  per autocarri

### Resistenza dell'aria



La resistenza che il mezzo (l'aria) oppone all'avanzamento del veicolo è dovuta alle sovrapressioni che si generano nella parte anteriore del veicolo, alle depressioni che si generano sulla parte posteriore ed agli attriti lungo le fiancate; poiché nei veicoli stradali le azioni frontali sono largamente prevalenti su quelle laterali questa resistenza può scriversi (legge di Newton):

$$R_a = \frac{1}{g(2 \times 3.6^2)} \cdot \rho \cdot C_x \cdot S \cdot V^2 = \frac{1}{2g} \cdot \rho \cdot C_x \cdot S \cdot v^2 = KSV^2 \quad [\text{kg}]$$

avendo posto  $\frac{1}{g(2 \times 3.6^2)} \cdot \rho \cdot C_x = K$

dove:

$C_x$  è un coefficiente dipendente dalla forma del corpo o coefficiente di forma;

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] è la massa volumica dell'aria;

$S$  [m<sup>2</sup>] è la proiezione, su un piano normale alla direzione del moto, della superficie investita);

$V$  è la velocità del veicolo ( $V$  è espressa km/h e  $v$  in m/s).

	S (m <sup>2</sup> )	K
autovetture di serie	1.80 ÷ 2.50	0.0015 ÷ 0.0018
veicoli aerodinamici	1.50 ÷ 2.00	0.0010 ÷ 0.0015
autocarri e autobus	3.00 ÷ 7.00	0.0025 ÷ 0.0040
autoarticolati e autotreni	6.00 ÷ 9.00	0.0025 ÷ 0.0050

La resistenza di attrito ai perni è nettamente più bassa e può ritenersi conglobata nei valori dei coefficienti  $\mu$  prima indicati.

### Resistenze accidentali

#### Resistenza dovuta alla pendenza della strada

Si consideri un veicolo che si muova su una strada in salita.

La componente  $P \sin \alpha$ , essendo opposta al moto, rappresenta la resistenza addizionale di livelletta.

Dato il modesto valore di  $\alpha$  ( $P \sin \alpha \cong P \tan \alpha$ ), la resistenza di livelletta (in kg), per  $P$  espresso in tonnellate, risulta:

$$R_i = 1000 \cdot P \sin \alpha \cong 1000 \cdot P \tan \alpha$$

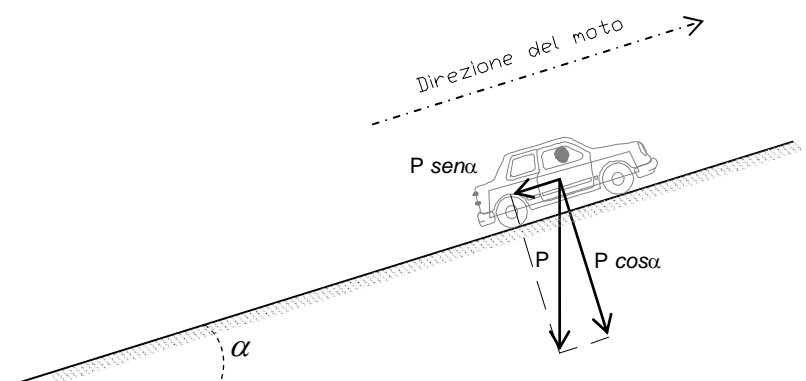


Figura 4.2 – Resistenza dovuta alla pendenza

Considerando, poi, la pendenza  $i$  in mm/m, cioè in per mille, si ha:

$$i = 1000 \tan \alpha \quad \text{e quindi:} \quad R_i = iP$$

La resistenza specifica, allora, risulterà:

$$r_i = \frac{R_i}{P} = i \quad [\text{kg/t}]$$

#### Resistenza dovuta alle curve

Resistenza  $\mu_c$  dovuta principalmente alle deformazioni in senso trasversale del pneumatico ed inversamente proporzionale al raggio della curva; per le autovetture e per raggi delle curve maggiori di 100 m di valore trascurabile rispetto alle altre, mentre per i mezzi pesanti e raggi di cur-

vatura bassi può raggiungere valori pari a  $8 \div 12 \text{ ‰}$  del peso  $P$ .

#### Resistenze dovute all'accelerazione

Ogni variazione positiva di velocità (accelerazione) induce una resistenza dovuta all'inerzia che vale:

$$F_i = 1000 \frac{dv}{dt} \frac{P}{g} \quad [\text{kg}]$$

dove  $\frac{dv}{dt}$  in  $\text{m/s}^2$  è l'accelerazione e  $P$  il peso totale del veicolo in tonnellate,  $g$  l'accelerazione di gravità.

