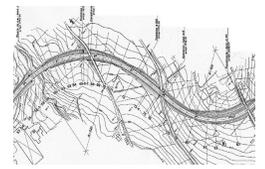


Cenni di Meccanica della Locomozione



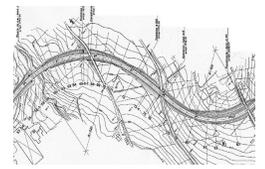
Meccanica della Locomozione

Definizione:

È la scienza che studia le CARATTERISTICHE del moto dei veicoli sotto l'azione delle *FORZE ATTIVE* (di trazione) e *PASSIVE* (resistenze).

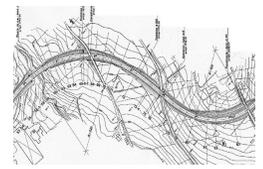
In particolare studia:

1. *natura ed entità delle forze resistenti;*
2. *fenomeno dell'aderenza;*
3. *stabilità del veicolo.*

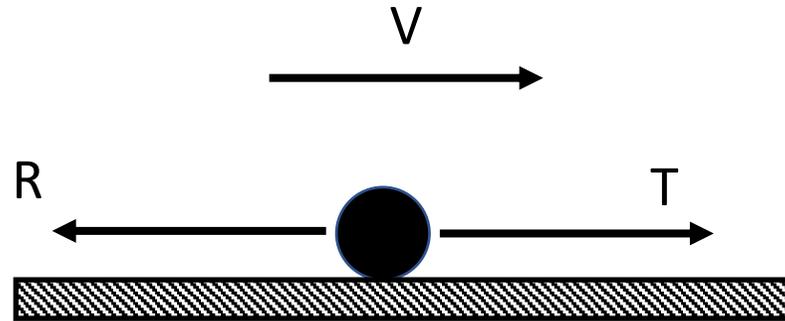


In ogni mezzo di trasporto, possono essere individuate 2 ordini di forze:

1. **FORZE ATTIVE o DI TRAZIONE (T):** aventi direzione e verso uguale a quelle del moto, generate da meccanismi a bordo del veicolo o da altri veicoli
2. **FORZE PASSIVE o RESISTENZE (R):** aventi direzione pari a quella del moto ma verso opposto e insorgono solo se il veicolo è in moto.



Nello studio del moto il veicolo, o il complesso dei veicoli, può essere studiato come un corpo rigido o, meglio, addirittura come un punto materiale:



Sotto queste ipotesi **l'equazione generale del moto** di un veicolo isolato si scrive:

$$T - R = M_e \frac{dv}{dt}$$

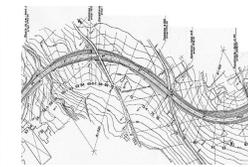
In cui:

T = somma di tutte le forze attive

R = somma di tutte le resistenze

Me = massa equivalente del veicolo

$\frac{dv}{dt}$ = accelerazione (con v velocità nella direzione del moto)



Le FORZE ATTIVE o DI TRAZIONE (T):

Nei veicoli ad **ADERENZA NATURALE**, la forza attiva viene trasmessa a terreno dagli stessi organi di rotolamento che trasferiscono al terreno anche il peso del veicolo (ferrovie, autoveicoli, veicoli commerciali, ecc.)



Questa foto di Autore sconosciuto è concessa in licenza da CC BY-SA



Questa foto di Autore sconosciuto è concessa in licenza da CC BY-SA

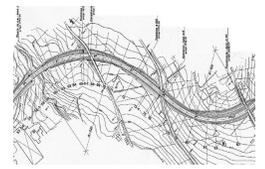


Questa foto di Autore sconosciuto è concessa in licenza da CC BY-SA

Nei veicoli ad **ADERENZA ARTIFICIALE**, la forza attiva viene trasmessa al terreno anche da altri organi (vedi la fune traente nei mezzi funicolari)



Questa foto di Autore sconosciuto è concessa in licenza da CC BY-SA



Per i veicoli ad aderenza naturale la forze attiva o di trazione trasmessa da una ruota su cui grava il peso P , ha un limite superiore imposto dall'ADERENZA:

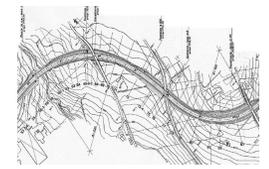
$$T_x \leq f_x P$$

dove:

T_x =forze attive nella direzione del moto

f_x = coefficiente di aderenza nella direzione del moto

P =aliquota del peso del veicolo che grava su quella ruota



RESISTENZE

Quando un veicolo si muove spinto dalla forza motrice T si generano delle forze R , per lo più contrarie ad T ed al moto, che chiamiamo *resistenze*.

La resistenza complessiva R è data da:

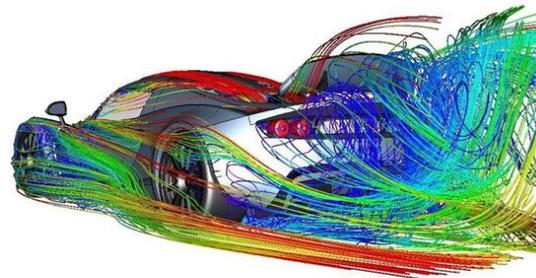
$$R = R_o + R_a$$

Resistenze **ADDIZIONALI**

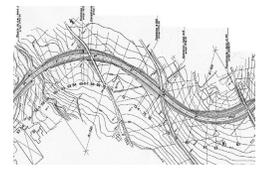
sono dovute alle accidentalità del tracciato e comunque quando le condizioni del moto sono diverse da quelle di moto uniforme e rettilineo.

Resistenze **ORDINARIE**

sono presenti durante tutte le fasi del moto e predominanti durante le condizioni di moto rettilineo, uniforme ed in piano.



Questa foto di Autore sconosciuto è concesso in licenza da CC BY-SA

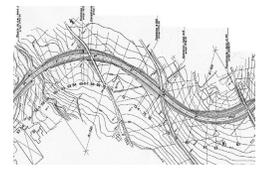


Le resistenze ORDINARIE si suddividono in:

$$R_o = R_1 + R_2$$

R_1 = è la resistenza di rotolamento, inerente alle coppie cinematiche che costituiscono il sistema veicolo-ruota-terreno (coppia perno-cuscinetto, coppia ruota-terreno)

R_2 = è la resistenza del mezzo in cui si muove il veicolo



E le resistenze ADDIZIONALI si suddividono in:

$$R_a = R_i + R_c$$

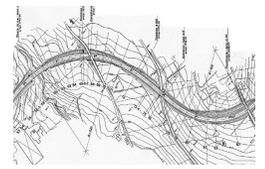
R_i = è la resistenza dovuta alla pendenza

R_c = è la resistenza dovuta alla curva

Con R si indicano le resistenze totali, mentre con r o μ si indicano i valori delle resistenze unitarie o specifiche:

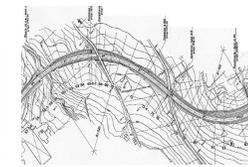
$$r = \mu = \frac{R}{P} = \left[\frac{kg}{t} \right]$$

Dove P è il peso del veicolo



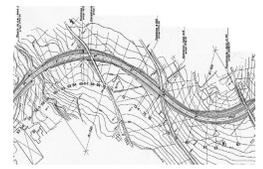
Nel moto di un veicolo o di qualsiasi sistema di trasporto possiamo distinguere varie fasi di marcia (movimento):

1. avviamento
2. regime
3. lancio o coasting
4. frenatura



Caratterizzazione delle fasi di esercizio

Fasi	Condizioni di moto	Velocità	Accelerazione	Forze
SOSTA		$v=0$	$dv/dt=0$	$T=0$ $I=0$ $R=0$
MOVIMENTO	Avviamento $T - R = M_e \frac{dv}{dt}$	$v>0$	$dv/dt>0$	$T>0$ $I<0$ $R \neq 0$
	Regime $T - R = 0$	$v=cost$	$dv/dt=0$	$T=R$ $I=0$ Moto uniforme
	Lancio o rallentamento $-R = M_e \frac{dv}{dt}$	$v>0$	$dv/dt<0$	$T=0$ $I=-R$
	Frenatura $-(R + F_f) = M_e \frac{dv}{dt}$	$v>0$	$dv/dt<0$	$T=0$ $I>0$ $R \neq 0$ $F_f \neq 0$



- Il ciclo standard del moto comprende tutte le fasi meccaniche del movimento *avviamento-regime- lancio- frenatura* (***ciclo completo***)
- Una fase di movimento deve essere composta almeno da un avviamento ed una frenatura (***ciclo ridotto***)
- Possono non essere presenti il regime ed il lancio.



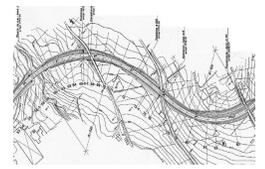
Questa foto di Autore sconosciuto è concesso in licenza da CC BY SA

NO REGIME
NO LANCIO



Questa foto di Autore sconosciuto è concesso in licenza da CC BY-SA-NC

FASE DEL MOTO PREVALENTE
REGIME



STABILITA' DEL VEICOLO

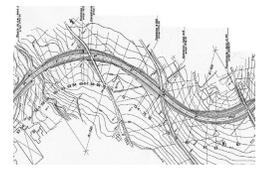
Occorre che durante il moto, il veicolo o il complesso dei veicoli sia **STABILE** ovvero che si verifichino due condizioni:

1. Che il veicolo segua esattamente il **percorso previsto (o prescritto)**, senza che si verifichino avvenimenti che portino il veicolo stesso fuori di tale percorso.
2. Che il veicolo non assuma di per se stesso **assetti pericolosi ed instabili**.



Questa foto di Autore sconosciuto è concesso in licenza da [CC BY-NC-ND](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)





1. Perché si verifichi la prima condizione occorre che vi siano le condizioni affinché il contatto ruota-terreno sia stabile.

Ovvero, deve essere soddisfatta la condizione di aderenza agli effetti delle forze longitudinali:

$$T_x \leq f_x P$$

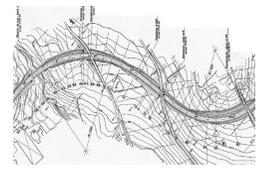
Ma, su strada, deve anche essere assicurata la condizione di aderenza in senso trasversale:

$$T_y \leq f_y P$$

T_y =forze attive nella direzione trasversale al senso del moto

f_y = coefficiente di aderenza nella direzione trasversale del moto

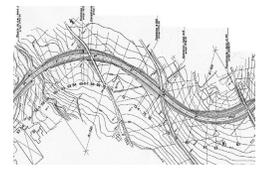
P =aliquota del peso del veicolo che grava su quella ruota



2. Agli effetti della seconda condizione, considerando le condizioni di stabilità al **ribaltamento**, è necessario che la risultante delle forze trasmesse al terreno cada entro il perimetro dei punti di appoggio delle varie ruote ed organi di rotolamento.

Ovvero che per nessuna ruota si annulli il peso trasmesso al terreno.





CONDIZIONI DI STABILITA' DEL VEICOLO

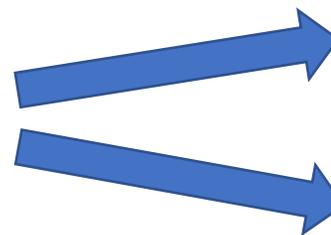
Ruota

Definizione

E' l'organo di rotolamento preponderante nei mezzi di trasporto terrestri.
Rappresenta due coppie cinematiche:

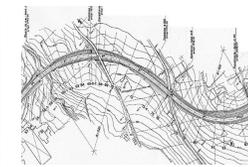
1. La **coppia di frizione**, propriamente detta, fra la superficie esterna della ruota (cerchio o cerchione) e la via di corsa (strada, rotaia)
2. La **coppia perno-cuscinetto** con cui la superficie interna della ruota (mozzo) si collega al telaio

Le ruote possono essere distinte in



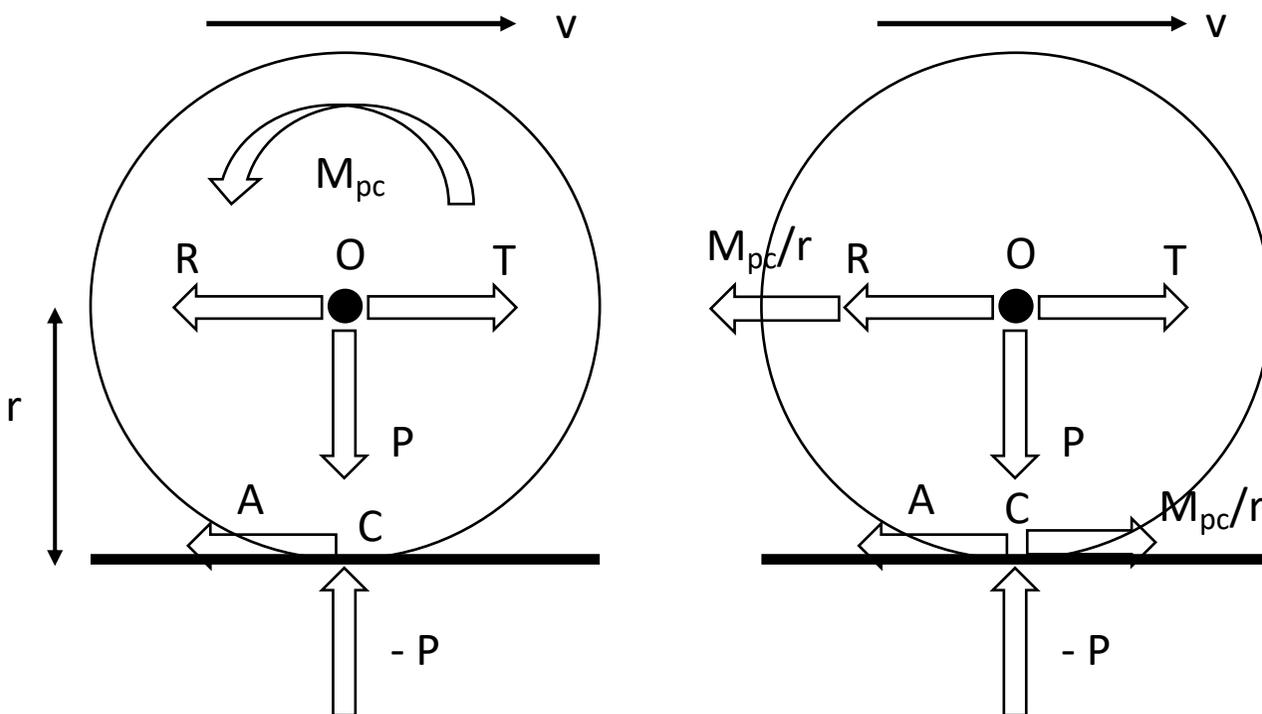
Ruota portante o condotta

Ruota motrice



RUOTA PORTANTE O CONDOTTA

Una ruota trainata, detta anche portante perché serve soltanto a portare il carico che su di essa grava, è sottoposta al seguente sistema di forze:



