

# **Insegnamento di Fondamenti di Infrastrutture viarie**

Territorio ed infrastrutture di trasporto

La meccanica della locomozione: questioni generali

**Il fenomeno dell'aderenza e l'equazione generale del moto**

Dall'equazione generale del moto alle caratteristiche di moto

Sistemi di trazione e motori di trazione

Trazione ferroviaria: studio di una fase completa di moto

Trazione stradale: studio di una fase completa di moto

La frenatura in ferrovia e su strada

Legislazione e Normativa

Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade

Andamento planimetrico di un tracciato stradale:

- 1) elementi del tracciato planimetrico, rettilinei e curve circolari, pendenza trasversale in curva, curve a raggio variabile
- 2) allargamento in curva e diagramma di velocità

Distanze di visibilità e andamento altimetrico di un tracciato stradale

Volume del solido stradale: metodi di calcolo

## ***Fondamenti di infrastrutture viarie***

### **Il fenomeno dell'aderenza e l'equazione generale del moto**

Nel punto di contatto tra la ruota e la via non devono nascere slittamenti (in accelerazione) o strisciamenti (in decelerazione) tra le relative superfici a contatto. E' in tale punto che nasce la forza aderente  $A$  che si pone come limite dello sforzo di trazione (avviamento) o dello sforzo frenante (frenatura).

L'equazione generale del moto esprime l'equilibrio dinamico di un veicolo in moto nelle diverse fasi di moto: avviamento (veicolo in accelerazione), regime (veicolo traslante a velocità costante), in deriva e frenatura (veicolo in decelerazione).

## ***Il fenomeno dell'aderenza e l'equazione generale del moto***

### **L'aderenza**

La forza aderente  $A$  (Aderenza) è data dal prodotto del coefficiente d'aderenza  $f_a(v)$  per il peso aderente  $P_a$ .

Il coefficiente d'aderenza  $f_a(v)$  varia al variare della velocità. Sperimentalmente si dimostra che diminuisce all'aumentare della velocità e che dipende anche dalle condizioni meteorologiche che influenzano lo stato delle superfici a contatto.