La resistenza specifica risulterà allora:

$$f_i = \frac{1000}{g} \frac{dv}{dt} \cong 102 \frac{dv}{dt} \quad [\text{kg/t}]$$

In definitiva la resistenza totale all'avanzamento è data dalla seguente espressione:

$$R_{tot} = P \cdot r_{tot} = P \left( \mu + \mu_c \pm i \pm \frac{1000}{g} \frac{dv}{dt} \right) + R_a \quad [\text{kg}]$$

$$R_{tot} = P \left( \mu + \mu_c \pm i \pm 102 \frac{dv}{dt} \right) + R_a \quad [\text{kg}]$$

I segni meno che compaiono nella relazione sono relativi, rispettivamente, alla marcia in discesa ed alla fase di decelerazione.

Se  $V$  è costante:

$$R_{tot} = P(\mu + \mu_c \pm i) + R_a = P(\mu + \mu_c \pm i) + KSV^2 \quad [\text{kg}]$$

## 5. Visuali libere

### *Distanza di visibilità per l'arresto*

#### Equazione generale del moto

Quando un veicolo si muove con velocità costante, lo sforzo di trazione  $T$  a esso applicato è uguale alla somma di tutte le resistenze che incontra:

$$T = R_{tot} = P \cdot r_{tot} = P(\mu + \mu_c \pm i) + R_a \quad (4.1)$$

Quando, invece, il veicolo si muove di moto vario l'equazione generale del moto può scriversi:

$$T = R_{tot} = P \cdot r_{tot} = P \left( \mu + \mu_c \pm i \pm \frac{1000}{g} \frac{dv}{dt} \right) + R_a \quad (4.2)$$

Come visto in precedenza, durante tutta la fase in cui rimane applicato il momento frenante, sussiste l'equilibrio fra la reazione  $A$  esplicata dalla strada e la risultante  $\frac{M_f + M_a}{r}$ . Al limite dell'aderenza, se tutte le ruote del veicolo sono frenate, essendo  $f_a$  il coefficiente di aderenza e  $P$  il peso del veicolo in  $t$ , risulta:

$$\frac{M_f + M_a}{r} = 1000 f_a \cdot P \quad (4.3)$$

più correttamente nella (4.3) andrebbe considerata soltanto l'aliquota del coefficiente di aderenza impegnata longitudinalmente  $f_l$  (ricavabile attraverso la Figura 5.1 o dalla Tabella 5.2); l'equazione della trazione (4.2), tenendo presente che nella fase di frenatura la resistenza dovuta all'inerzia tende a far proseguire il veicolo nel suo moto mentre tutte le altre resistenze contribuiscono al rallentamento, si può scrivere:

$$1000 f_l P + P \left( \mu + \mu_c \pm i - \frac{1000}{g} \frac{dv}{dt} \right) + R_a = 0 \quad (4.4)$$

ricordando che oltre alla resistenza aerodinamica  $R_a$ , anche la resistenza al rotolamento  $\mu$  ed il coefficiente di aderenza  $f_l$  variano al variare della velocità, e che la resistenza in curva, per gli autoveicoli, può essere trascurata, si ha:

$$P[\mu(v) \pm i] + R_a(v) = P \cdot \frac{1000}{g} \frac{dv}{dt} - P \cdot 1000 f_l(v) \quad (4.5)$$

dalla (4.5) è, pertanto, possibile ricavare in caso di frenatura il valore della decelerazione  $\gamma$ .

$$\gamma = \frac{dv}{dt} = \frac{g}{1000} \left[ \mu(v) \pm i + 1000 f_l(v) + \frac{R_a(v)}{P} \right] \quad (4.6)$$

ricordando, inoltre, che:  $v = \frac{ds}{dt}$  e  $a = \frac{dv}{dt}$ , si può determinare lo spazio d'arresto come:

$$ds = v \frac{dv}{a} \quad \int_0^{D_1} ds = \int_{v_0}^{v_1} \frac{v}{a} dv$$

in definitiva:

$$D_1 = - \int_{v_0}^{v_1} \frac{v}{\gamma} dv \quad D_1 = - \int_{v_0}^{v_1} \frac{1000 \cdot v}{g \left[ 1000 f_l(v) + \frac{R_a(v)}{P} + \mu(v) \pm i \right]} dv \quad (4.7)$$

dove la velocità  $v$  è espressa in m/s (il segno  $-$  nella (4.7) è dovuto al fatto che  $\gamma$  è una decelerazione).