P =peso proprio della ruota, della porzione di veicolo e carico trasportato che grava su essa, passante per il centro O della ruota;

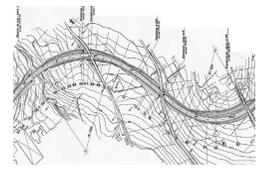
T =forza traente, passante per il centro O della ruota;

R =somma delle resistenze al moto, passante per il centro O della ruota

M_{pc} = Momento resistente perno-cuscinetto

O = centro della ruota

C = punto di contatto ruota-via di corsa



Condizione necessaria affinché si inneschi e avvenga il moto è:

$$T > R$$

Si possono verificare due situazioni:

1. La ruota si muove e avanza rotolando
2. La ruota si muove ma avanza trascinata

1. Si ha moto di rotolamento (moto di rotazione attorno a C + moto di traslazione del punto O) se la via di corsa riesce ad esplicare una reazione A tale da tener fermo, istante per istante, il punto C che diventa **centro di istantanea rotazione**.

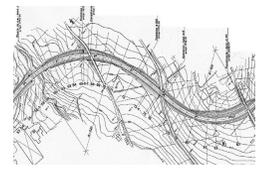
Questa condizione si verifica quando:

$$A > \frac{M_{pc}}{r} \quad \text{con } A = f_a * P$$

A= reazione di aderenza
 fa=coefficiente di aderenza <1

In questo caso la via di corsa esplica sulla ruota una REAZIONE DI ADERENZA

A



2. La ruota si muove, il punto O trasla, mentre il punto C non è istante per istante fermo e viene trascinato.

Questa condizione si verifica quando:

$$A < \frac{M_{pc}}{r}$$

oppure quando la ruota è bloccata (non può ruotare).

Si dice che la ruota **STRISCIA** o **PATTINA**

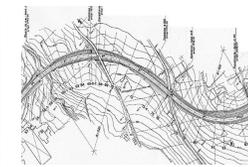
In questo caso la via di corsa esplica sulla ruota una RESISTENZA di ATTRITO F dato dalla seguente relazione:

$$F = f * P$$

con

F= resistenza di attrito

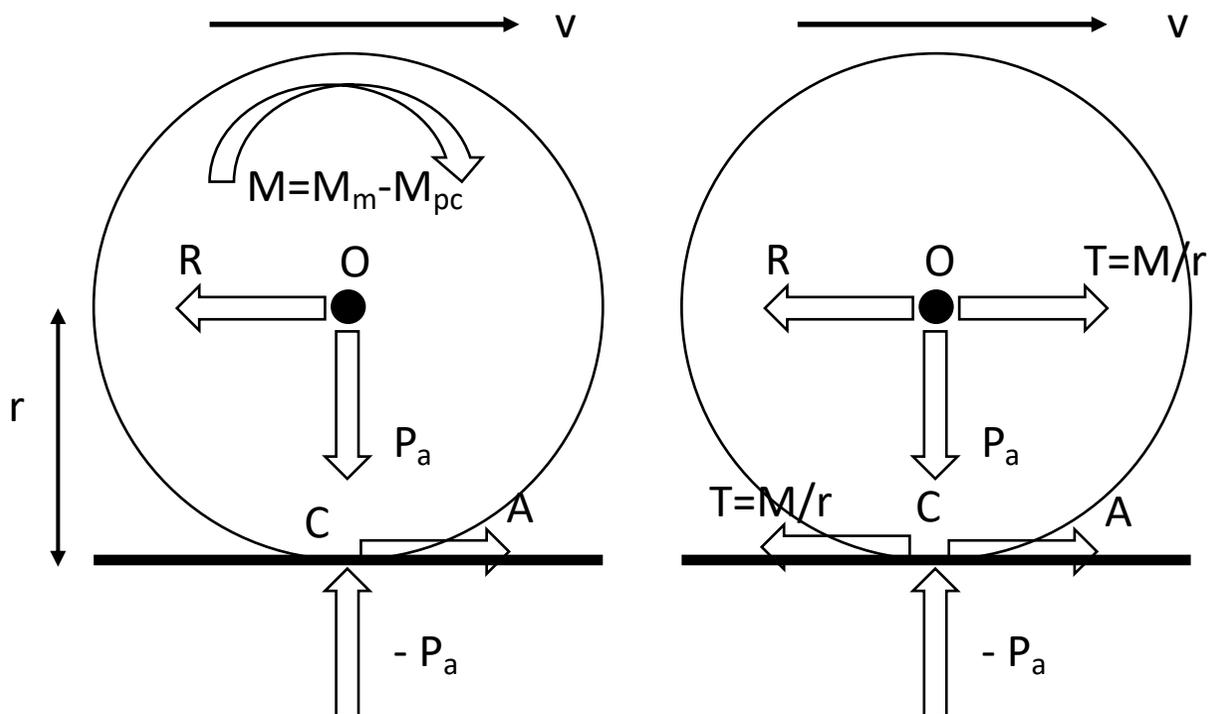
f=coefficiente di attrito radente longitudinale ($f < f_a$)



RUOTA MOTRICE

Sulla ruota motrice, oltreché la forza peso e la somma delle resistenze al moto agisce anche un momento motore M_m trasmesso dall'asse motore.

La ruota motrice è soggetta al seguente sistema di forze:



P_a = Peso aderente, aliquota del peso del veicolo che grava sulle ruote motrici

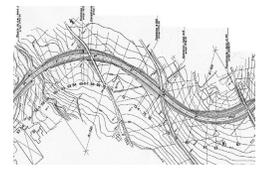
M_m = Momento motore trasmesso dal motore all'asse della ruota

M_{pc} = Momento resistente perno-cuscinetto

R = somma delle resistenze al moto, passante per il centro O della ruota

O = centro della ruota

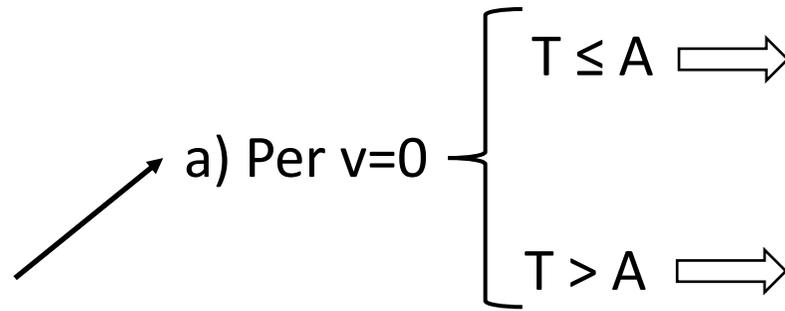
C = punto di contatto ruota-via di corsa



Si possono verificare diverse situazioni:

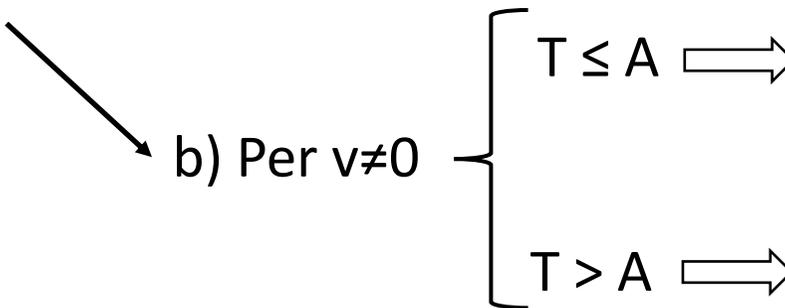
1. Se $T < R$

(moto ritardato)



Il punto di contatto C rimane fermo e la ruota rimane assolutamente ferma

La ruota gira attorno al proprio asse e SLITTA ma non avanza



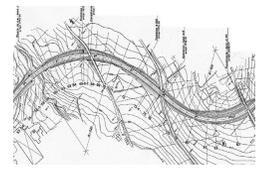
Il punto di contatto C diventa centro di istantanea rotazione e la ruota rotola decelerando fino a fermarsi

La ruota gira attorno al proprio asse e SLITTA

Con

$$T = M/r$$

$$A = f_a P_a$$



2. Se $T=R$

a) Per $v=0$

- $T \leq A \implies$ Il punto di contatto C rimane fermo e la ruota rimane ferma
- $T > A \implies$ La ruota SLITTA ma non avanza

(moto uniforme)

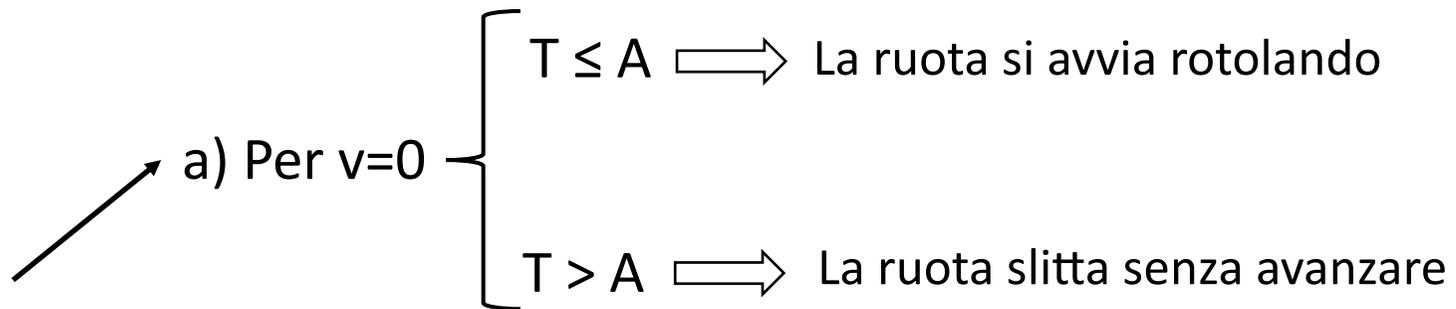
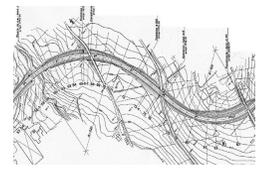
b) Per $v \neq 0$

- $T \leq A \implies$ Il punto di contatto C diventa centro di istantanea rotazione e la ruota avanza rotolando con velocità costante
- $T > A \implies$ La ruota gira attorno al proprio asse e SLITTA, ma avanza a velocità costante

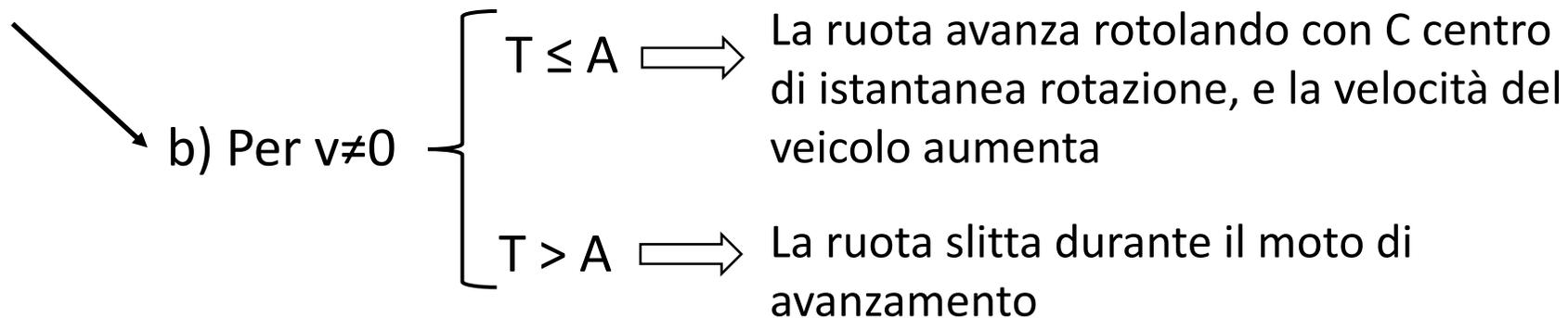
Con

$$T = M/r$$

$$A = f_a P_a$$



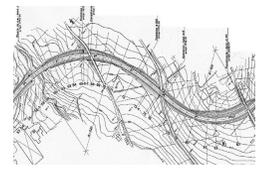
3 . Se $T>R$



Con

$$T = M/r$$

$$A = f_a P_a$$



Quindi:

Nel caso di una **ruota motrice** affinché si abbia rotolamento (rotazione + traslazione) non è sufficiente avere a disposizione un momento motore, ovvero uno sforzo di trazione capace di vincere tutte le resistenze al moto, ma occorre anche che la via di corsa possa esplicare una REAZIONE capace di impedire lo SLITTAMENTO. Occorre dunque che sia verificata la condizione:

$$R \leq T \leq f_a P_a$$

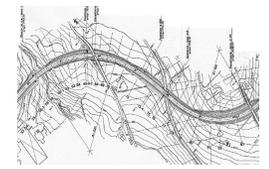
In fase di SLITTAMENTO la guida offre una RESISTENZA F alla rotazione che è una RESISTENZA DI ATTRITO RADENTE:

$$F = f * P$$

con

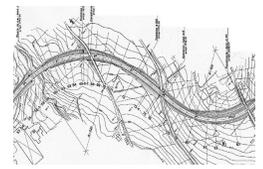
F= resistenza di attrito

f=coefficiente di attrito radente longitudinale ($f < f_a$)



In sintesi:

Ruota PORTANTE	$T > R$	$T \leq f_a P_a$ rotolamento $T > f_a P_a$ STRISCIAMENTO O PATTINAMENTO
Ruota MOTRICE	$T > R$	$T \leq f_a P_a$ rotolamento $T > f_a P_a$ SLITTAMENTO



SLITTAMENTO

Il fenomeno dello slittamento può essere anche spiegato attraverso lo SCORRIMENTO.