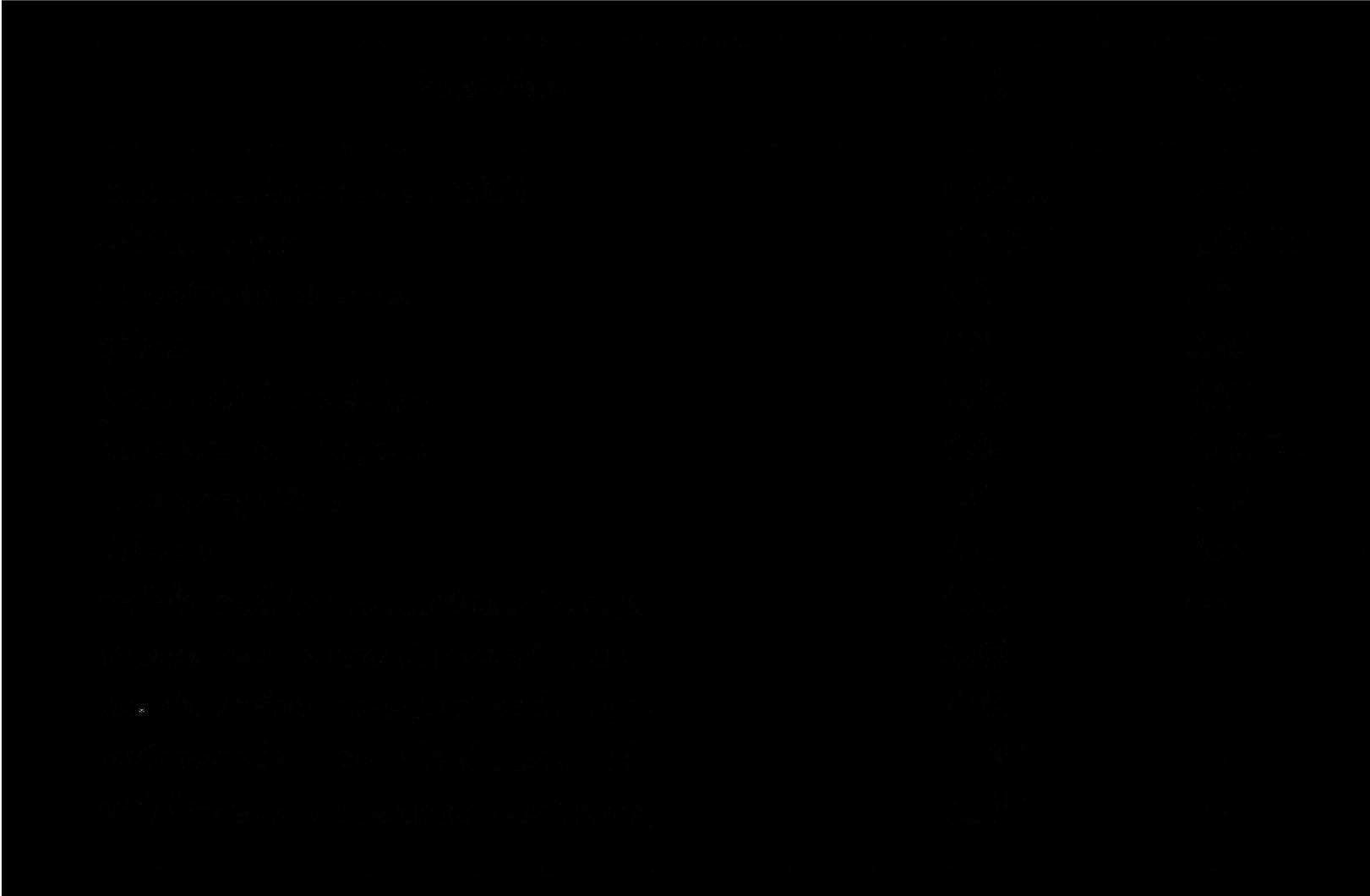
Il peso aderente  $P_a$  è il peso gravante sulla ruota aderente (motrice e/o frenata).

$$A = f_a(v) P_a$$

In tabella sono riportati alcuni valori sperimentali del coefficiente d'aderenza su strada ed in ferrovia.

*Il fenomeno dell'aderenza e l'equazione generale del moto*

## **Alcuni valori del coefficiente d'aderenza**



## ***Il fenomeno dell'aderenza e l'equazione generale del moto***

### **Il coefficiente d'aderenza in ferrovia**

In ferrovia il coefficiente d'aderenza  $f_{a(v=0)}$  (a velocità nulla) presenta valori pari a 0,25 o 0,35 a seconda che ci si trovi in presenza di cattivo o buono stato delle superfici a contatto.

L'espressione sperimentale che ci permette di quantificare il coefficiente d'aderenza vale:

