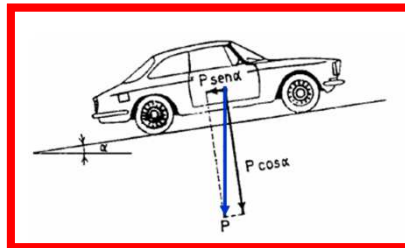




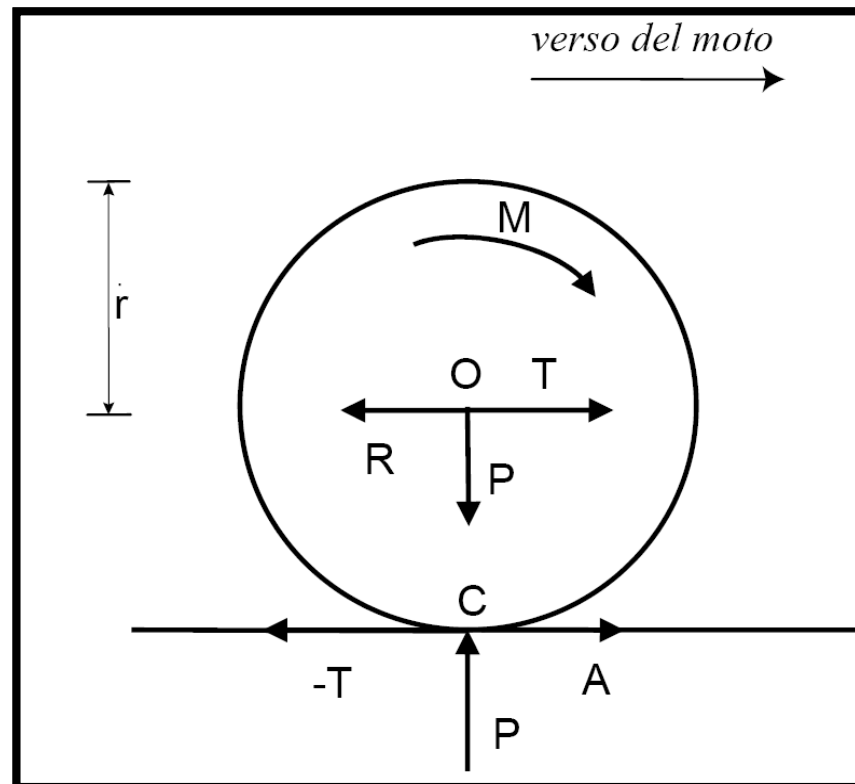
COSTRUZIONE DI STRADE

EQUAZIONE DEL MOTO E ANDAMENTO PLANIMETRICO DELL'ASSE STRADALE



EQUAZIONE DEL MOTO

Si prendano in considerazione una coppia di ruote motrici di un veicolo stradale e aventi raggio r . Sull'asse delle ruote agisce un momento torcente M , che tende a farle girare.



T e $-T$: forze rispettivamente applicate nei punti O e C e di modulo pari a M/r . Il momento M può essere sostituito dall'applicazione di queste due forze (forze di **trazione**);

P : risultante delle forze normali alla strada (forza **peso** agente sulle ruote motrici);

R : risultante delle forze che si oppongono all'avanzamento del veicolo (**resistenze al moto**);

A : componente della reazione esplicata sulle ruote dalla strada, avente direzione del moto e verso concorde o opposto al moto (**aderenza**). Il modulo varia da 0 a F_a .

EQUAZIONE DEL MOTO

Le due ruote si comportano come un corpo unico vincolato nei punti O e C, in cui nascono reazioni vincolari le cui componenti parallele alla direzione del moto risultano essere, rispettivamente, R ed A. Si possono avere i seguenti casi:

$$T < R \text{ e } T < F_a$$



I vincoli non cedono né in O né in C e le ruote rimangono ferme. **NESSUN MOTO.**

$$R < T < F_a$$



Il vincolo in O cede mentre quello in C resiste, si ha rotazione attorno al punto C. Condizione necessaria affinché si verifichi il **MOTO.**

$$F_a < T < R$$



Le resistenze al moto sono superiori al valore limite dell'aderenza, in questo caso il vincolo in C cede mentre quello in O resiste. Si ha una rotazione attorno al punto O con conseguente **SLITTAMENTO** delle ruote.

EQUAZIONE DEL MOTO

Equazione della locomozione o del moto:

$$R < T < F_a$$

$T > R$
CONDIZIONE DI MOTO

$T < F_a$
CONDIZIONE DI ADERENZA

CONDIZIONE DI ADERENZA

Il moto di puro rotolamento, con contatto puntiforme, nella realtà non esiste, poiché esso presupporrebbe che le due superfici di contatto fossero infinitamente rigide. Qualunque ruota e qualsiasi sede stradale risultano, tuttavia, più o meno deformabili e ciò comporta l'esistenza di una **superficie di contatto** tra ruota e sede stradale, avente un'area determinata.