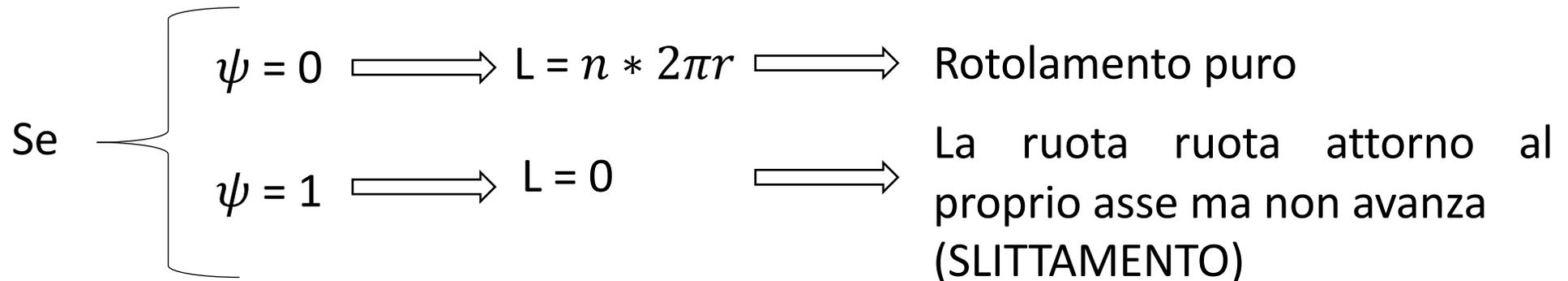
Definiamo lo SCORRIMENTO come:

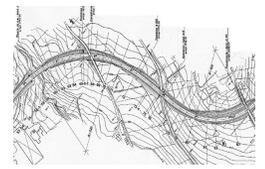
$$\psi = \frac{n * 2\pi r - L}{n * 2\pi r} = 1 - \frac{L}{n * 2\pi r}$$

In cui:

$n * 2\pi r$ = spazio percorso dalla ruota di raggio r

L = spazio realmente percorso





SLITTAMENTO

Lo slittamento può ancora essere chiarito considerando lo SCORRIMENTO espresso in termini di velocità di traslazione (v) e velocità periferica della ruota (ωr):

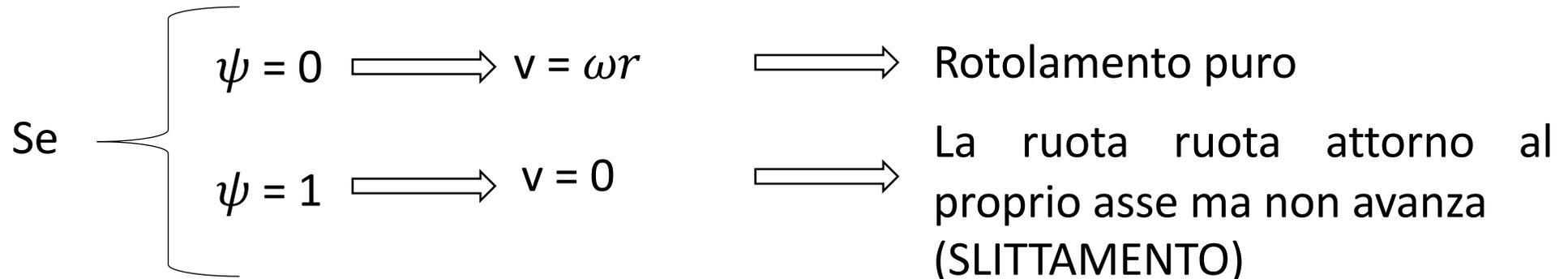
$$\psi = \frac{\omega r - v}{\omega r} = 1 - \frac{v}{\omega r}$$

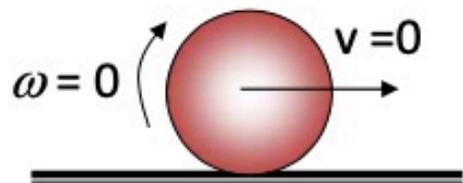
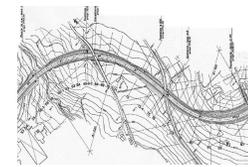
In cui:

ωr = velocità periferica della ruota di raggio r

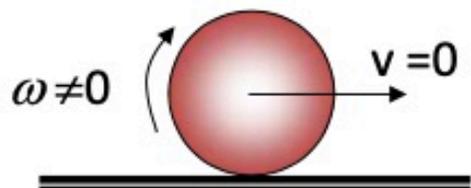
ω = velocità angolare

v = velocità di traslazione

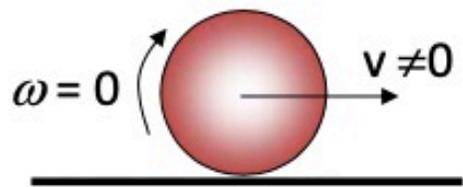




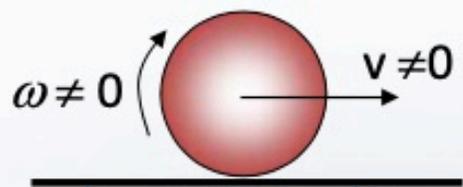
Aderenza al punto fisso: il punto di contatto ruota-superficie rimane fisso e nessuno dei due organi muta la superficie di contatto. Non si ha né rotazione né traslazione



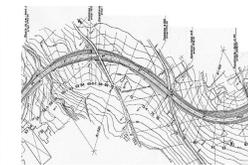
Slittamento puro: il punto di contatto sulla superficie rimane fisso, mentre la ruota nel suo moto di rotazione cambia continuamente la superficie di contatto (attrito radente)



Pattinamento puro: il punto di contatto sulla superficie cambia continuamente per effetto della traslazione della ruota, che invece non cambia la superficie di contatto perché priva di moto di rotazione (attrito radente)

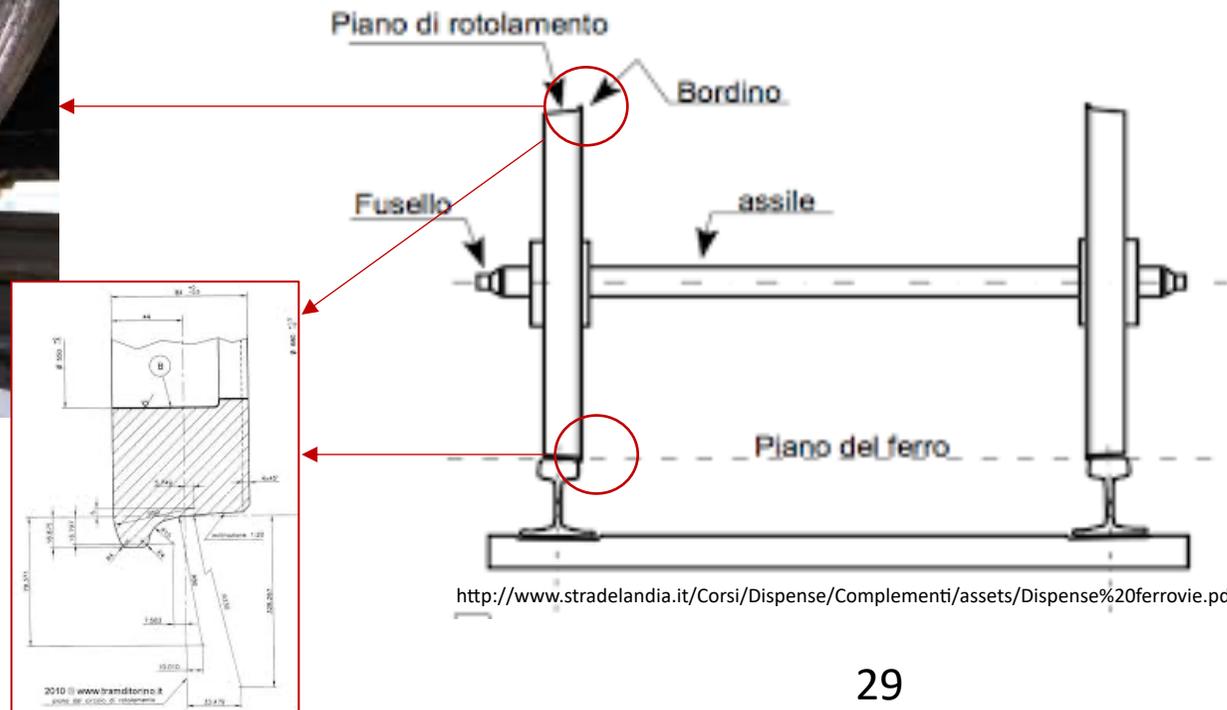


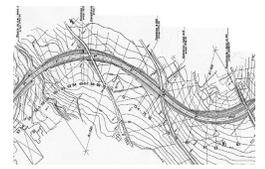
Rotolamento: entrambi gli organi mutano le superfici a contatto reciproco. La forza trasmissibile dipende dal coefficiente di aderenza.



IL CONCETTO DI ADERENZA

Nel veicolo su rotaia l'aderenza interessa essenzialmente per trasmettere alla via la forza longitudinale (nella direzione del moto) poiché le forze trasversali (normali al moto) sono trasmesse da un apposito organo di guida (**bordino della ruota**)





Nel veicolo su strada invece la funzione di guida è affidata interamente all'aderenza e pertanto occorre considerare due distinti aspetti del fenomeno:

1. ADERENZA LONGITUDINALE

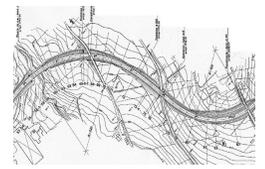
Interessa le ruote motrici o frenate, soggette al peso P e alla forza tangenziale (longitudinale) T_x diretta lungo la direzione del moto.

Si è in CONDIZIONI DI ADERENZA se la ruota rotola senza slittare.

Si definisce LIMITE DI ADERENZA LONGITUDINALE T_{ax} il valore massimo della forza tangenziale oltre il quale vengono meno le condizioni di aderenza e la ruota inizia a slittare.

Possiamo definire come **coefficiente di aderenza longitudinale**, il rapporto:

$$f_x = \frac{T_{ax}}{P}$$



2. ADERENZA TRASVERSALE

Interessa tutte le ruote del veicolo. Che siano soggette al peso P e alla forza T_y diretta lungo la direzione normale al moto.

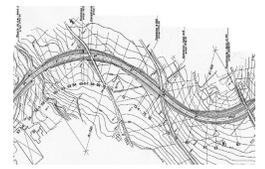
Si è in CONDIZIONI DI ADERENZA se la ruota continua ad avanzare senza slittare lateralmente (senza sbandare).

Si definisce LIMITE DI ADERENZA LATERALE T_{ay} il valore massimo della forza trasversale oltre il quale vengono meno le condizioni di aderenza e la ruota inizia a slittare lateralmente.

Possiamo definire come **coefficiente di aderenza trasversale**, il rapporto:

$$f_y = \frac{T_{ay}}{P}$$

I coefficienti f_x e f_y si determinano mantenendo costante una delle due forze (in genere il peso P) e facendo variare l'altra, per esempio T_x fino ad ottenere lo slittamento.