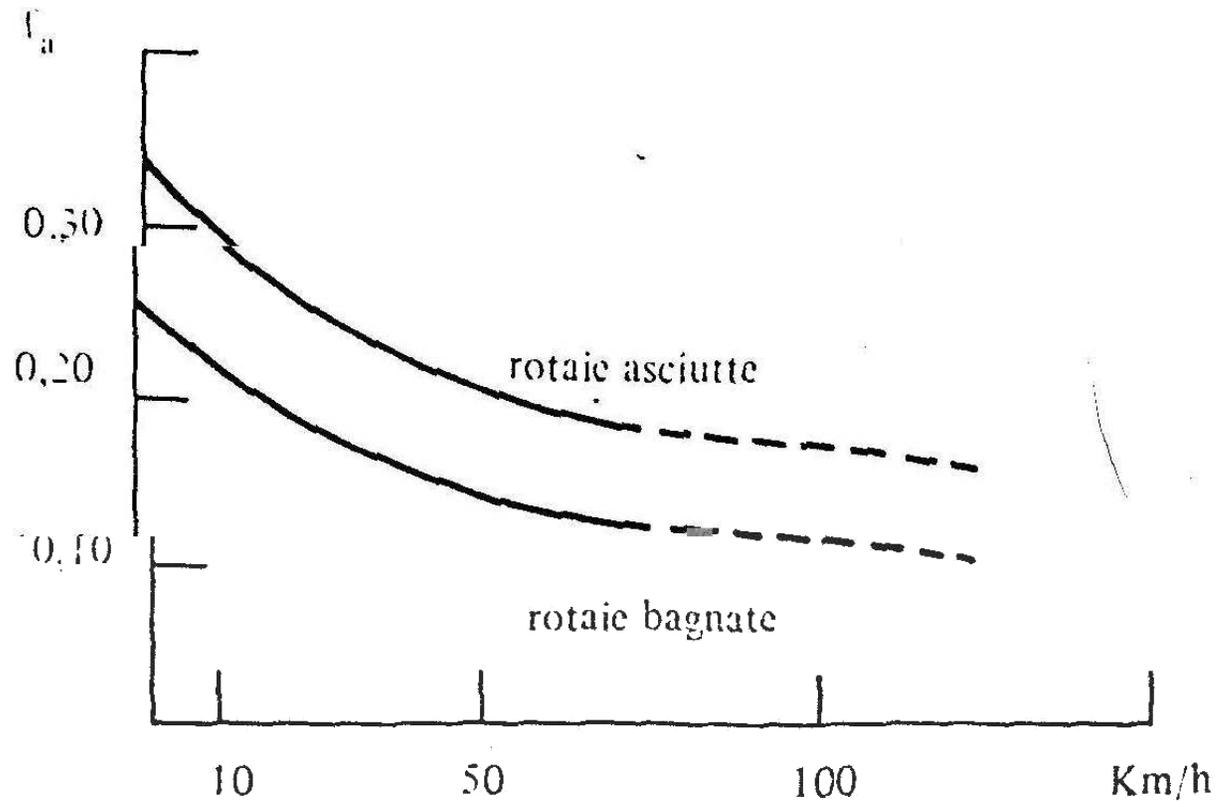
$$f_a(v) = f_{a(v=0)} / (1 + 0,011 V) \text{ (con } V \text{ in Km/h)}$$

La sua variabilità contenuta è da porsi in relazione con la limitata superficie d'impronta (misurabile in mm<sup>2</sup>) dovuta all'omogeneità dei materiali che costituiscono le superfici a contatto (per entrambe l'acciaio).

In figura è riportato l'andamento del coefficiente d'aderenza.