Per **aderenza** si intende il **massimo valore della sollecitazione tangenziale** che la ruota può trasmettere alla strada attraverso la corrispondente superficie di contatto.

$$F_a = P_a \cdot f_a$$

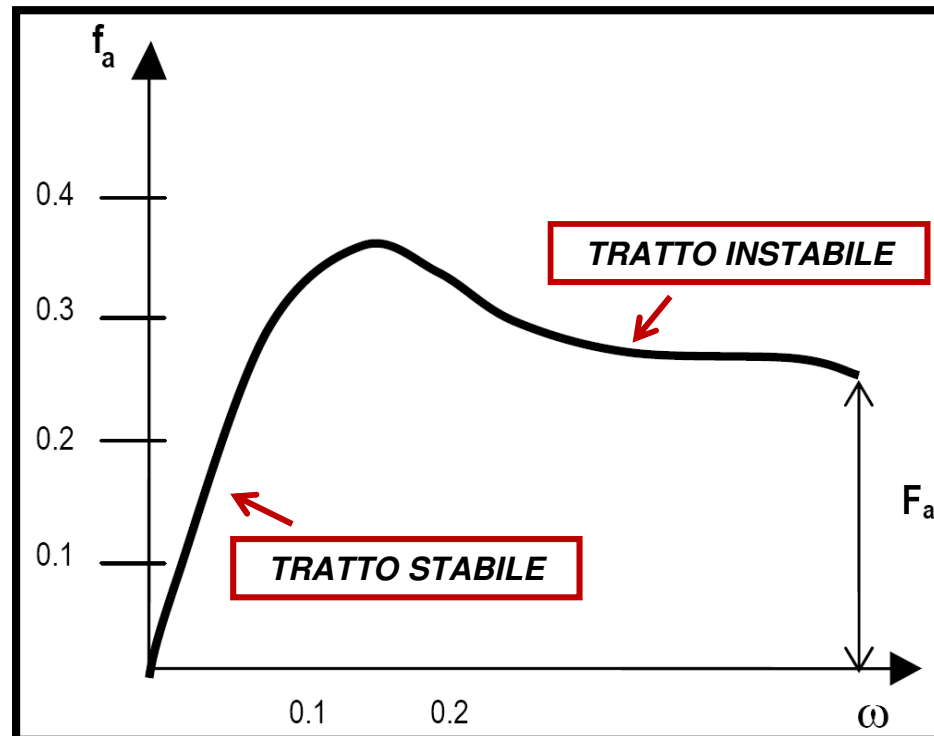
F_a : valore limite della forza di aderenza;

P_a : peso aderente sulle ruote motrici;

f_a : coefficiente di aderenza.

CONDIZIONE DI ADERENZA

ANDAMENTO DEL COEFFICIENTE DI ADERENZA IN FUNZIONE DELLO SCORRIMENTO



Nel primo tratto si ha proporzionalità tra coefficiente di aderenza e scorrimento (**tratto stabile**) fino a raggiungere il valore limite dell'aderenza.

Oltre tale limite le ruote cessano di rotolare e slittano (**tratto instabile**).

f_a : coefficiente di aderenza;
 ω : scorrimento.

CONDIZIONE DI ADERENZA

Il **coefficiente d'aderenza** f_a viene determinato sperimentalmente ed è notevolmente variabile in funzione delle condizioni degli pneumatici, della velocità praticata e delle condizioni meteorologiche, che influenzano lo stato delle superfici a contatto. Alcuni valori per diverse tipologie di superficie sono:

SUPERFICIE	f_a
CONGLOMERATO BITUMINOSO ASCIUTTO	0,6-0,9
CONGLOMERATO BITUMINOSO APPENA BAGNATO	0,25-0,35
CONGLOMERATO BITUMINOSO BAGNATO	0,35-0,60
CALCESTRUZZO ASCIUTTO	0,8-0,9
CALCESTRUZZO BAGNATO	0,70
GHIAIA	0,60
TERRA BATTUTA BAGNATA	0,55
TERRA BATTUTA ASCIUTTA	0,70
NEVE	0,1-0,25
GHIACCIO	0,05-0,1

CONDIZIONE DI ADERENZA

Al fine di ottenere valori limite di aderenza elevati risulta opportuno rendere massimo il cosiddetto **peso aderente** \underline{P}_a , gravante sulle ruote motrici.

Il peso aderente si ottiene dal prodotto:

$$\underline{P}_a = \alpha \cdot P$$

\underline{P} : Peso totale sulla ruota;
 α : rapporto di aderenza.

Il rapporto di aderenza

$$\alpha = \frac{\underline{P}_a}{P}$$

può assumere i seguenti valori:

- $\alpha=1$ → VEICOLI A TRAZIONE INTEGRALE
- $\alpha=0,5$ → VEICOLI LEGGERI
- $\alpha=0,25$ → VEICOLI PESANTI

RESISTENZE AL MOTO

Le **resistenze** che si oppongono al moto si dividono in:

- **RESISTENZE IN RETTILINEO E ORIZZONTALE:**
 - RESISTENZA AL ROTOLAMENTO;
 - RESISTENZA AI PERNI (trascurata);
 - RESISTENZA AL MEZZO;
- **RESISTENZA DOVUTA ALLA PENDENZA;**
- **RESISTENZA DOVUTA ALLE FORZE DI INERZIA;**
- **RESISTENZA DOVUTA ALLE CURVE** (trascurata nella formula).

$$R_{TOT} = P \cdot w \pm P \cdot i + Cx \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \pm \frac{P}{g} (1 + \mu) \frac{dv}{dt}$$