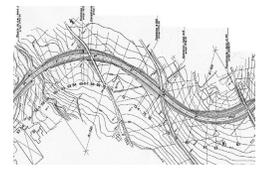


DIFFERENZA FRA ATTRITO E ADERENZA

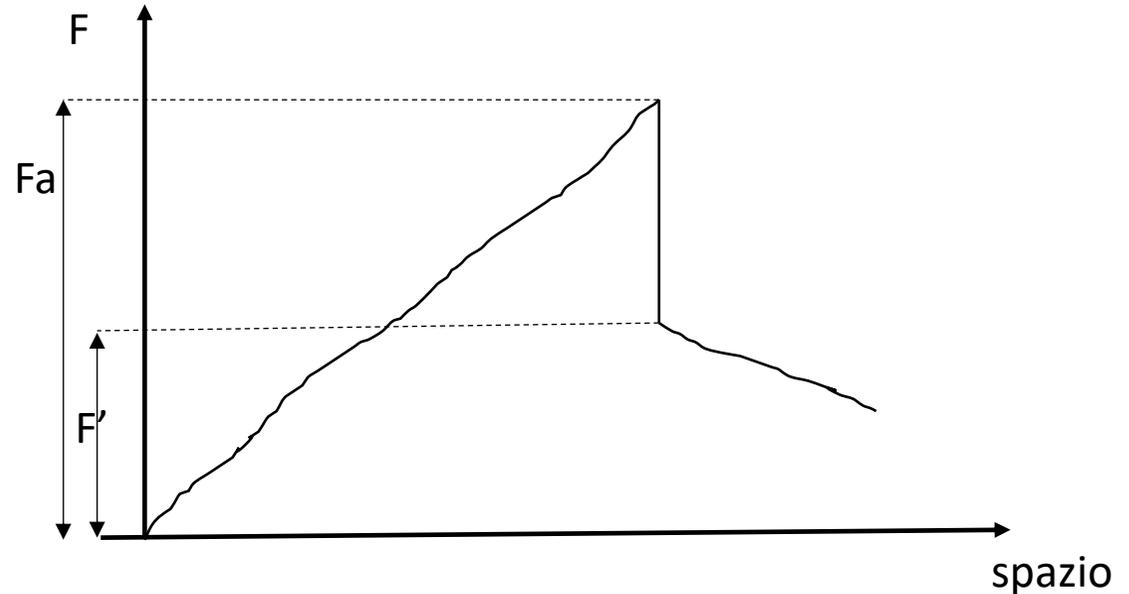
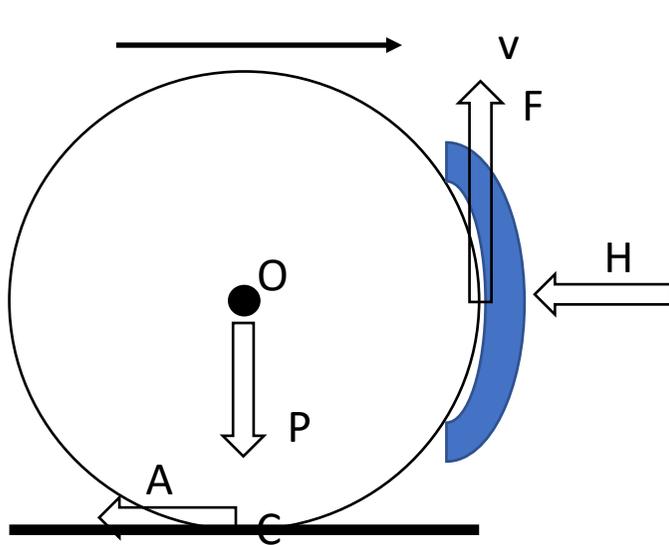
ATTRITO: presuppone un movimento di strisciamento, anche minimo, fra le due superfici a contatto

ADERENZA: esiste solo quando è veramente nullo ogni slittamento o strisciamento.

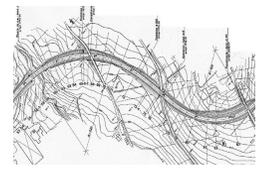
Si può fisicamente spiegare il fenomeno dell'aderenza pensando che le piccolissime asperità della via e della ruota si compenetrino generando una sorta di **accoppiamento cinematico infinitesimo**. Man mano che lo sforzo periferico cresce la ruota tende a disunirsi dalla via e, oltre un certo limite, la dentellatura costituita dalle asperità comincia a rovinarsi. Ha allora inizio lo slittamento e le due superfici a contatto vengono in conseguenza a levigarsi. L'aderenza si riduce poiché essa è tanto più bassa quanto sono più lisce le superfici.



L'aderenza ha perciò un valore limite che può essere misurato considerando una ruota ferroviaria soggetta ad un peso P e ad una forza tangenziale F variabile e prodotta da un ceppo frenante sul cerchione da una forza H :



La ruota avanza rotolando alla velocità v . Se si aumenta gradatamente H , aumenta F . Raggiunto il valore F_a il rotolamento si arresta improvvisamente e la ruota bloccata pattina sulla rotaia. Il valore F_a è il limite di aderenza. Diminuendo il valore di F , la ruota riprende a rotolare quando raggiunge il valore di F' che è il limite di attrito radente



Possiamo dunque definire:

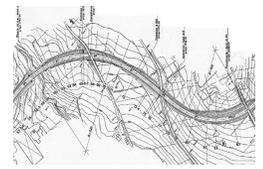
LIMITE DI ADERENZA = massima forza tangenziale che la ruota può trasmettere al terreno in condizioni di rotolamento

LIMITE DI ATTRITO RADENTE = massima forza tangenziale che la ruota può trasmettere al terreno in condizioni di attrito radente (strisciamento o slittamento)

Per quanto aderenza e attrito dipendano entrambi dalla natura e dallo stato delle superfici a contatto, sono due concetti diversi:

ADERENZA: è una REAZIONE che la via esplica sulla ruota perché possa avanzare in condizioni di rotolamento puro

ATTRITO: è la RESISTENZA che la via esercita sulla ruota in conseguenza di spostamenti relativi dei punti di contatto. Si parla di attrito ogni volta che la ruota pattina (ruota portante) o slitta (ruota motrice).



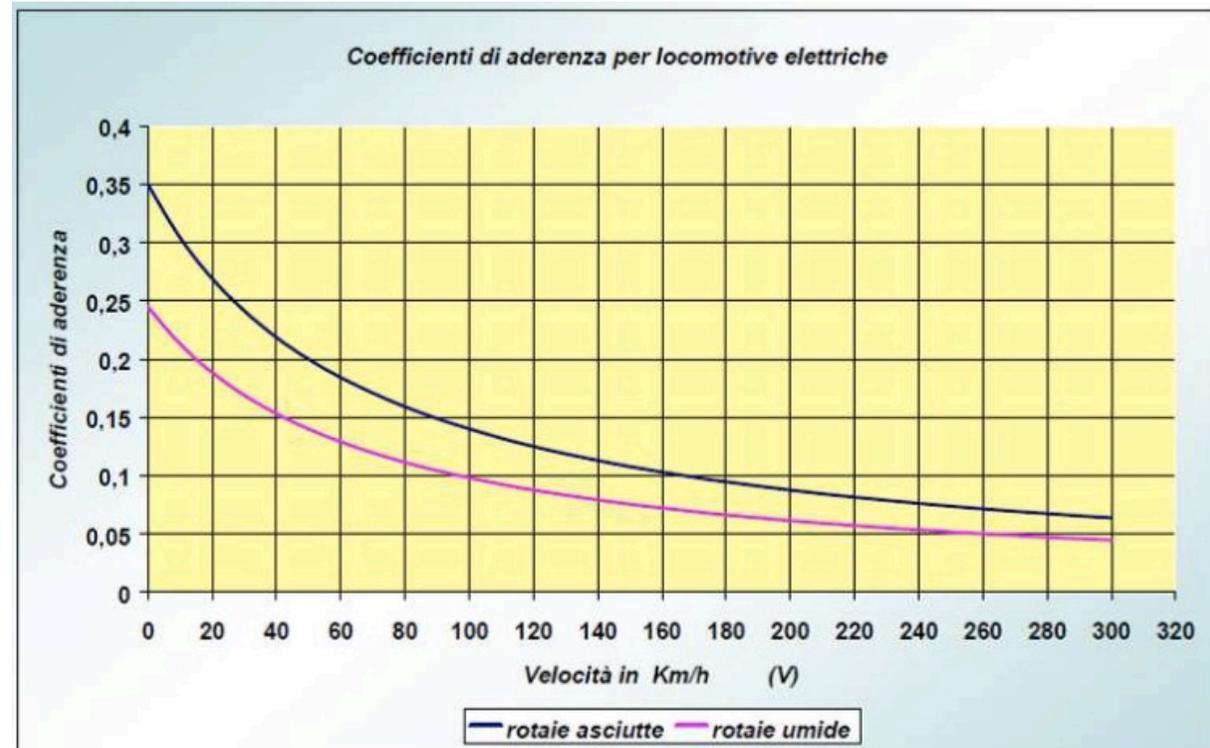
FATTORI CHE INFLUENZANO L'ADERENZA

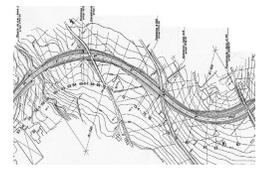
In ferrovia, il coefficiente di aderenza:

1. diminuisce all'aumentare della velocità. Sperimentalmente Muller ha trovato sui locomotori elettrici la relazione:

$$f_a = \frac{f_a^*}{1 + 0,01 V}$$

Con
 f_a^* = massimo valore del
coefficiente di
aderenza a veicolo
fermo (0,25÷0,35)
 V = velocità del veicolo [km/h]

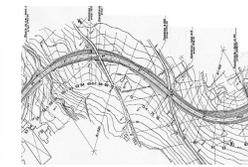




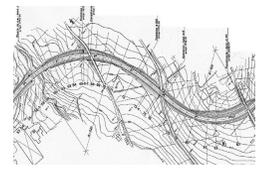
2. varia secondo della natura dei metalli a contatto e con la levigatezza delle superfici;
3. varia con la temperatura e la pressione nell'area di impronta;
4. diminuisce all'aumentare dell'umidità dell'aria;
5. Varia con il diametro della ruota a causa delle deformazioni locali;
6. Diminuisce quando lo sforzo di trazione non è continuo e graduale;
7. Aumenta al passaggio di corrente elettrica (in seguito al riscaldamento)

Nei treni ad Alta Velocità (AV), causa di una riduzione del coefficiente di aderenza sono i moti secondari trasversali delle ruote sulle rotaie ed i moti parassiti della sala montata che inducono pseudoslittamenti. Per ovviare al problema si ricorre così agli assi accoppiati.

In ferrovia si ricorre a getti di sabbia per la lavatura delle rotaie per migliorare l'aderenza.

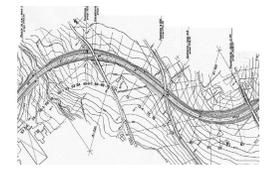


Rotaie elettriche con motore a coppia variabile	$f_a=0,200$
Rotaie in condizioni medie di esercizio	$f_a=0,167$
Rotaie umide per nebbia o pioggia fine	$f_a=0,125$
Rotaie unte o con fanghiglia	$f_a=0,100$



Su strada, il coefficiente di aderenza:

1. Dipende dal carico che si riversa sulla ruota e aumenta con la deformabilità della ruota e lo schacciamento
2. Diminuisce all'aumentare della velocità
3. Diminuisce su strada bagnata (molto se anche con fanghiglia)
4. Diminuisce molto su strada ghiacciata;
5. È influenzato dallo stato della pavimentazione e dal disegno del battistrada

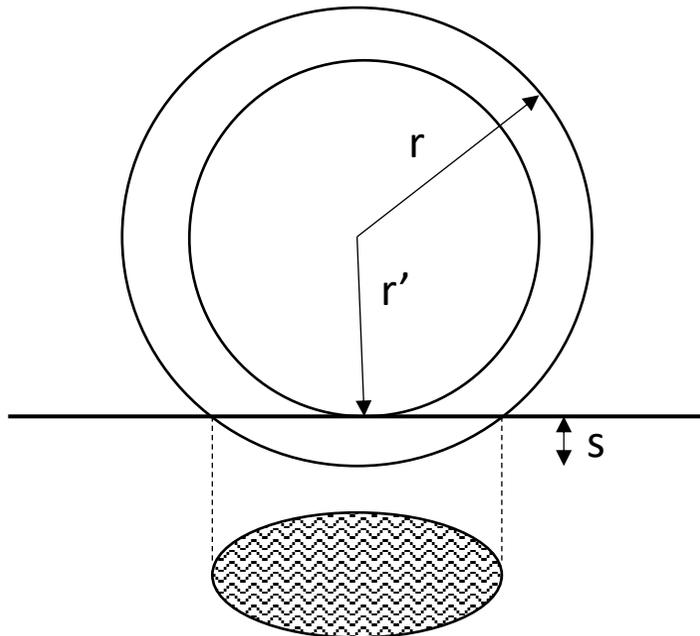


Su strada, l'aderenza:

1. Dipende dal carico che si riversa sulla ruota e aumenta con la deformabilità della ruota e lo schiacciamento.

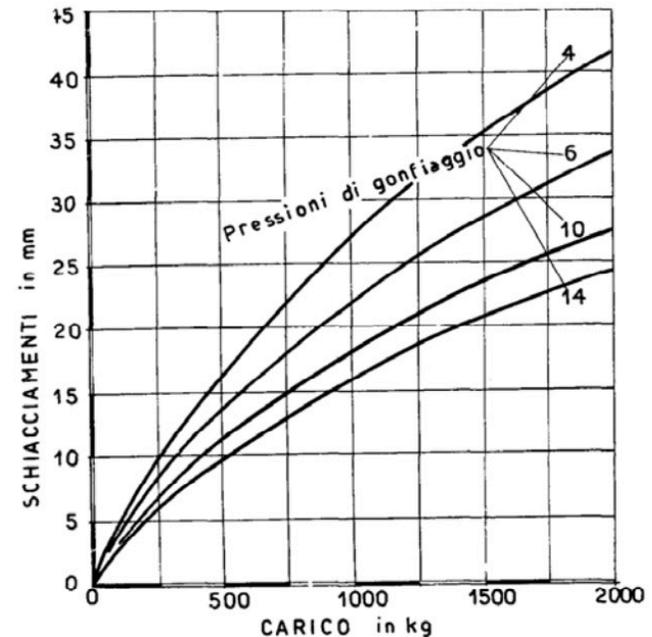
Il carico P provoca uno **Schiacciamento** (S) e influenza l'**Area di impronta** (A) del pneumatico.