La (4.7) diventa:

$$D_1 = - \frac{1}{3.6^2} \int_{v_0}^{v_1} \frac{V}{g \left[ f_l(V) + \frac{R_a(V)}{P \cdot 1000} + \frac{\mu(V)}{1000} \pm \frac{i}{1000} \right]} dV \quad (4.8)$$

con  $V$  espressa in km/h.

Assumendo il tempo di reazione del conducente e il tempo d'inerzia dei comandi pari a:

$$\tau = (2.8 - 0.01 V_0)$$

dove:

$V_0$  = velocità del veicolo all'inizio della frenatura, pari alla velocità di progetto desunta puntualmente dal diagramma della velocità in km/h;

$\tau$  = tempo complessivo di percezione, riflessione, reazione e attuazione in secondi.

Lo spazio percorso dal veicolo durante il tempo  $\tau$  è, pertanto, pari a:

$$D_2 = v_0 \times \tau = \frac{V_0}{3.6} \times \tau \quad (4.9)$$

In situazioni particolari, quali incroci o tratti di difficile lettura ed interpretazione (intersezioni, deviazioni, etc.), il tempo  $\tau$  così ottenuto deve essere maggiorato di 1 secondo, nel caso si tratti di strade extraurbane, e fino a 3 secondi in ambito urbano.

In definitiva, la distanza di visibilità per l'arresto, in base alle (4.7), (4.8) e (4.9), è:

$$D_a = D_1 + D_2 = v_0 \cdot \tau - \int_{v_0}^0 \frac{v}{g \left[ f_l(v) + \frac{R_a(v)}{P \cdot 1000} + \frac{\mu(v)}{1000} \pm \frac{i}{1000} \right]} dv \quad (4.10)$$

ed esprimendo la velocità in km/h:

$$D_a = \frac{V_0}{3.6} \cdot \tau - \frac{1}{3.6^2} \int_{v_0}^{v_1} \frac{V}{g \left[ f_l(V) + \frac{R_a(V)}{P \cdot 1000} + \frac{\mu(V)}{1000} \pm \frac{i}{1000} \right]} dV \tag{4.11}$$

la (4.10) può essere scritta per  $v_1 = 0$  (arresto del veicolo), conglobando nel coefficiente  $f_e$  (detto coefficiente di aderenza equivalente) il coefficiente  $f_l(v)$  di aderenza, quello  $\frac{\mu(v)}{1000}$  di resistenza al rotolamento e quello  $\frac{R_a(v)}{P \cdot 1000}$  di resistenza dell'aria, come:

$$D_a = v_0 \cdot \tau + \frac{v_0^2}{2g \left( f_e \pm \frac{i}{1000} \right)} \tag{4.12}$$

ed esprimendo la velocità in km/h:

$$D_a = \frac{V_0}{3.6} \times \tau + \frac{1}{3.6^2} \times \frac{V_0^2}{2g \left( f_e \pm \frac{i}{1000} \right)} \tag{4.13}$$

La velocità  $V$  deve assumersi pari alla velocità di progetto nel punto in cui inizia la frenatura.

Velocità (km/h)		25	40	60	80	100	120	140
$f_l$	Autostrade	-	-	-	0.44	0.40	0.36	0.34
	Altre Strade	0.45	0.43	0.35	0.30	0.25	0.21	-

Tabella 5.1 – Coefficienti di aderenza longitudinale (norme C.N.R.)

V(km/h)	Coefficiente equivalente $f_e$	
	Autostrade	Altre strade
30	-	0,51
40	-	0,48
50	-	0,46
60	-	0,43
70	-	0,40
80	0,51	0,38
90	0,49	0,36
100	0,47	0,35
110	0,46	0,33
120	0,45	0,31
130	0,44	-
140	0,43	-