ROTOLAMENTO E PERNI

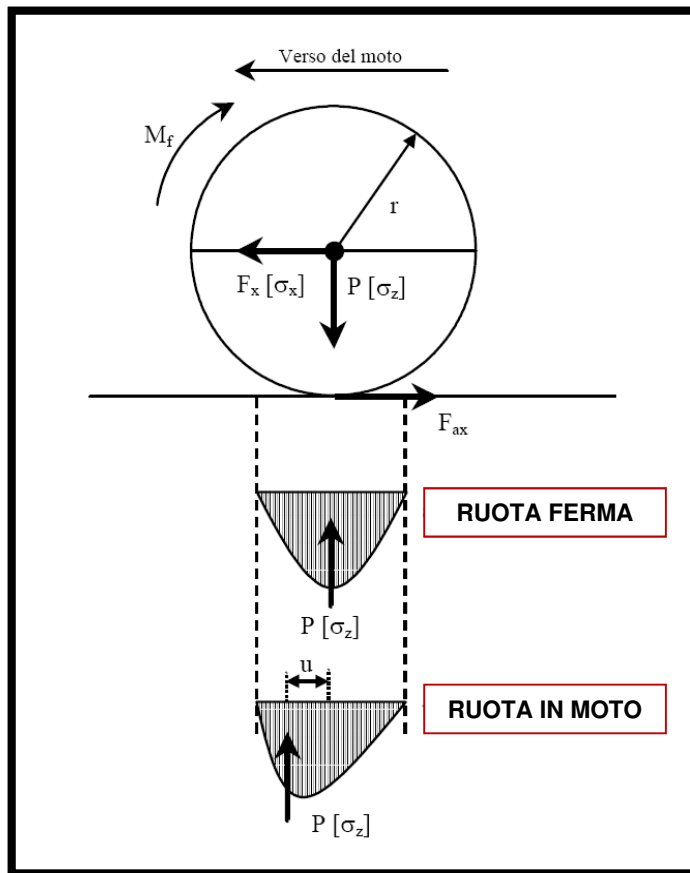
PENDENZA

MEZZO

FORZE D'INERZIA

RESISTENZE AL MOTO

RESISTENZE IN RETTILINEO E ORIZZONTALE: RESISTENZA AL ROTOLAMENTO



La distribuzione delle pressioni tra ruota e sede stradale è **simmetrica** (massima al centro dell'area di impronta e minima ai bordi) quando il veicolo è **fermo**.

Se il veicolo è **in moto** la distribuzione delle pressioni tra pneumatico e superficie d'appoggio **non è simmetrica**, ma presenta valori maggiori nella metà anteriore dell'area di impronta, rispetto al verso del moto.

Ne consegue che la risultante delle pressioni, in ogni caso pari al peso \underline{P} , non passa per il centro della ruota, ma risulta spostata rispetto ad esso di un valore \underline{u} : si crea quindi un momento $\underline{M}_f = \underline{P}^* \underline{u}$ che si oppone al movimento.

RESISTENZE AL MOTO

RESISTENZE IN RETTILINEO E ORIZZONTALE: RESISTENZA AL ROTOLAMENTO

Il **contatto ruota – pavimentazione** non è puntiforme, ma si esplica su un'area di dimensioni finite: ciò comporta la nascita di slittamenti tra le superfici a contatto che creano dissipazioni di energia.

La **resistenza al rotolamento** dipende, quindi, dai seguenti fattori:

- peso sulla ruota;
- caratteristiche delle due superfici a contatto;
- velocità del veicolo;
- pressione di gonfiaggio degli pneumatici;
- temperatura di esercizio.

RESISTENZE AL MOTO

RESISTENZE IN RETTILINEO E ORIZZONTALE: RESISTENZA AL ROTOLAMENTO

In buona approssimazione, la resistenza al rotolamento può essere considerata **proporzionale al peso** del veicolo:

$$R_t = P \cdot w$$

\underline{P} : peso sullo pneumatico [Kg];
 \underline{w} : resistenza specifica in rettilineo e orizzontale [Kg/t], di cui alcuni valori sono riportati in tabella.

TIPOLOGIA VEICOLO	TIPOLOGIA PAVIMENTAZIONE	w
VEICOLI LEGGERI	PAVIMENTAZIONE STABILE	10÷12
	PAVIMENTAZIONE COSTITUITA DA MATERIALI NON LEGATI	15÷30
VEICOLI PESANTI	PAVIMENTAZIONE STABILE	15÷18
	PAVIMENTAZIONE COSTITUITA DA MATERIALI NON LEGATI	20÷40

RESISTENZE AL MOTO

RESISTENZA AI PERNI

Si genera tra l'asse della ruota ed il cuscinetto a sfere, che trasforma l'attrito radente in volvente, e viene calcolata mediante la seguente espressione:

$$R_p = P \cdot r_p$$

\underline{P} : peso sullo pneumatico [Kg];

$\underline{r_p}$: resistenza specifica ai perni, di espressione:

$$r_p = f \cdot \frac{r}{R}$$



$$1 \div 2 \text{ Kg/t}$$

\underline{f} : coefficiente d'attrito;

\underline{r} : raggio del cuscinetto a sfera;

\underline{R} : raggio del pneumatico.