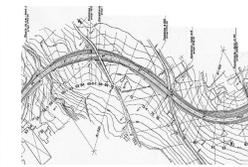
Schiacciamento = riduzione del raggio dello pneumatico misurata in corrispondenza del baricentro dell'area di impronta



$$s = K^m \sqrt{P}$$

Con
 K = coeff.
adimensionale
 $1 < m < 2$





La zona dell'**Area di impronta** (A) tra ruota e suolo è in genere tanto più ampia quanto maggiore è, a pari pressione di gonfiaggio, il carico sopportato e la cedevolezza della gomma:

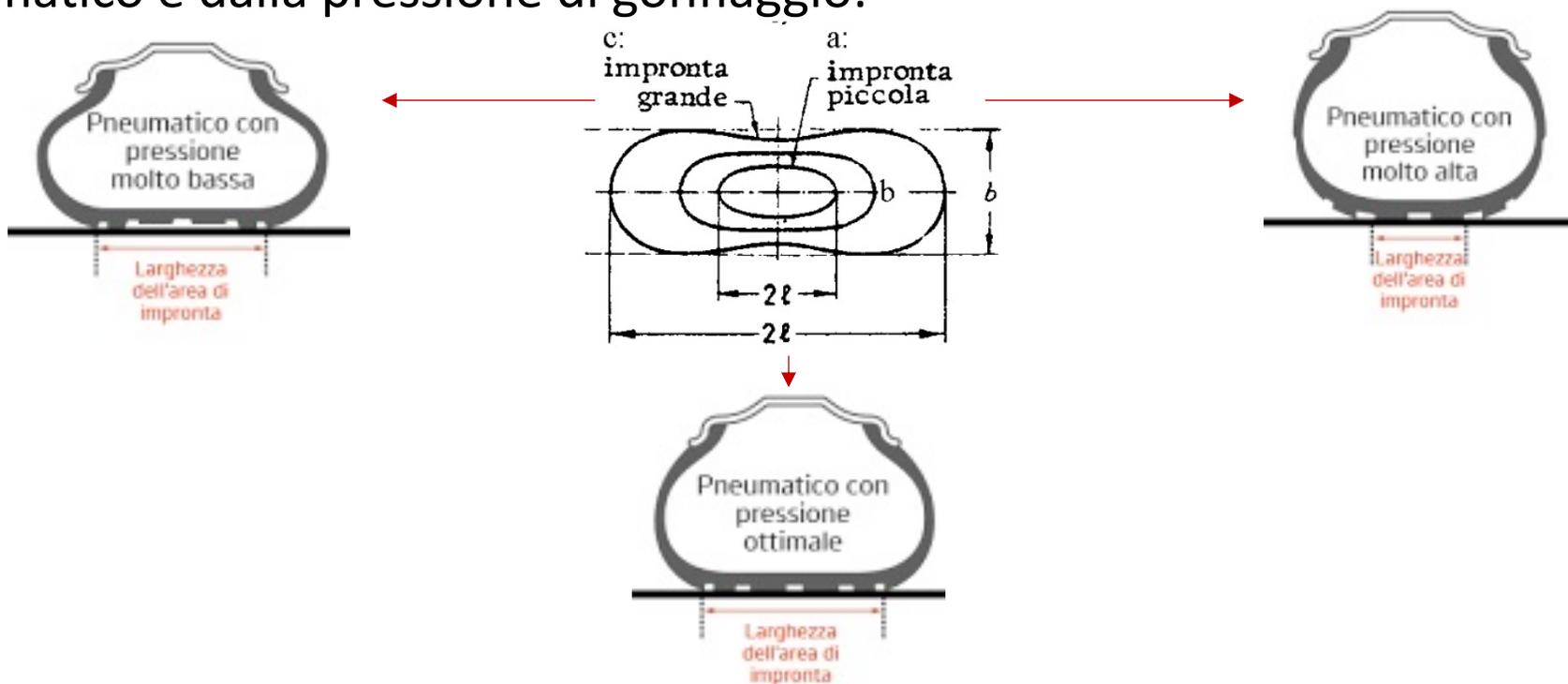
$$A = K' m' \sqrt{P}$$

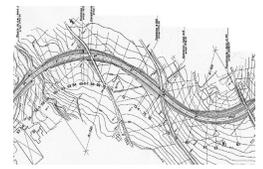
K' = coeff. adim.

$2 < m' < 3$

K' e m' dipendono dalla natura del copertone e pressione di gonfiaggio

La forma dell'Area di impronta tra ruota e suolo dipende dal tipo di pneumatico e dalla pressione di gonfiaggio:

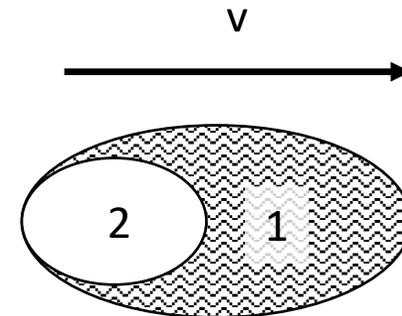




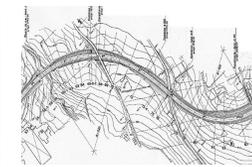
L'area di impronta nel caso di pneumatici è dell'ordine di diversi cm^2 , pertanto il moto della ruota su strada non può essere di puro rotolamento.

Nell'area di impronta si possono distinguere 2 zone:

1. una zona di combaciamento, anteriore rispetto al senso di marcia, nella quale la velocità relativa fra ruota/strada è nulla ($v = \omega r$);
2. una zona posteriore con microslittamenti irreversibili



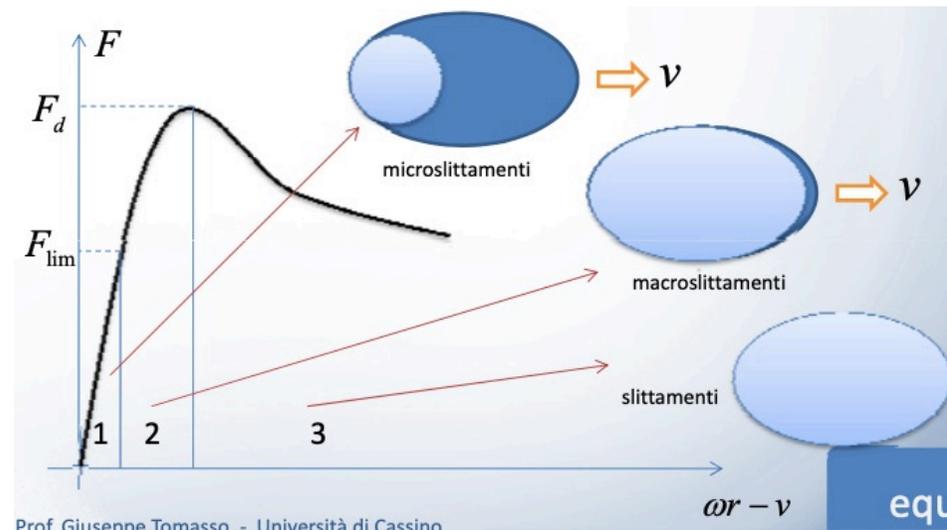
Per effetto delle deformazioni elastiche (reversibili) e dei microslittamenti, la velocità periferica della ruota (ωr) è, in trazione, lievemente maggiore della velocità di traslazione (v)



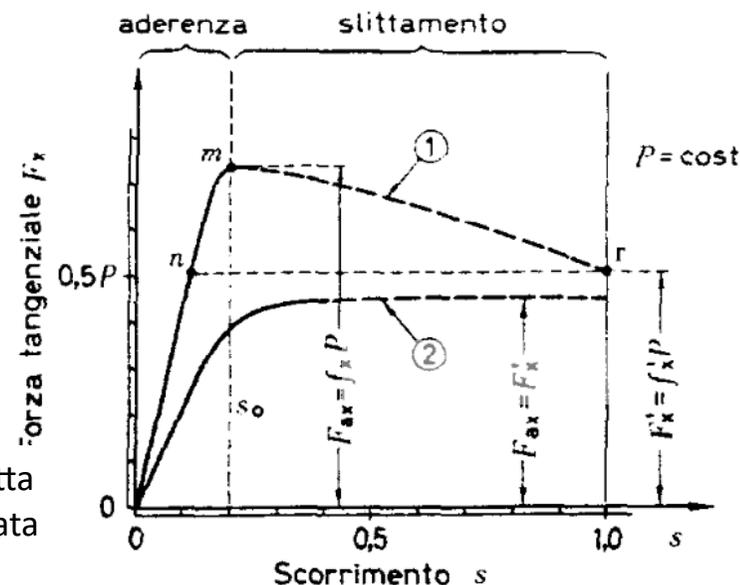
La forza tangenziale F trasmessa nell'area d'impronta dipende dallo slittamento σ dove:

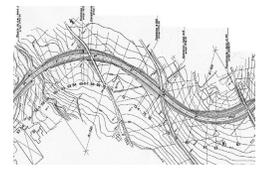
$$\sigma = \omega r - v$$

- Per $\sigma = 0$, si ha $F=0$
- All'aumentare di F , σ cresce mantenendosi inizialmente molto piccolo (microslittamenti). La zona di slittamento s'ingrandisce fino ad occupare l'intera impronta in corrispondenza di un valore F_{lim} .
- Oltre questo limite, si osserva un ulteriore incremento di F , in un campo di σ crescenti (macroslittamenti) finché si arriva al limite superiore F_d .
- Oltre F_d si innesca il vero e proprio fenomeno di slittamento con F decrescenti (poiché il coefficiente di attrito è inferiore a quello di aderenza)



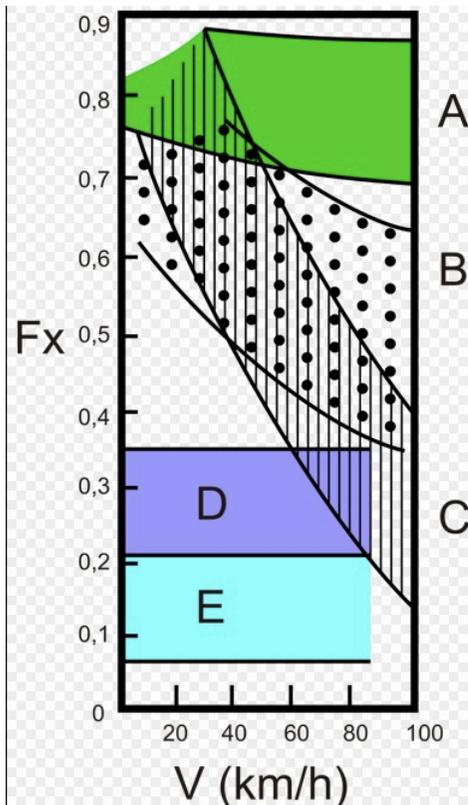
1. Pavimentazione asciutta
2. Pavimentazione bagnata e liscia





Su strada, il coefficiente di aderenza:

2. Diminuisce all'aumentare della velocità
3. Diminuisce su strada bagnata (molto se anche con fanghiglia)
4. Diminuisce molto su strada ghiacciata;
5. È influenzato dallo stato della pavimentazione e dal disegno del battistrada



- A = pavimentazione in condizioni asciutte
- B = rivestimento antislittamento bagnato
- C = superficie bagnata
- D = rivestimento innevato
- E = rivestimento ghiacciato