*Il fenomeno dell'aderenza e l'equazione generale del moto*

## Andamento del coefficiente d'aderenza in ferrovia



## *Il fenomeno dell'aderenza e l'equazione generale del moto*

### **Il coefficiente d'aderenza su strada**

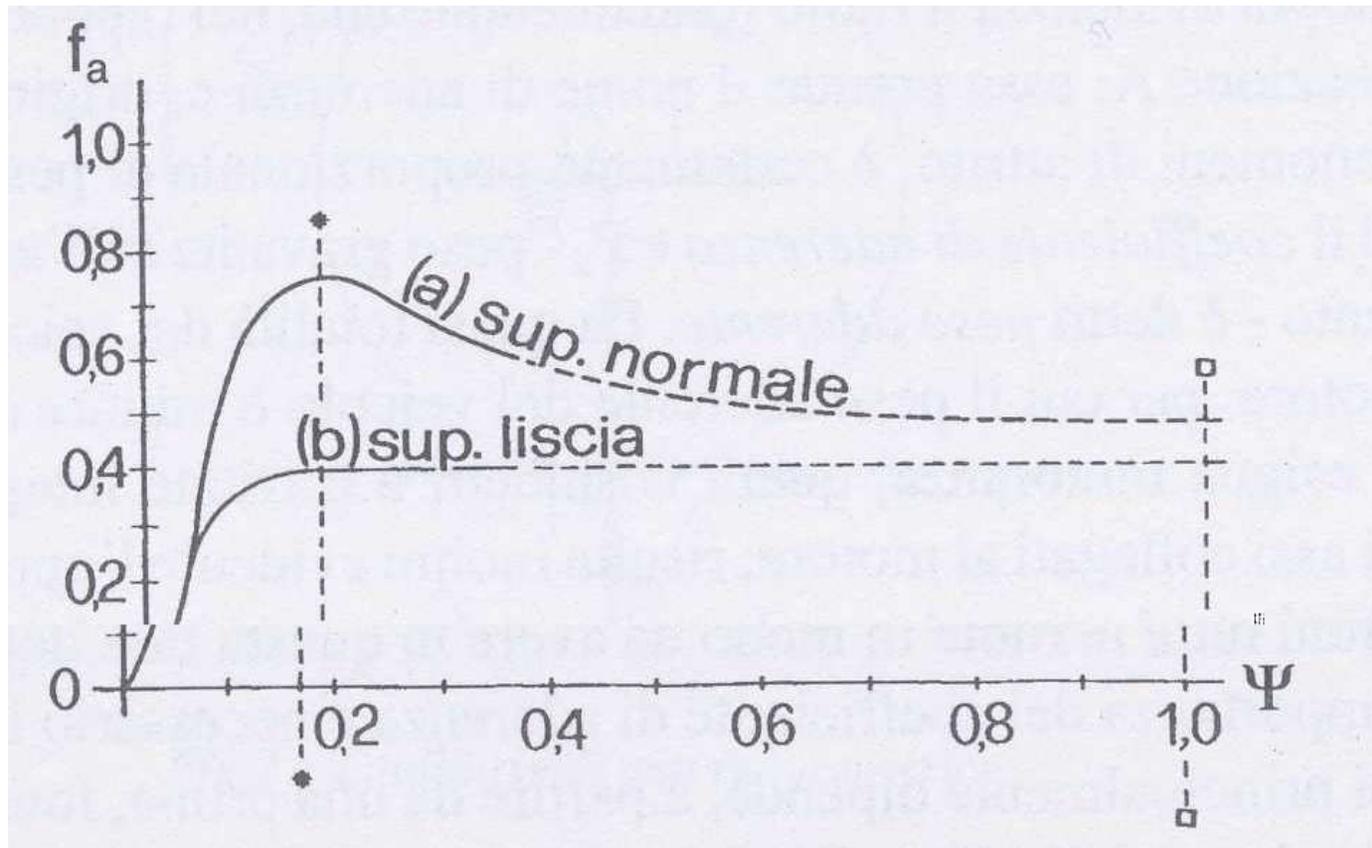
Su strada la disomogeneità dei materiali che costituiscono le superfici a contatto (pneumatico per la ruota e conglomerato bituminoso per la strada), una maggiore superficie d'impronta e l'influenza delle diverse situazioni meteo determinano una più marcata variabilità del coefficiente d'aderenza.

Il suo valore dipenderà quindi dalla pressione di gonfiaggio dei pneumatici e dallo pseudo-scorrimento  $\psi$  delle superfici a contatto.

In figura è riportato l'andamento del coefficiente d'aderenza.

*Il fenomeno dell'aderenza e l'equazione generale del moto*

**Andamento del coefficiente d'aderenza su strada**



## ***Il fenomeno dell'aderenza e l'equazione generale del moto***

### **L'equazione generale del moto**

Affinché un veicolo (stradale) o un convoglio (ferroviario) si muova accelerando o decelerando occorre che:

$$\text{forze attive} - \text{forze passive} = \text{forze d'inerzia}$$

Queste forze essendo funzioni della velocità possono quindi essere indicate con:  $F_t(v) - R_T(v) = M_e dv / dt$  avendo indicato con  $F_t(v)$  lo sforzo di trazione, con  $R_T(v)$  le resistenze totali al moto, con  $M_e$  le masse equivalenti ( $M_e = M_s \alpha$  dove  $\alpha = 1 + \mu$  e  $\mu$  è la % di incremento delle  $M_s$  per la presenza anche di masse in rotazione) e con  $dv / dt$  l'accelerazione/decelerazione istantanea. Siamo quindi in presenza di un moto vario o uniformemente accelerato/decelerato.