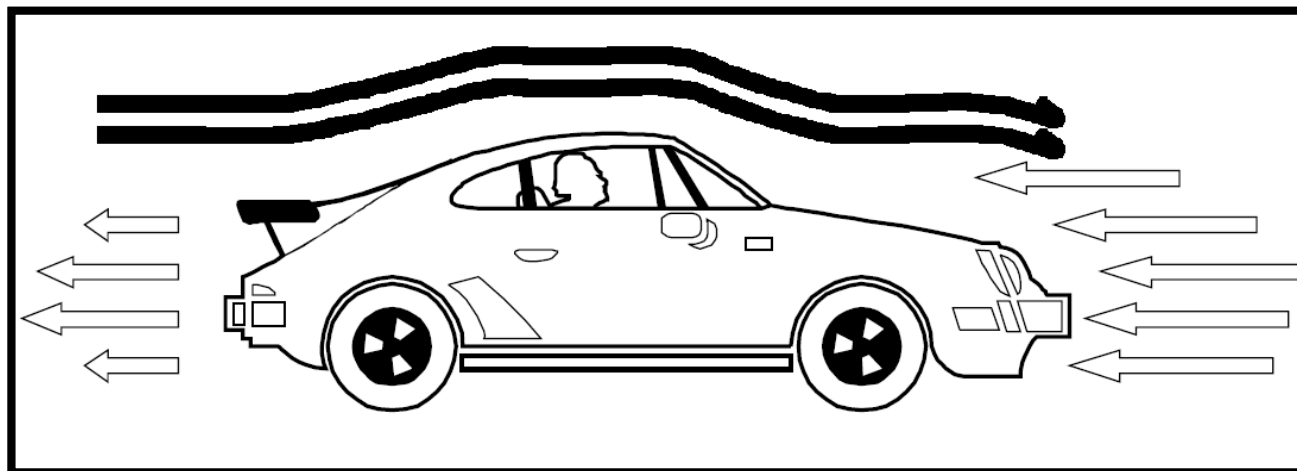
La resistenza ai perni risulta essere sostanzialmente nulla in ambito stradale, pertanto è **solitamente trascurata**.

RESISTENZE AL MOTO

RESISTENZA AL MEZZO

È dovuta alla resistenza che il mezzo attraversato, in questo caso l'aria, oppone all'avanzamento del veicolo. Essa è causata dai seguenti fattori:

- **sovrappressioni** che si generano nella parte **anteriore** del veicolo;
- **depressioni** che si generano nella parte **posteriore** del veicolo;
- **attriti** lungo le **fiancate** del veicolo.



RESISTENZE AL MOTO

RESISTENZA AL MEZZO

Per le autovetture, in generale, si possono trascurare i termini dovuti alla resistenza posteriore e laterale. La resistenza dall'aria risulta essere proporzionale al quadrato della velocità e può essere calcolata come:

$$R_a = \frac{1}{2} C_r \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \longleftrightarrow R_a = C_x \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \quad \text{(PIÙ USATA NELLA PRATICA)}$$

C_r : coeff. di forma di penetrazione aerodinamica nella formulazione francese, pari a 0,3 ÷ 0,8;

C_x : coeff. di forma di penetrazione aerodinamica nella formulazione anglosassone. È la metà di C_r ;

ρ : densità dell'aria, pari a 1,226 [kg/m³];

v = velocità del veicolo [m/s];

S : sezione maestra del veicolo [m²].

Si considera circa:

$S=1 \div 2$ [m²] → AUTOVETTURE

$S=4 \div 10$ [m²] → AUTOCARRI



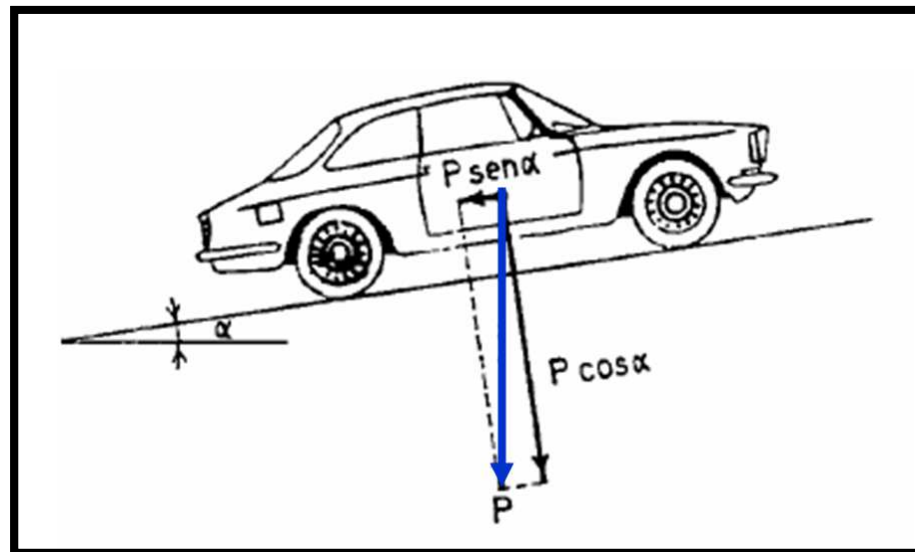
RESISTENZE AL MOTO

RESISTENZA DOVUTA ALLA PENDENZA

La resistenza dovuta alla **pendenza longitudinale** è data dalla componente del peso \underline{P} diretta nel verso contrario al senso del moto (in salita), dove i indica la pendenza longitudinale espressa in valore assoluto, dato da $\underline{\sin \alpha} \approx \underline{\tan \alpha} = i$. Qualora la componente del peso \underline{P} sia diretta nel verso del moto e, quindi, il veicolo stia percorrendo un tratto in discesa, il suo contributo alle resistenze si considera negativo, cioè verrà sommato allo sforzo di trazione \underline{T} .