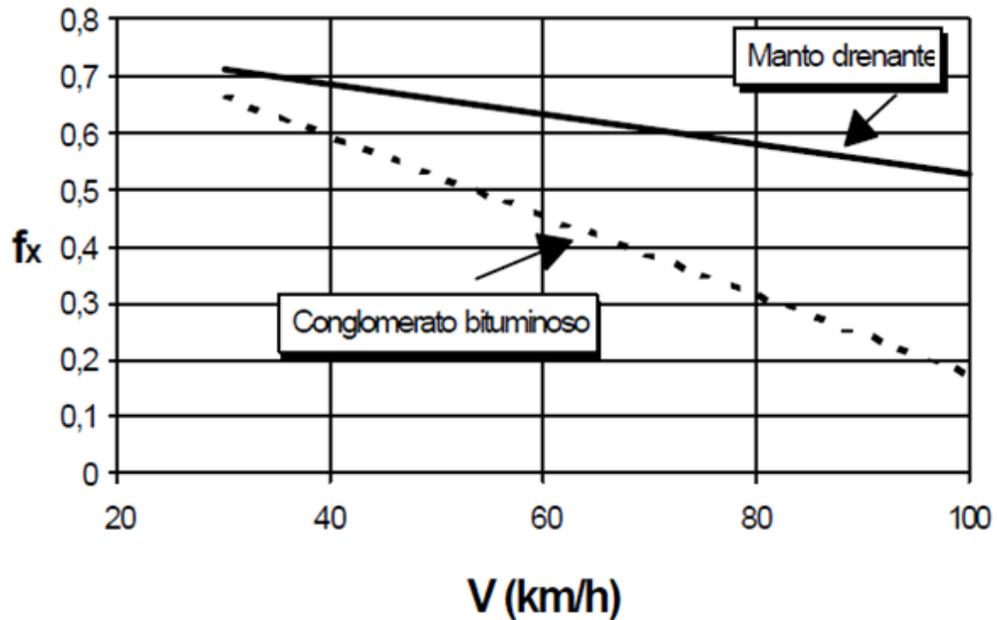
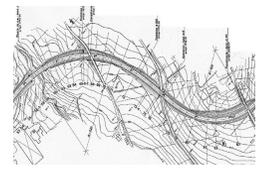
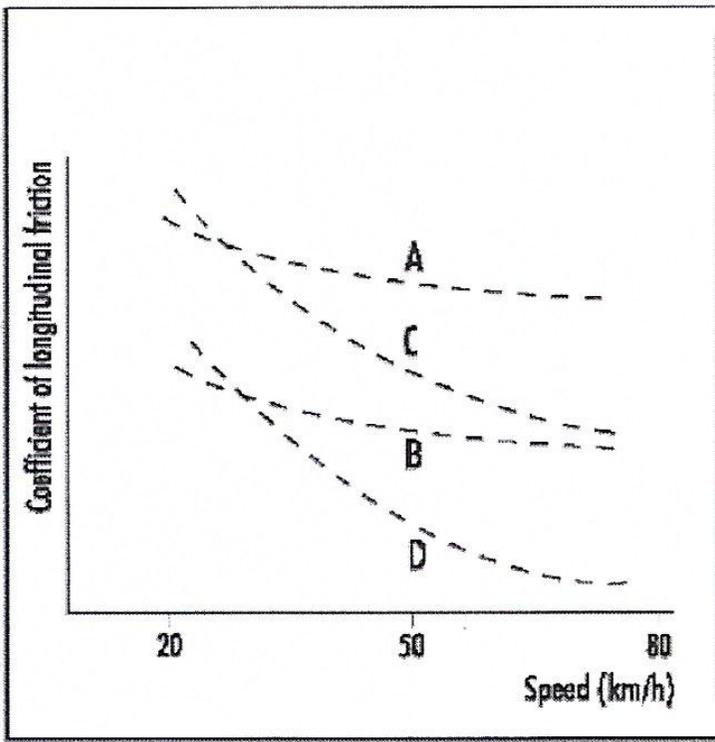
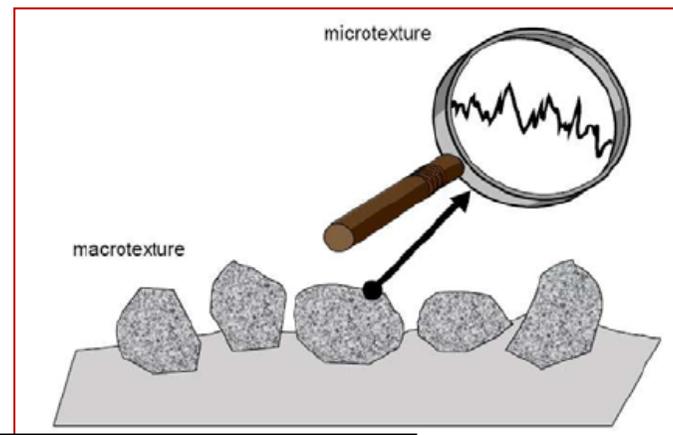
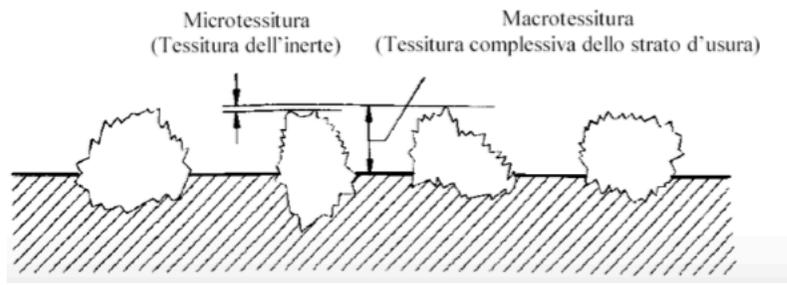
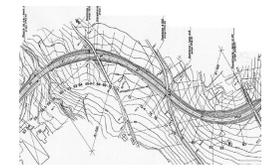


Fig. 58 - Relazione tra la velocità ed il coefficiente di aderenza, sui manti drenanti e sui manti in conglomerato bituminoso. Primo anno di apertura al traffico (Esperienze condotte in Giappone).



	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

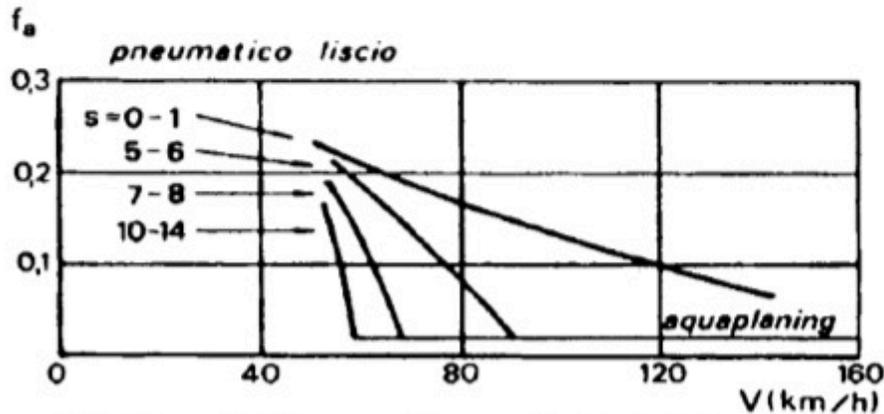
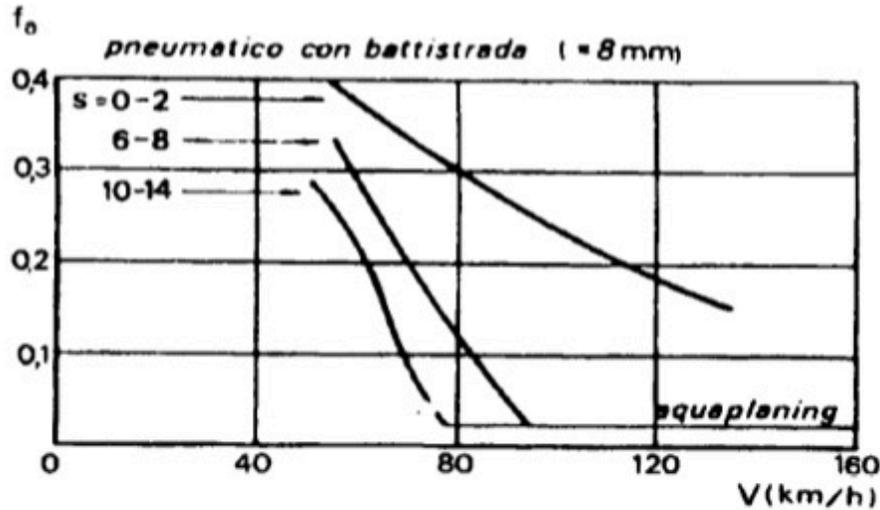
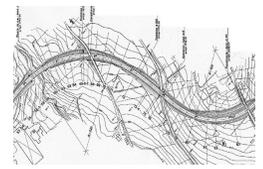
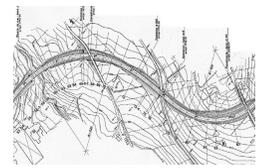
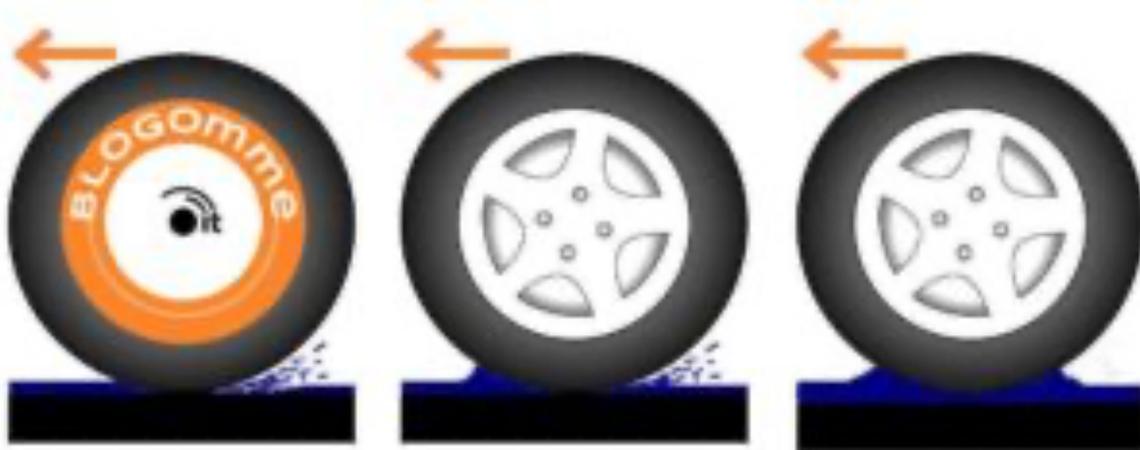


Figura 12.15 - Coefficiente di aderenza f_a in funzione della velocità e dello spessore del velo idrico

In corrispondenza di una velocità limite inferiore prossima agli 80 km/h, per pneumatici con battistrada di circa 8 mm e per velli spessi 10-14 mm, nasce il fenomeno dell'aquaplaning; tale velocità limite scende al di sotto dei 60 km/h nel caso di pneumatico liscio.



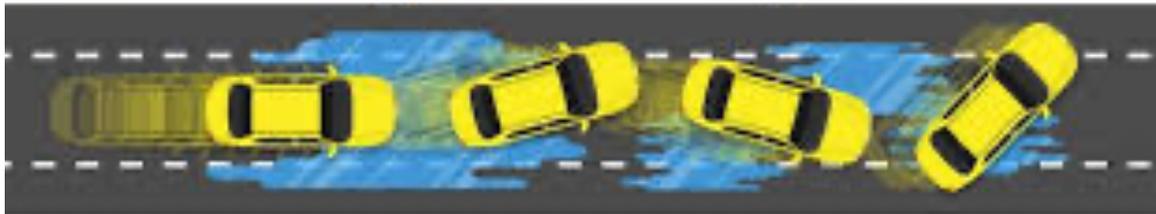
Aquaplaning



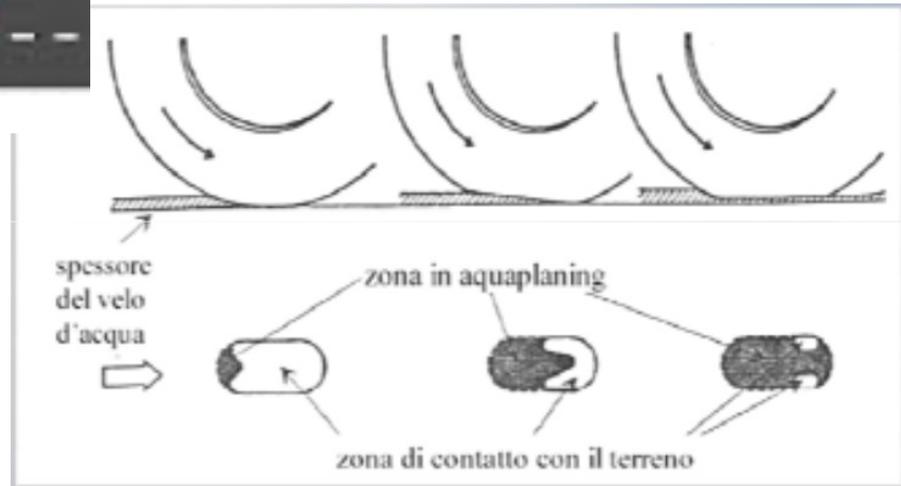
Normalmente il battistrada delle Gomme drena l'acqua

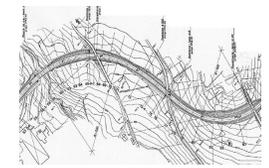
Aumentando la velocità o la quantità d'acqua si supera il limite di drenaggio della Gomma

Lo strato d'acqua rimane sotto il battistrada e lo solleva dall'asfalto

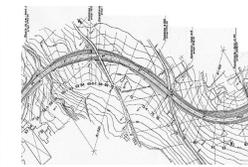


shutterstock.com + 1100602490

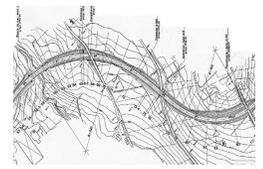




SPESSORE BATTISTRADA VELOCITA'	1,6 mm	4 mm	8 mm
5 km/h	 AREA 100%	 AREA 100%	 AREA 100%
75 km/h	 AREA 16%	 AREA 58%	 AREA 74%
125 km/h	 AREA 6%	 AREA 11%	 AREA 47%



Velocità [km/h]	Pavimentazioni asciutte		Pavimentazioni bagnate	
	Conglomerato cementizio	Conglomerato bituminoso	Conglomerato cementizio	Conglomerato bituminoso
50	fa=0,55	fa=0,50	fa=0,50	fa=0,42
80	fa=0,52	fa=0,44	fa=0,45	fa=0,36
120	fa=0,45	fa=0,38	fa=0,36	fa=0,32