Tabella 5.2 - Valori del coefficiente equivalente  $f_e$

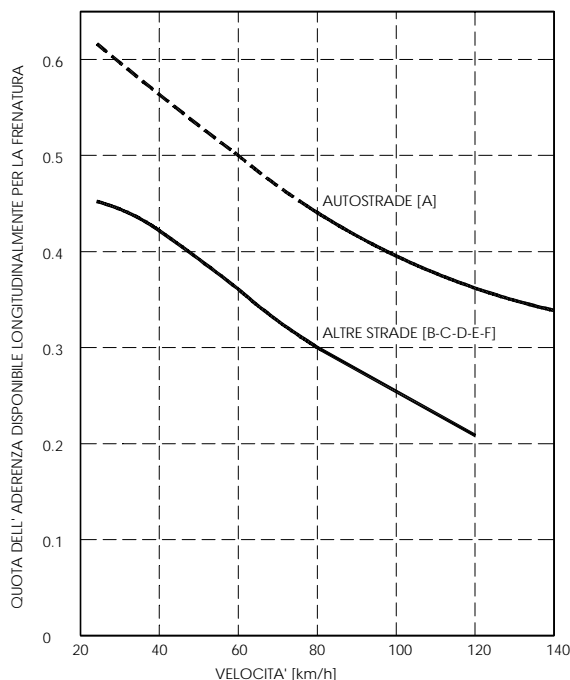


Figura 5.1 – Andamento del coefficiente  $f_l$



**Calcolo della distanza di visibilità per l'arresto**

Per calcolare la distanza di visibilità per l'arresto si può fare ricorso alle relazioni (4.11) e (4.13), in alternativa, più semplicemente è possibile utilizzare i due abachi riportati nella Normativa CNR, validi per le strade ordinarie (tipo B, C, D, E, F) e per le autostrade (tipo A). I due grafici sono stati elaborati sulla base di condizioni progettuali di tipo *medio*. In particolare, per le **condizioni ambientali** si è assunto:

$$\rho = \text{massa volumica dell'aria in condizioni standard} = 1.15 \quad [\text{kg/m}^3]$$

$$P = \text{peso autovettura media} = 1250 \quad [\text{kg}]$$

$$C_x = \text{coefficiente aerodinamico} = 0.35$$

$$S = \text{sezione trasversale dell'autovettura} = 2.10 \quad [\text{m}^2]$$

Inoltre, tenendo conto che per le autovetture, alle alte velocità, la resistenza dell'aria  $R_a$  è ben più importante della resistenza al rotolamento  $\mu$ , nella elaborazione dei suddetti abachi ne è stata trascurata l'influenza.

In corrispondenza di situazioni particolari (intersezioni complesse, innesti, deviazioni, etc.), il tempo complessivo di reazione  $\tau$  deve essere maggiorato di 1 secondo nel caso di *strade extraurbane* e fino a 3 secondi in ambito *urbano*.

In tal caso, la distanza di visibilità per l'arresto ottenuta dagli abachi deve essere incrementata delle seguenti quantità espresse in metri:

$$v_0 \times 3 \text{ sec} = \frac{V_0}{3.6} \times 3 \text{ sec} \quad (\text{in ambito urbano}) \quad (4.14)$$

$$v_0 \times 1 \text{ sec} = \frac{V_0}{3.6} \times 1 \text{ sec} \quad (\text{in ambito extraurbano}) \quad (4.15)$$

**Distanza di visibilità per la manovra di cambiamento di corsia**

Si valuta lo spazio necessario con la seguente espressione:

$$D_c = 9.5 \times v = 2.6 V \quad [\text{m}]$$

dove:

$v$  = velocità del veicolo in [m/s], op.  $V$  in [km/h];

9.5 = numero di secondi ottenuti come somma del tempo necessario a percepire e riconoscere lo stato di deflusso in corsia (5.5 secondi) e del tempo necessario alla decisione ed alla effettuazione della manovra di cambiamento di una sola corsia (4 secondi).

**Distanza di visibilità per il sorpasso**

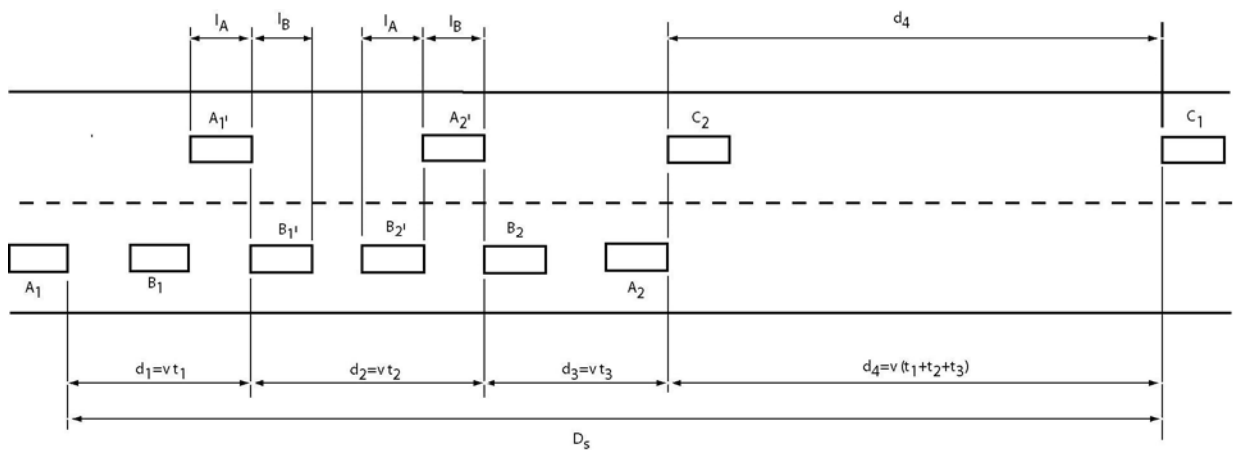
Per la progettazione delle strade a due corsie s'introduce il concetto di distanza  $D_s$ , di visibilità per il sorpasso, la quale è data dalla lunghezza del tratto di corsia di senso opposto che il conducente di un veicolo deve vedere libera da ostacoli affinché possa eseguire con sicurezza la manovra di sorpasso.