SALITA \longrightarrow $R_i > 0$

DISCESA \longrightarrow $R_i < 0$



RESISTENZE AL MOTO

RESISTENZA DOVUTA ALLA PENDENZA

Si calcola con la seguente formula:

$$R_i = P \cdot \text{sen} \alpha = P \frac{\text{tg} \alpha}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha}} = P \cdot \text{tg} \alpha \cong P \cdot \alpha \quad [\text{N}]$$

\underline{P} : peso applicato nel baricentro [N];

$\underline{\alpha}$: angolo di inclinazione del tratto in salita o discesa;

Indicando con \underline{i} la pendenza in unità per mille (cioè se $\text{tg} \alpha = 0,0015$ allora $i = 15$) si ha che:

$$R_i = \frac{i}{1000} \quad [\text{N}]$$

RESISTENZE AL MOTO

RESISTENZA DOVUTA ALLE FORZE D'INERZIA

Ogni variazione della velocità induce una resistenza dovuta all'inerzia che può essere espressa come:

$$R_{in} = m \frac{dv}{dt} = \frac{P}{g} \frac{dv}{dt}$$

\underline{m} : massa del veicolo,
 \underline{P} : peso del veicolo [t],
 \underline{g} : accelerazione di gravità [m/s²]

L'espressione non tiene conto degli organi rotanti la cui massa, oltre che traslare, deve accelerare (o decelerare) angolarmente.

A tale scopo si introduce una massa fittizia \underline{m}' data dalla somma della massa reale e di quella che corrisponde all'effetto degli organi in rotazione:

$$m' = m(1 + \mu)$$

$\underline{\mu}$: coefficiente che tiene conto della presenza di masse rotanti, pari a (0,05÷0,10)

RESISTENZE AL MOTO

RESISTENZA DOVUTA ALLE FORZE D'INERZIA

La resistenza dovuta alle forze d'inerzia assume la seguente forma:

$$R_{in} = \frac{P}{g} (1 + \mu) \frac{dv}{dt}$$

Anche in questo caso il valore della resistenza può risultare positivo o negativo:

ACCELERAZIONE \longrightarrow $R_{in} > 0$

DECELERAZIONE \longrightarrow $R_{in} < 0$

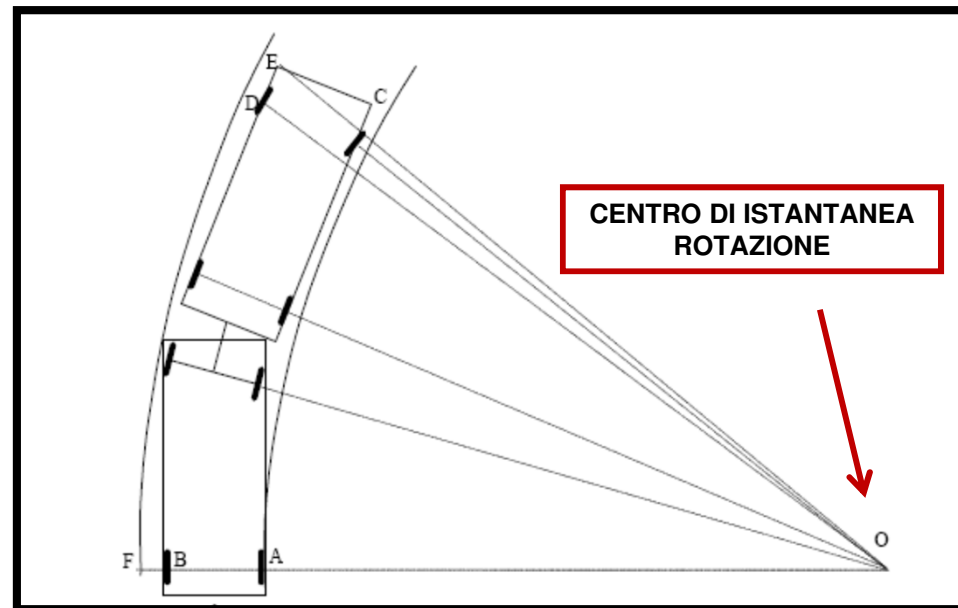
Si nota che R_{in} assume valori più significativi per i veicoli pesanti, piuttosto che per i veicoli leggeri.

RESISTENZE AL MOTO

RESISTENZA DOVUTA ALLE CURVE

Il moto dei veicoli in curva è caratterizzato dall'orientamento delle **ruote sterzanti**. Attraverso forze di **aderenza trasversale**, esse impongono al veicolo di seguire una determinata traiettoria.

Il moto rotatorio di un corpo è caratterizzato da un unico **centro di istantanea rotazione**, che rimane fisso durante il movimento; le imperfezioni riguardanti lo sterzo possono causare slittamenti che comportano resistenze al moto.



RESISTENZE AL MOTO

RESISTENZA DOVUTA ALLE CURVE

Può accadere che, in curva, si generino **deformazioni degli pneumatici** dovuti all'azione della **forza centrifuga**: tali deformazioni contribuiscono ad ostacolare il moto del veicolo.