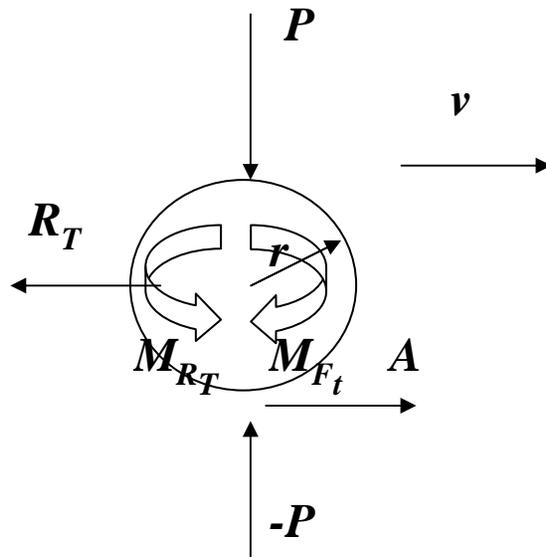
L'espressione:  $F(v) - R(v) = M_e dv / dt$  rappresenta quindi lo sforzo acceleratore/deceleratore che si annulla quando  $F(v) = R(v)$ , cioè quando il moto diventa uniforme ( $v = \text{costante}$ ).

## Il fenomeno dell'aderenza e l'equazione generale del moto

### Ruote ed equazione generale del moto

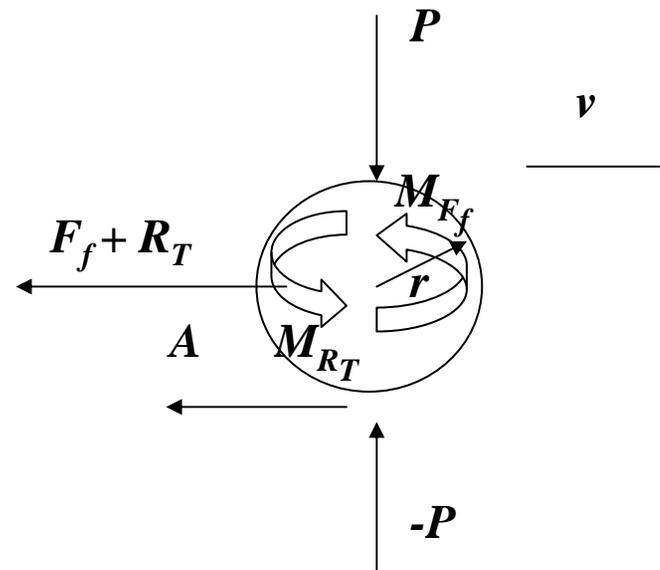
*Ruota motrice:*

$$F_t - R_T = M_e dv/dt$$



*Ruota frenata:*

$$-F_f - R_T = -M_e dv/dt$$



## ***Il fenomeno dell'aderenza e l'equazione generale del moto***

### **Forze attive**

Sono quelle che favoriscono il moto e dipendono dalle caratteristiche meccaniche del motore di trazione.

Per la trazione, il motore ideale (teorico) è quel motore che presenta una caratteristica meccanica alle ruote del tipo:  $F_T v = \text{costante}$ , rappresentabile graficamente da un'iperbole equilatera la cui costante rappresenta quindi la potenza, che per tale motore si mantiene costante.

Nella realtà, a seconda del motore di trazione impiegato, le caratteristiche meccaniche non sempre si avvicinano a tale caratteristica ideale. Tali questioni verranno approfondite quando si affronteranno le problematiche connesse con i differenti sistemi di trazione e quando si accennerà alle diverse tipologie di motori utilizzati per la trazione.

In figura vengono illustrate le diverse caratteristiche meccaniche dei motori reali riferiti alla caratteristica meccanica del motore ideale.