Per il calcolo di questa distanza è necessario tenere presente il comportamento dell'utente durante il sorpasso, il quale può ricondursi fondamentalmente a uno dei due schemi seguenti:

1. il veicolo marciando sulla propria corsia a una certa velocità ne raggiunge uno più lento, e, avendo visto libera la corsia di senso opposto, esegue il sorpasso senza modificare la sua velocità;
2. il veicolo, avendone raggiunto uno più lento, è dapprima costretto a rallentare per accordarsi a quest'ultimo e successivamente, non appena scorge libera la corsia di senso opposto, accelera ed esegue il sorpasso.

Si riporta lo schema considerato dalle norme italiane, il quale è del primo tipo.

Siano A il veicolo sorpassante, B il veicolo da sorpassare e C un terzo veicolo che si avvicina ai primi due sull'altra corsia. Interessa conoscere la minima distanza fra A e C nell'istante in cui ha inizio il sorpasso, affinché questo possa avvenire con sicurezza.



**Figura 5.2 – Schema di manovra di sorpasso**

Sia  $v$  (in m/s) la velocità, per ipotesi uguale, di A e C, e  $v - \Delta v$  quella di B. Indichiamo con 1 la posizione dei tre veicoli nell'istante in cui A ritiene di poter iniziare il sorpasso e chiamiamo  $t_1$  il tempo impiegato da A per portarsi nella posizione 1', cioè all'altezza della coda di B. Il tempo  $t_2$  necessario perché A passi dalla posizione 1' a quella 2' in cui ha superato B è:

$$t_2 = \frac{l_A + l_B}{\Delta v} \tag{4.16}$$

dove  $l_A$  e  $l_B$  sono le lunghezze rispettivamente di A e di B. Sia infine  $t_3$  il tempo impiegato da A per rientrare nella propria corsia assumendo la posizione 2.

Durante il tempo  $t_1 + t_2 + t_3$  i veicoli A e C hanno percorso entrambi lo spazio  $v(t_1 + t_2 + t_3)$ , per cui la minima distanza  $D_S$  alla quale C deve essere visto da A perché questo possa iniziare la manovra di sorpasso si scrive:

$$D_S = 2v(t_1 + t_2 + t_3) = 2v\left(t_1 + \frac{2l_m}{\Delta v} + t_3\right) \quad (4.17)$$

dove si è posto  $l_m = \frac{l_A + l_B}{2}$ .

I tempi  $t_1$  e  $t_3$ , come risulta da osservazioni sperimentali, variano poco con la velocità: le norme italiane assumono  $t_1 = t_3 = 4s$ . D'altra parte anche il rapporto  $\frac{l_m}{\Delta v}$  varia entro limiti alquanto ristretti: infatti, se  $l_m$  è piccolo, B è un'autovettura o un veicolo industriale di piccole dimensioni e quindi veloce, per cui anche  $\Delta v$  è piccolo; se invece  $l_m$  è grande, B è un veicolo industriale di grosse dimensioni, quindi lento, per cui anche  $\Delta v$  è grande. Tenendo conto di queste considerazioni si può porre mediamente:

$$\frac{l_m}{\Delta v} \approx 1s$$

Sostituendo questi valori nella (6.2), questa diventa:

$$D_S = 20v = 5.5 V \quad (4.18)$$

che fornisce l'espressione della distanza di visibilità (in  $m$ ) per il sorpasso in funzione della velocità.