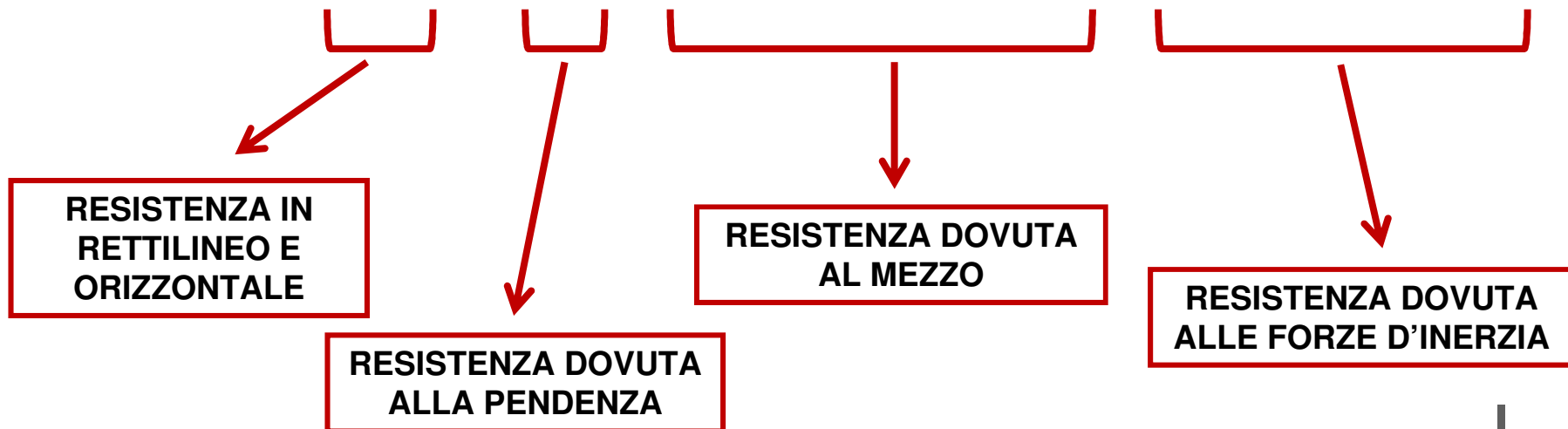
Le resistenze dovute alle curve sono difficilmente quantificabili e dipendono strettamente dal raggio della curva che il veicolo si trova a dover affrontare. Solitamente per curve di ampio raggio la resistenza è molto piccola e viene inglobata nella resistenza al rotolamento.

Per quanto riguarda le **curve di raggio ridotto**, cioè i tornanti, la resistenza assume valori elevati e se ne tiene conto limitando la pendenza longitudinale in curva (diminuzione attorno all'1 ÷ 2%).

RESISTENZE AL MOTO

La forza di trazione, per rendere possibile il moto, deve superare la **risultante delle resistenze al moto**. Tale risultante è data, quindi, dalla seguente espressione:

$$R_{TOT} = P \cdot w \pm P \cdot i + Cx \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \pm \frac{P}{g} (1 + \mu) \frac{dv}{dt}$$





ANDAMENTO PLANIMETRICO DELL'ASSE STRADALE



ANDAMENTO PLANIMETRICO DELL'ASSE

VISUALE LIBERA e VISIBILITÀ

DISTANZA DI VISUALE LIBERA

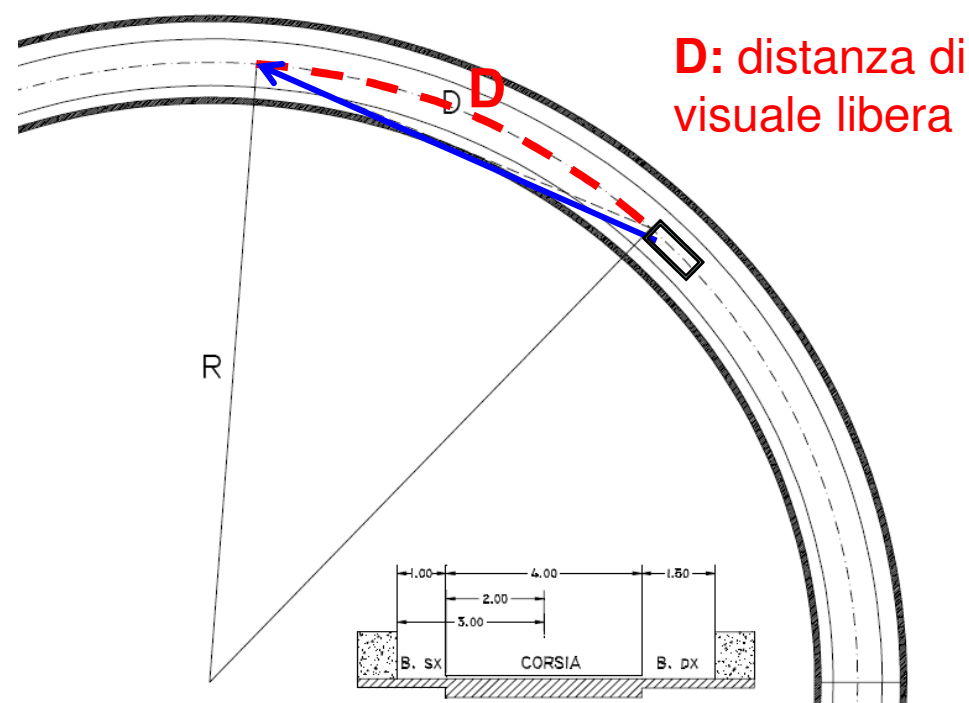
- D:

“lunghezza del tratto di strada che il conducente riesce a vedere davanti a se senza considerare l'influenza del traffico, delle condizioni atmosferiche e di illuminazione della strada”.