## Motori di trazione

# Caratteristiche meccaniche

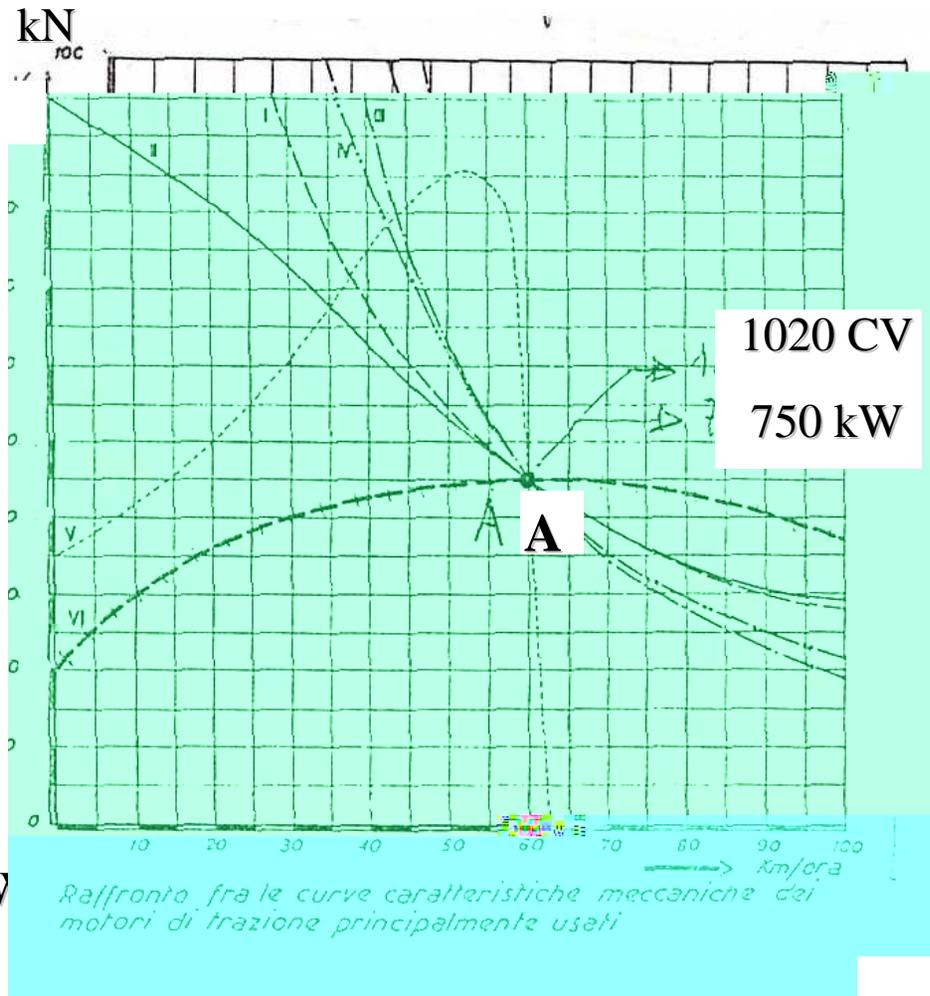
La caratteristica meccanica del motore ideale, in una rappresentazione  $F(v)$ , è un'iperbole equilatera. In figura sono riportate le caratteristiche meccaniche dei motori di trazione.

Legenda:

- I motore ideale
- II a vapore
- III elettrico c.c.
- IV elettrico c.a. monofase
- V elettrico c.a. trifase
- VI a combustione interna

[ 1 CV sono 735,5 W  
1 kW sono 1,36 CV ]

In A:  $P = (45 \times 60) / 3.6 = 750 \text{ kW}$   
cioè  $750 \times 1.36 = 1020 \text{ CV}$   
[ N. B. 1 HP = 1,91 CV ]



Km/h

## ***Il fenomeno dell'aderenza e l'equazione generale del moto***

### **Forze passive**

Sono costituite da tutte le resistenze che si oppongono al moto, sia in condizioni normali (in piano e rettilineo), sia in condizioni particolari (in curva e/o tratti in pendenza).

La resistenza totale:  $R_t = R_n + R_c + R_p$  [N] è data dalla somma delle:

#### Resistenze normali (in piano e rettilineo)

$$R_n = R_r + R_a = r_r P + c k S V^2 \text{ [N]}$$

#### Resistenze addizionali

per la presenza di curve:  $R_c = r_c P$  [N]

lungo tratti in ascesa:  $R_p = r_p P$  [N]

Si ricorda che nei tratti in discesa:  $- R_p = - r_p P$  [N] tale contributo risulta essere a favore del moto.