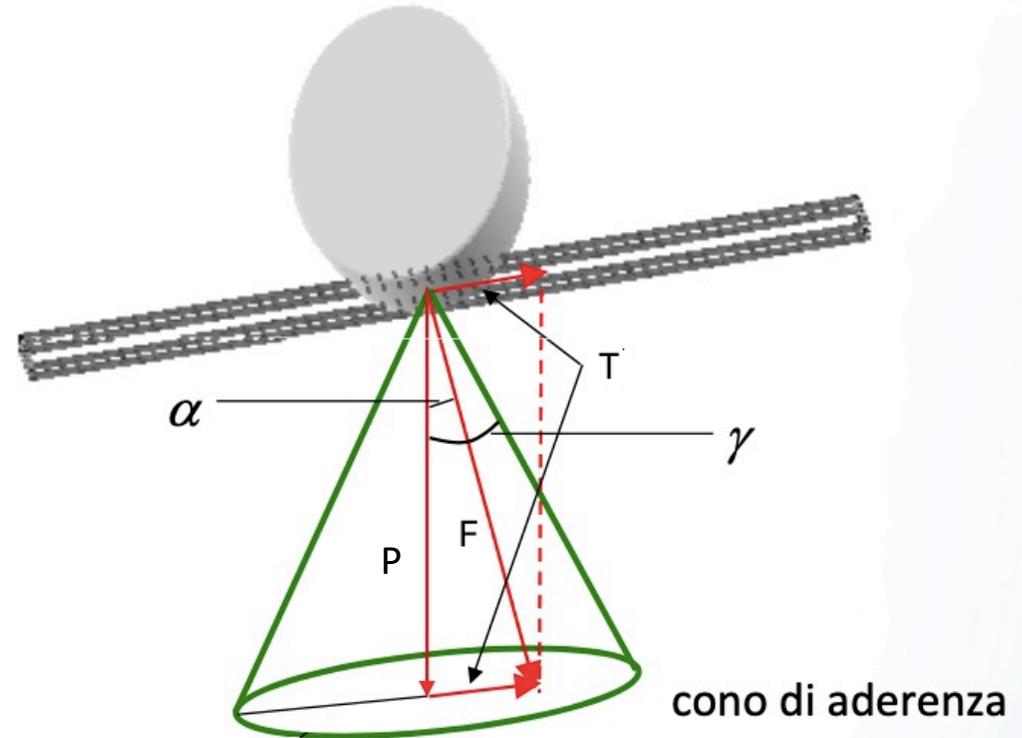


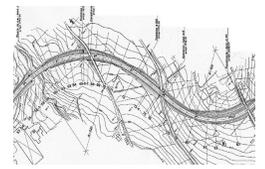
Durante la marcia, in particolare in **curva**, l'azione T esercitata dalle ruote sulla superficie viaria, può non essere diretta nella direzione del moto istantaneo perché la tenuta di strada è affidata alla aderenza trasversale.

Pertanto, la risultante F di T e P può non giacere nel piano longitudinale di simmetria della ruota.

Affinché siano garantite le condizioni di aderenza, F deve essere contenuta all'interno di un cono, detto cono di aderenza, avente come asse P e angolo al vertice 2γ con

$$\gamma = \arctg(fa)$$





FRENATURA

LO SPAZIO DI ARRESTO E LO SPAZIO DI FRENATURA

Riprendiamo *l'equazione generale del moto* di un veicolo isolato:

$$T - R = M_e \frac{dv}{dt}$$

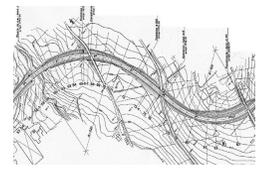
In cui:

T = somma di tutte le forze attive

R = somma di tutte le resistenze

M_e = massa equivalente del veicolo

dv/dt = accelerazione (con v velocità nella direzione del moto)



Esplicitando le resistenze, l'equazione generale del moto diventa:

$$T - P(\mu_0(v) \pm i) = \frac{1000 * \beta * P}{g} * \frac{dv}{dt}$$

Dove indichiamo con:

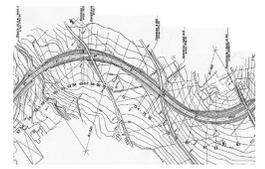
μ_0 = tutte le resistenze specifiche ordinarie ad una data velocità v

i = resistenza specifica di pendenza (o livelletta)

β = fattore che tiene conto delle masse rotanti

g = accelerazione di gravità

$\frac{1000 * \beta * P}{g} * \frac{dv}{dt}$ = forza d'inerzia



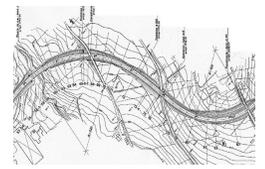
Se in un dato istante si sopprime lo sforzo di trazione T , l'equazione generale del moto diventa:

$$0 = P(\mu_0(v) \pm i) - 102 * \beta * P * \frac{dv}{dt}$$

Il termine relativo alla forza di inerzia diventa negativo poiché favorisce il moto e quindi il veicolo sarà soggetto ad una decelerazione.

Il termine che esprime le resistenze specifiche ordinarie $\mu_0(v)$ varia con la velocità, non si ammette un sensibile errore sostituendo ad esso un valore medio μ_m ponendo:

$$\mu_m = \frac{1}{v} \int_0^v (a + bv^2) dv = a + \frac{b}{3} v^2$$

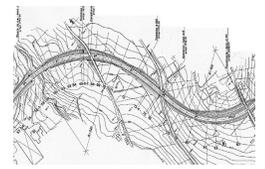


Quindi l'equazione diventa:

$$0 = P(\mu_m \pm i) - 102 * \beta * P * \frac{dv}{dt}$$

Pertanto, la decelerazione a cui è sottoposto il veicolo, vale:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{\mu_m \pm i}{102\beta}$$



Nel caso di livelletta in discesa, ovvero per $i < 0$, si possono verificare tre situazioni:

1. Se

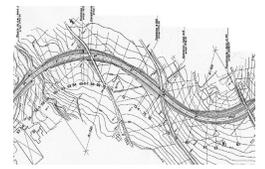
$$|i| = |\mu_m| \implies \frac{dv}{dt} = 0 \quad v = \text{cost} \quad \text{Moto uniforme} \implies \text{Pendenza } \mathbf{critica}$$

2. Se

$$|i| > |\mu_m| \implies \frac{dv}{dt} > 0 \quad \text{Moto unif. accelerato} \implies \text{Pendenza } \mathbf{nociva}$$

2. Se

$$|i| < |\mu_m| \implies \frac{dv}{dt} < 0 \quad \text{Moto unif. Ritardato} \implies \text{È quel valore della pendenza tale per cui il veicolo decelera e si arresta dopo aver percorso un certo spazio}$$



SPAZIO DI ARRESTO

Si consideri il caso 3.: $|i| < |\mu_m|$

E si voglia determinare lo spazio necessario al veicolo per fermarsi in assenza di resistenze aggiuntive (freni)

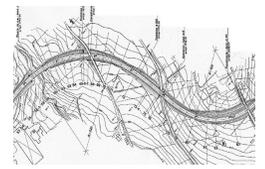
$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{ds} \frac{ds}{dt} = \frac{dv}{ds} * v = -\frac{\mu_m \pm i}{102\beta} = -A$$

Quindi:

$$\frac{dv}{ds} * v = -A$$

Esplicitando ds:

$$-ds = \frac{v dv}{A}$$



Tenendo conto che:

$$s_i=0 \quad s_f=s \quad \text{e che} \quad v_i=v \quad v_f=0$$

Lo spazio di arresto s sarà :

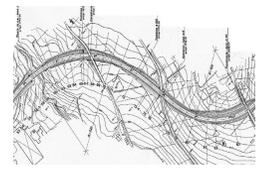
$$s = - \int_{s_i}^{s_f} ds = \frac{1}{A} \int_{v_i}^{v_f} v dv$$

Risolvendo l'integrale:

$$-(s_f - s_i) = \frac{1}{A} \left(\frac{v_f^2}{2} - \frac{v_i^2}{2} \right)$$

Sostituendo i valori di s_i , s_f e v_i e v_f :

$$-(s - 0) = \frac{1}{A} \left(-\frac{v^2}{2} \right)$$



Pertanto

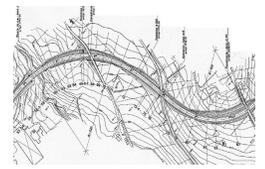
$$s = \frac{1}{A} \left(\frac{v^2}{2} \right) = \frac{v^2}{2} \left(\frac{102\beta}{\mu_m \pm i} \right)$$

SPAZIO DI ARRESTO

Lo SPAZIO DI ARRESTO è quello spazio necessario al veicolo che si muove di moto uniformemente ritardato per fermarsi in assenza di qualsiasi azione frenante e per effetto delle sole resistenze ordinarie e di livelletta.

Esso è finito e positivo se:

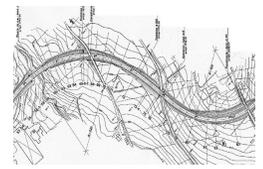
$$\text{Per } i < 0 \quad \Rightarrow \quad |i| < |\mu_m|$$



Per poter arrestare i veicoli sulle pendenze critiche e nocive, nonché per ridurre i valori dello spazio di arresto s e rendere questo finito e positivo anche in presenza di pendenze nocive, è necessario aggiungere una resistenza addizionale.

Ciò si ottiene attraverso dei dispositivi particolari detti FRENI.

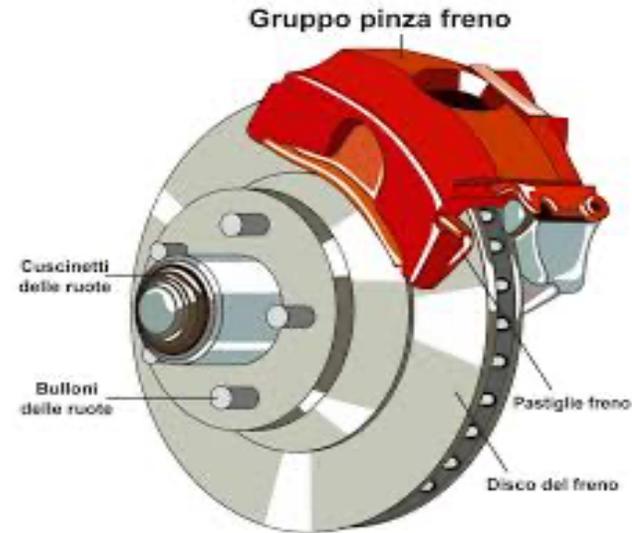
I freni possono essere di vario tipo e, a parte la frenatura elettrica, sono sempre basati sul principio di generare una resistenza d'attrito mediante organi (ganasce, ceppi o dischi) premuti contro il tamburo della ruota (trazione automobilistica) o contro i cerchioni (freni a ceppi esterni, nella trazione ferroviaria).



ESEMPI DI FRENI: freni a disco

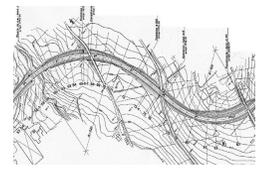


[Questa foto](#) di Autore sconosciuto è concesso in licenza da [CC BY-SA](#)



<https://www.espertoautoriscambi.it/magazine/eliminare-stridore-dei-freni-1810>

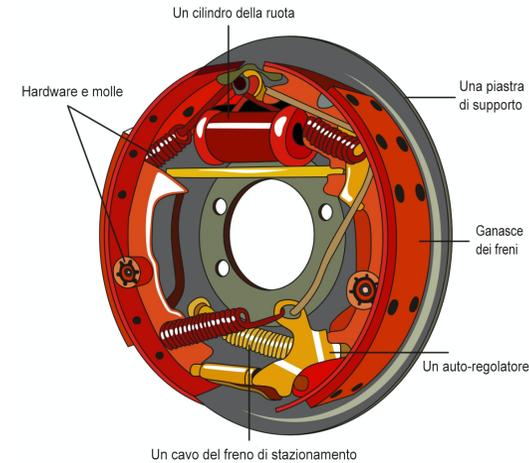
La **pinza** del freno (rossa nella prima figura) è solidale al telaio (e quindi al veicolo) ed è la sede che ospita le "pastiglie" frenanti. Durante la frenata, un meccanismo preme le pastiglie contro il **disco** che invece è solidale alla ruota. Si genera così una forza di attrito direttamente proporzionale alla pressione. Di conseguenza la ruota riceve una coppia che contrasta la sua rotazione, cioè un'azione frenante.