DEVE essere confrontata, in fase di progettazione, con le seguenti

DISTANZE:

- D_A - DISTANZA DI VISIBILITÀ PER L'ARRESTO (tutti i tipi di strada);
- D_S - DIST. DI VISIBILITÀ PER IL SORPASSO (str. a carreggiata unica);
- D_C - DISTANZA DI VISIBILITÀ PER LA MANOVRA DI CAMBIAMENTO DI CORSIA (strade a carreggiate separate).



ANDAMENTO PLANIMETRICO DELL'ASSE

D_A DISTANZA DI VISIBILITÀ PER L'ARRESTO (tutti i tipi di strada)

È pari allo spazio **minimo** necessario affinché un conducente possa **arrestare il veicolo** davanti ad un ostacolo imprevisto.

Si valuta (rettifili e curve) con la seguente espressione o con **grafici (DM 2001)**:

$$D_A = D_1 + D_2 = \frac{V_0}{3,6} \tau - \frac{1}{(3,6)^2} \int_{V_0}^{V_1} \frac{V}{g \left[f_1(V) \pm \frac{i}{100} \right] + \frac{R_a(V)}{m} + r_0(V)} dV \quad [m]$$

D_1 : spazio percorso nel tempo τ [m];



SPAZIO PSICOTECNICO

D_2 : sp. percorso in decelerazione [m];



SPAZIO DI FRENATURA

f_1 : quota limite del coefficiente di aderenza impiegabile longitudinalmente per la frenatura;

V_0 : velocità del veicolo a inizio frenatura (dal diagramma delle velocità) [km/h];

V_1 : velocità finale del veicolo, pari a 0 in caso di arresto [km/h];

r_0 : resistenza unitaria al rotolamento, trascurabile [N/kg];

m : massa del veicolo [kg];

i : pendenza longitudinale del tracciato [%];

R_a : resist. aerodin. (già definita) [N];

τ : tempo complessivo di reazione [s];

g : acceler. di gravità [m/s²]

ANDAMENTO PLANIMETRICO DELL'ASSE

D_A DISTANZA DI VISIBILITÀ PER L'ARRESTO

Per f_l possono adottarsi i seguenti valori (standard più elevati in autostrada):

VELOCITÀ [km/h]	25	40	60	80	100	120	140
$f_{l,MAX}$ AUTOSTRADE	-	-	-	0,44	0,40	0,36	0,34
$f_{l,MAX}$ ALTRE STRADE	0,45	0,43	0,35	0,30	0,25	0,21	-

Attenzione: f_l non coincide con f_a in quanto l'aderenza è una grandezza vettoriale (forza) che ha due componenti: longitudinale (accelerazione e frenatura) e trasversale (stabilità in curva).

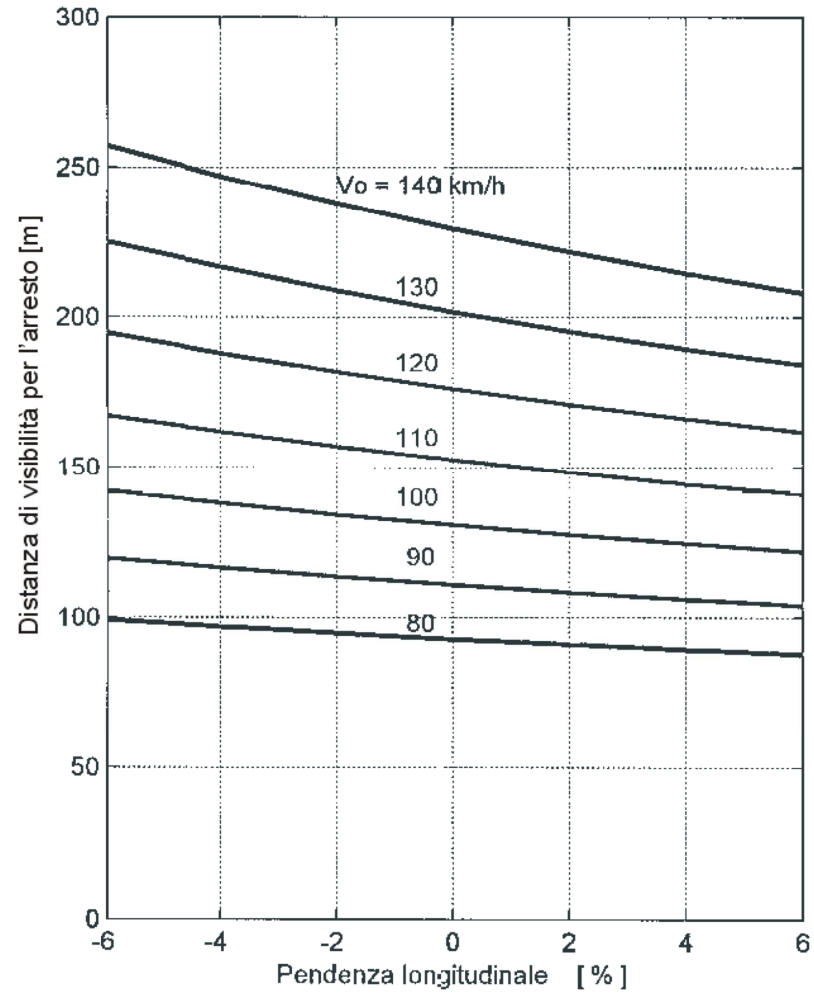
Il **tempo complessivo di reazione** τ (percezione, riflessione, reazione ed attuazione) **diminuisce con la velocità** [km/h] (più attenzione):