A tutti gli effetti anche la forza frenante  $F_f$  è una forza passiva aggiuntiva necessaria a diminuire la velocità o ad annullarla.

## *Il fenomeno dell'aderenza e l'equazione generale del moto*

# **Resistenza in piano e rettilineo**

La resistenza in piano e rettilineo dipende a sua volta da:

- resistenze di rotolamento ( $R_r$ ) dovute all'attrito, sia nel punto di contatto ruota - via, sia nel punto di contatto ruota - veicolo. Dipendono dal peso gravante sugli organi di rotolamento.
- resistenze prodotte dall'aria ( $R_a$ ) dovute all'attrito che nasce per effetto dell'attraversamento a data velocità dell'aria da parte del veicolo o del convoglio. Tali resistenze dipendono dalle caratteristiche dell'aria (densità e temperatura), dal coefficiente di forma del veicolo/convoglio, dalla sua superficie maestra (massima trasversale) e dal quadrato della velocità.

Sperimentalmente la  $R_n$  può essere quantificabile attraverso espressioni:

$$R_n = R_r + R_a = a P + b V^2 \text{ (binomie)}$$

$$R_n = R_r + R_a = (a P + b V) + c V^2 \text{ (trinomie)}$$

## *Il fenomeno dell'aderenza e l'equazione generale del moto*

# Valori del coefficiente di forma k

Tipo di veicolo

Automobile	$0.3 \div 0.6$
Automobile decappottabile	$0.4 \div 0.9$
Automobile da corsa	$0.25 \div 0.30$
Autobus	$0.50 \div 0.70$
Autocarro	$0.80 \div 1.00$
Trattore	1.3
Moto + guidatore	$0.9 \div 1.8$
Automotrice 2 unità carenate	$0.40 \div 0.45$
id. c.s. per ogni unità aggiuntiva	$0.08 \div 0.10$
Automotrice 2 unità	$0.50 \div 0.56$
id c.s. per ogni unità aggiuntiva	$0.12 \div 0.15$
Primo veicolo di un convoglio	fino a $1.2 \div 1.4$
Altri veicoli	fino a $0.8 \div 1$

## ***Il fenomeno dell'aderenza e l'equazione generale del moto***

### **Resistenze addizionali**

In ferrovia sono presenti entrambe tali resistenze addizionali e per questo le linee vengono classificate in base 31 gradi di prestazioni a cui corrisponde una resistenza addizionale unitaria  $\rho = r_c + r_p$  [1/1000]. La presenza infatti della guida costituita dall'accoppiamento fungo (rotaia) - bordino (ruota), determina attriti per effetto degli strisciamenti del bordino contro il fungo.

Su strada le resistenze addizionali invece sono date solo dalle resistenze di livelletta in quanto quelle dovute alla presenza di curve possono essere trascurate (microstrisciamenti) per il fatto che le ruote sono indipendenti. Pertanto la resistenza addizionale unitaria vale  $r_p = i$  [1/1000].



## *Il fenomeno dell'aderenza e l'equazione generale del moto*

# Resistenza lungo livellette

La resistenza addizionale dovuta alla presenza di tratti in curva è proporzionale al peso  $P$  e vale  $r_p P$ . La resistenza addizionale unitaria  $r_p$  risulta pari al valore della pendenza  $i$  [1/1000] espresso in per mille.

In ferrovia le pendenze massime indicative sono riportate in tabella:

Sistema	Pendenza [1/1000]
• ferrovie principali di pianura:	5 - 8
• ferrovie principali su terreno accidentato	15 - 18
• ferrovie principali di montagna	20 - 25
• ferrovie a scartamento ridotto	30 - 45
• ferrovie urbane (tutti veicoli automotori)	60
• tranvie	80
• funicolari	650
• cremagliere	400

Su strada le pendenze massime sono prescritte dalla normativa stradale vigente.