ESEMPI DI FRENI: freni a tamburo



<https://images2-motori.gazzettaobjects.it/sicurezza/2019/01/10/10/30/14997-gana.jpg>

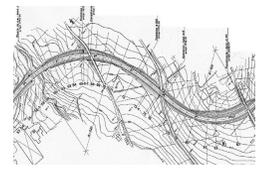


Un freno a tamburo

<https://www.espertoautoricambi.it/>

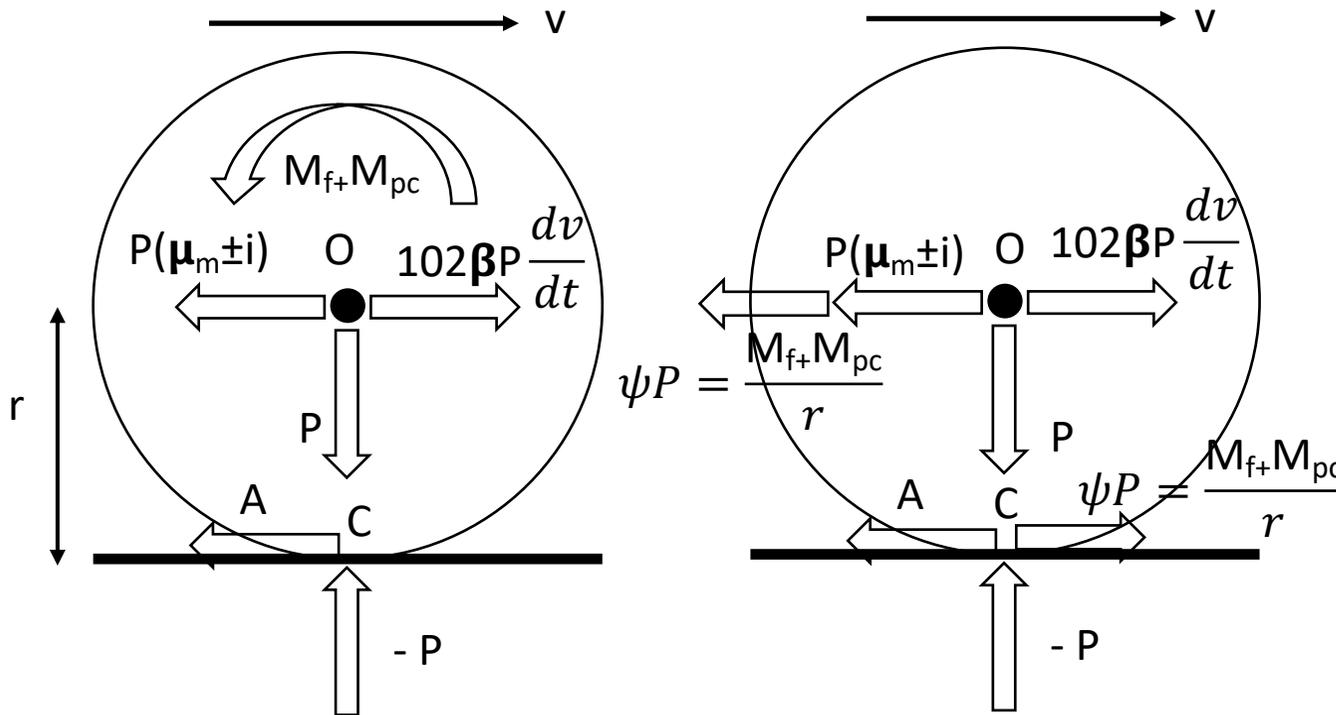
Il **freno a tamburo** è costituito da un cilindro rotante (detto tamburo) solidale col sistema da frenare e da uno o più ceppi realizzati in materiale d'attrito atti ad esercitare una forza sul cilindro e che prendono il nome di ganasce.

Il ceppo può essere sia interno che esterno al rullo. Un esempio del tipo interno è quello delle automobili, un esempio del tipo esterno è quello dei carri.



RUOTA FRENATA

La ruota frenata è sottoposta al seguente sistema di forze:



O= centro della ruota

C= punto di contatto ruota-via di corsa

P =peso proprio della ruota, della porzione di veicolo e carico trasportato che grava su essa, passante per il centro O della ruota;

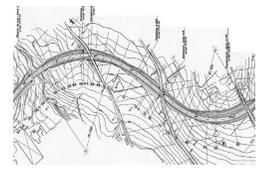
$102\beta P \frac{dv}{dt}$ =forza di inerzia

$P(\mu_m \pm i)$ =somma delle resistenze al moto, passante per il centro O della ruota

M_f = Momento frenante

M_{pc} = Momento resistente perno-cuscinetto

A=reazione di aderenza



Affinché la ruota rotoli, deve verificarsi:

$$\psi P = \frac{M_{f+} M_{pc}}{r} \leq f_a P$$

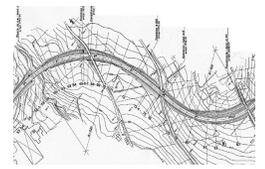
Se invece :

$$\psi P = \frac{M_{f+} M_{pc}}{r} > f_a P$$

Il punto C di contatto viene trascinato sulla via di corsa e la ruota (bloccata) trasla senza ruotare, ovvero PATTINA.

Questa situazione è da evitarsi perché il coefficiente di attrito radente è minore di quello di aderenza e pertanto si andrebbe incontro alle seguenti conseguenze:

1. Aumenta lo spazio di frenatura;
2. Consumo anormale dei cerchioni o dei pneumatici;
3. Si annulla l'azione dello sterzo ed il veicolo sbanda dal momento che le ruote sono bloccate e quindi pattinano invece di rotolare



PATTINAMENTO

Analogamente a quanto visto per la ruota motrice, il fenomeno del pattinamento può essere anche spiegato attraverso lo SCORRIMENTO.

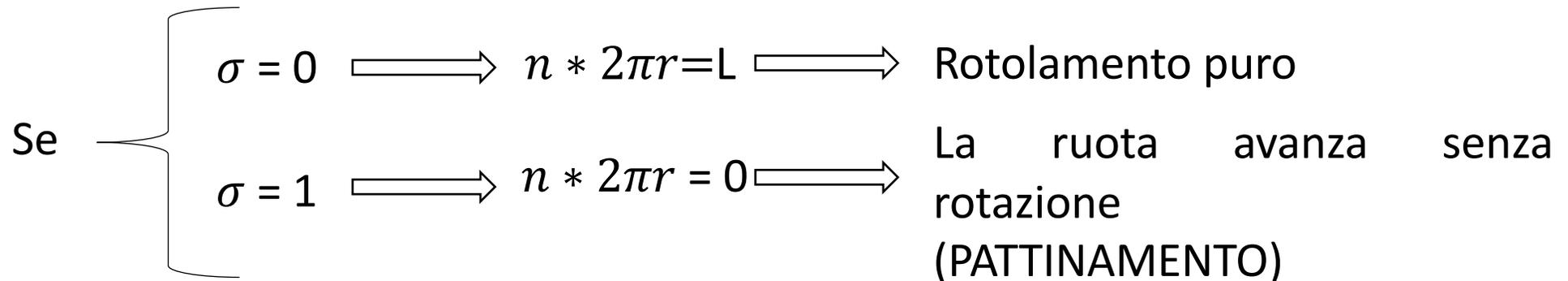
Definiamo lo SCORRIMENTO come:

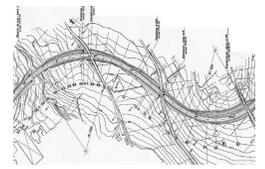
$$\sigma = \frac{L - n * 2\pi r}{L} = 1 - \frac{n * 2\pi r}{L}$$

In cui:

$n * 2\pi r$ = spazio percorso dalla ruota di raggio r

L = spazio realmente percorso





SPAZIO DI FRENATURA

Consideriamo l'equazione generale del moto durante la frenatura:

$$0 = P(\mu_m \pm i + \psi) - 102 * \beta * P * \frac{dv}{dt} \quad (\text{Eq. 1})$$

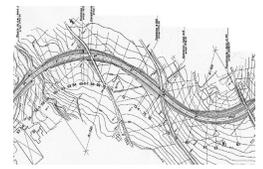
Riscrivendola nelle condizioni limite di aderenza in cui:

$$\psi P = 1000 f_a P$$

Si ha:

$$0 = P(\mu_m \pm i + 1000 f_a) - 102 * \beta * P * \frac{dv}{dt} \quad (\text{Eq. 2})$$

Ritenendo in prima approssimazione che f_a sia indipendente dalla velocità, dalla relazione (Eq.2) si può ricavare l'espressione dell'accelerazione:



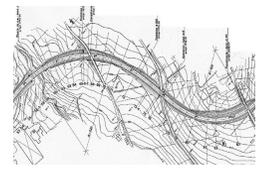
$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{\mu_m \pm i + 1000 f_a}{102\beta} = \text{cost} \Rightarrow \text{Moto uniformemente ritardato} \quad \text{Eq. 3}$$

Nel caso del moto uniformemente ritardato lo spazio può essere espresso in funzione della velocità e dell'accelerazione:

$$s = \frac{v_0^2}{2a} \quad \text{Eq. 4}$$

Sostituendo nell' eq.4, l'espressione dell'accelerazione data dalla eq.3 si ha:

$$s = \frac{v_0^2 * 102\beta}{2(\mu_m \pm i + 1000 f_a)} = \frac{v_0^2 * 1000 * \beta}{2g(\mu_m \pm i + 1000 f_a)}$$



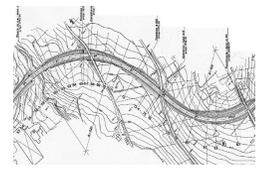
Tenuto conto che le resistenze specifiche μ_m e i sono trascurabili rispetto a 1000 fa, esse possono essere trascurate quindi lo spazio di frenatura si può esprimere:

$$s = \frac{v_0^2 * 1000 * \beta}{2g(1000f_a)} = \frac{v_0^2 * \beta}{2gf_a}$$

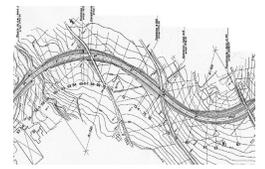
Il contributo delle masse rotanti (β) può essere trascurato, inoltre, dal momento che f_a non è costante ma varia con la velocità, si considera un coefficiente di aderenza equivalente f_e . Pertanto:

$$s = \frac{v_0^2}{2gf_e} \quad \text{SPAZIO DI FRENATURA}$$

Il coefficiente di aderenza equivalente f_e viene determinato sperimentalmente tenendo conto della velocità, del tipo e stato della pavimentazione e della pressione di gonfiaggio dei pneumatici



- Nel calcolo dello spazio di frenatura si è posto $T=0$ cioè non si è tenuto conto dell'effetto ritardante dovuto allo sforzo di trazione nel motore trascinato durante la frenatura. Infatti, in tal caso, il motore viene trascinato assorbendo potenza invece di fornirne. L'aver trascurato durante la frenatura l'effetto della resistenza di trascinamento del motore gioca a vantaggio della sicurezza dal momento che non si tiene conto di una resistenza addizionale non sempre facilmente valutabile.



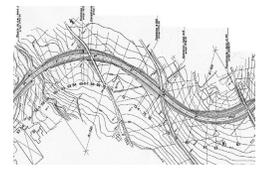
Per fissare alcune caratteristiche progettuali di una strada è necessario conoscere lo SPAZIO MINIMO DI FRENATURA (detto anche DISTANZA DI VISIBILITA' PER L' ARRESTO). Esso è dato dalla somma dello Spazio di frenatura più lo spazio percorso durante un tempo τ detto TEMPO DI PERCEZIONE, RIFLESSIONE, REAZIONE E ATTUAZIONE o TEMPO COMPLESSIVO DI REAZIONE. Esso è dato dalla seguente espressione:

$$\tau = 2,8 - 0,01 V$$

Con

$$\tau = [s]$$

$$V = [km/h]$$

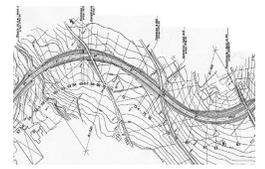


Pertanto lo SPAZIO MINIMO DI FRENATURA o DISTANZA DI VISIBILITA' PER L'ARRESTO è dato dalla seguente relazione

$$s = \frac{v_0^2}{2gf_e} + \tau * v_0$$

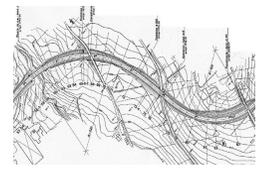
Con

$$v_0 = [\text{m/s}]$$



Il Tempo τ detto TEMPO DI PERCEZIONE, RIFLESSIONE, REAZIONE E ATTUAZIONE o TEMPO COMPLESSIVO DI REAZIONE tiene conto di:

1. Ritardo mentale, tra l'istante in cui si presenta il pericolo, cioè in cui lo si potrebbe vedere se la nostra percezione ottica fosse immediata, e l'istante in cui viene avvertito dal guidatore;
2. Ritardo umano motorio, tra l'istante in cui il guidatore decide di frenare e l'istante in cui la mano o il piede ha espletato lo sforzo
3. Ritardo del meccanismo a trasmettere l'azione all'organo frenante sulla ruota;
4. Ritardo dell'organo frenante ad agire con la massima efficacia.



Ritardo Psicotecnico
(0,5 ÷ 2,5 [s])

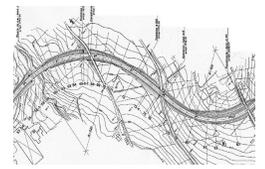
1. Ritardo mentale = brevissimo, frazione di secondo, può eccezionalmente arrivare a qualche secondo in condizioni particolari (stato di efità, stanchezza, distrazione)

2. Ritardo umano motorio = brevissimo

3. Ritardo del meccanismo

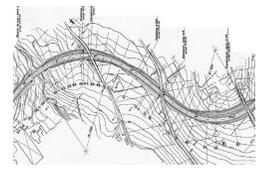
4. Ritardo dell'organo frenante

0,5 [s] o meno nelle automobili
Può arrivare ad alcuni secondi nei treni merci molto lunghi e autoarticolati



Le condizioni principali cui deve soddisfare un freno sono le seguenti:

1. Portare il veicolo dalla velocità di marcia a $v=0$, nel minor tempo e spazio possibile, compatibilmente con la sicurezza dei viaggiatori e delle merci trasportate e la comodità dei viaggiatori;
2. Essere regolabile, in modo tale che la decelerazione sia quella desiderata dal guidatore;
3. essere inesauribile, affinché la sua azione non si indebolisca, oltre un certo limite, dopo un uso continuato;
4. Essere dolce e progressivo in modo da non provocare sensibili variazioni della decelerazione nel tempo.



Nel caso di un convoglio composto da più pezzi (autoarticolati, convoglio ferroviario) il meccanismo frenante deve rispondere a questi altri due requisiti:

1. Essere continuo, cioè agire in maniera che l'azione frenante si svolga contemporaneamente su tutti gli assi ;
2. Essere automatico, nel senso che, se il convoglio si spezza per difetto degli organi di trazione, o per altre cause, i vagoni staccati rimangono automaticamente frenati.