- 2,6 [s] a 20 [km/h]
 - 1,4 [s] a 140 [km/h]
- (+ 1-3 s in casi critici: intersezioni o difficile lettura)

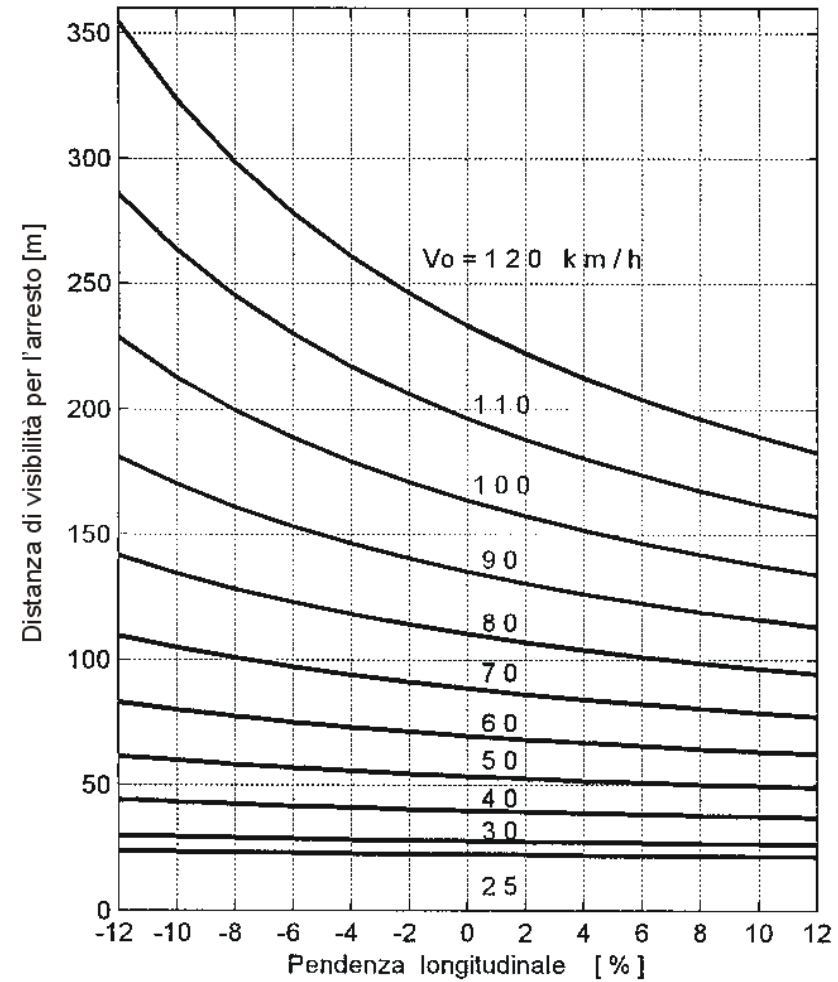
$$\tau = (2,8 - 0,01 \cdot V) \quad [s]$$

ANDAMENTO PLANIMETRICO DELL'ASSE

DISTANZE DI VISIBILITA' PER L'ARRESTO PER LE AUTOSTRADE



PER LE ALTRE STRADE



ANDAMENTO PLANIMETRICO DELL'ASSE

D_S DISTANZA DI VISIBILITÀ PER IL SORPASSO (strade a carregg. unica)

Visibilità occorrente per il **sorpasso**, in presenza di veicoli marcianti in senso opposto con la medesima velocità.

$$D_S = 20 \cdot v = 5,5 \cdot V \quad [\text{m}]$$

v : velocità espressa in [m/s] oppure in [km/h] (V) ricavate dal **DIAGRAMMA DELLE VELOCITÀ**

D_C DIST. DI VISIBILITÀ PER CAMBIAMENTO DI CORSIA (strade a carr. separate)

Visibilità occorrente per il **passaggio da una corsia** a quella ad essa adiacente.

$$D_C = 9,5 \cdot v = 2,6 \cdot V \quad [\text{m}]$$

v : velocità espressa in [m/s] oppure in [km/h] (V) ricavate dal **DIAGRAMMA DELLE VELOCITÀ**

APPLICAZIONI PROGETTUALI

1. Le verifiche dipendono dal **tipo di strada**: a carreggiate separate oppure a carreggiata unica;
2. L'unica verifica **SEMPRE NECESSARIA**, lungo TUTTO il tracciato è quella relativa **all'arresto**;
3. La visibilità per il **sorpasso** deve essere garantita solo in una conveniente percentuale del tracciato;
4. La visibilità per il **cambiamento di corsia** deve essere garantita solo in corrispondenza di **singolarità** quali immissioni e diversioni;
5. Il calcolo delle visuali libere va effettuato come segue:
 - **Conducente**: SEMPRE CON p.to di vista a **1,10** m da terra al centro della corsia percorsa;
 - **Ostacolo** per l'ARRESTO: a **0,10** m da terra al centro della medesima corsia del conducente;
 - **Ostacolo** MOBILE per il **SORPASSO**: a **1,10** m da terra al centro della corsia OPPOSTA a quella del conducente;
 - Per CAMBIO DI CORSIA deve essere possibile vedere il limite più lontano della **corsia ADIACENTE** a quella del conducente.