

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

LA FRENATURA IN FERROVIA E SU STRADA

Generalità

La frenatura in ferrovia

La frenatura su strada

La frenatura in ferrovia e su strada

Generalità

Per lo studio della fase di moto in frenatura è necessario conoscere lo sforzo frenante R_f da applicare alle ruote per poter frenare il veicolo in tempi e spazi compatibili con la sicurezza circolatoria.

In frenatura l'equazione di moto si riduce a: $R_T + R_f = - M_e dv/dt$, con il vincolo del rispetto dell'aderenza (al limite) $R_f = A = f_a P_a$ e dove: R_T sono le resistenze totali che si oppongono al moto, f_a è il coefficiente d'aderenza, P_a è il peso che grava sulle ruote frenate, M_e è la massa equivalente e dv/dt è la decelerazione istantanea.

Occorre quindi, per affrontarne lo studio in ferrovia e su strada, conoscere i relativi impianti frenati che caratterizzano i relativi veicoli.

In ogni caso per la determinazione dello spazio di frenatura occorre estinguere l'energia cinetica immagazzinata $\frac{1}{2} M_e v^2$ con il lavoro compiuto dalle forze resistenti $(R_T + R_f) s_f$.

La frenatura in ferrovia e su strada

La frenatura su strada/1

L'attuale tecnologia adotta, sia freni a disco, sia freni a tamburo. Non va però dimenticato il freno motore (il CdS vieta appunto la marcia in deriva, cioè a motore disinserito. Nei veicoli pesanti commerciali è previsto un dispositivo detto "rallentatore" che non è altro che un dispositivo frenante, aggiuntivo ai freni veri e propri, che agisce direttamente sull'asse di trasmissione.

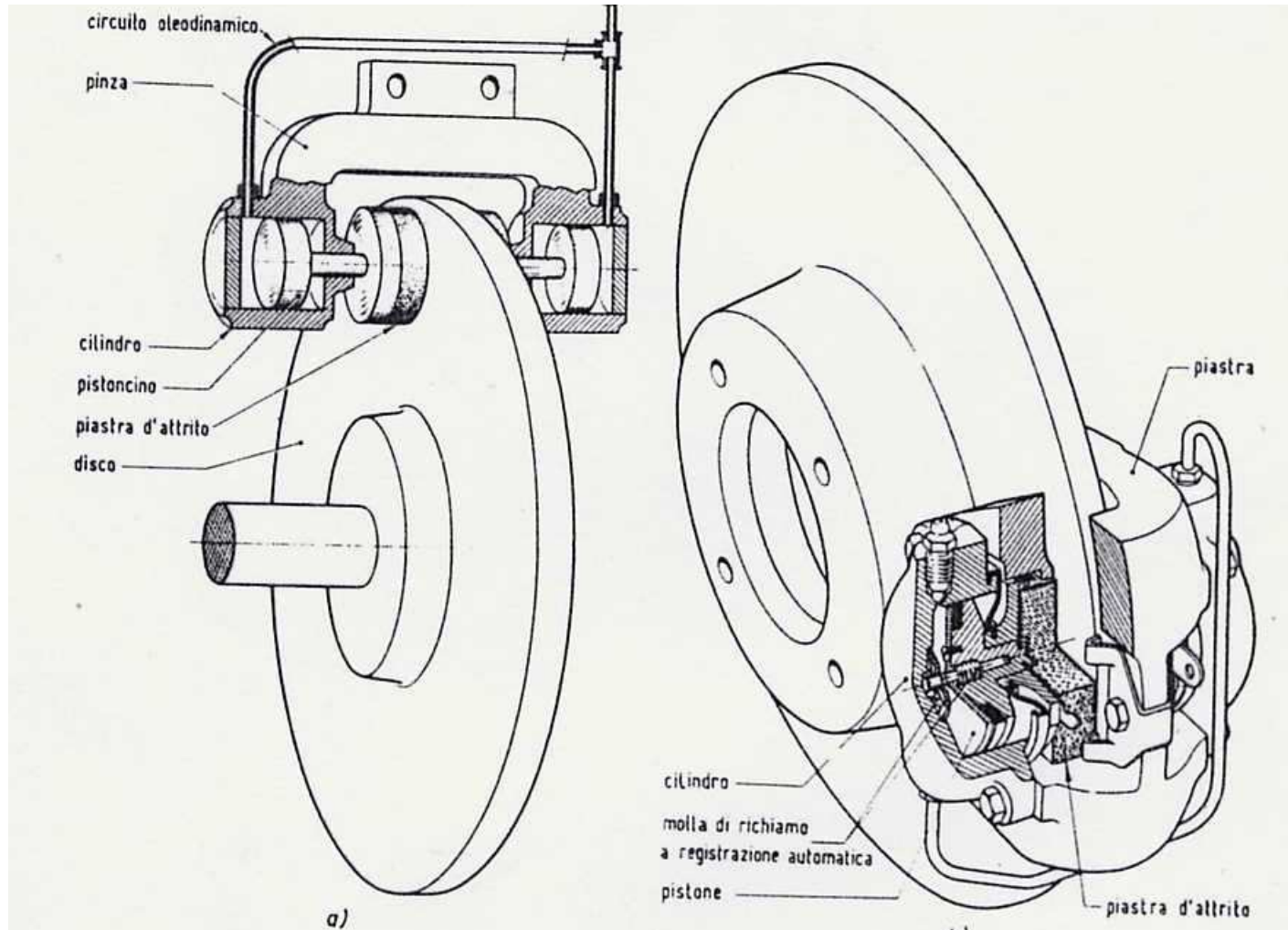
Nel freno a disco (usato sulle autovetture) l'elemento solidale con la ruota è appunto il disco che viene serrato da pinze solidali al telaio della vettura che mettono a contatto del disco (pareti laterali) due pastiglie costituite da un particolare materiale (ferodo) che presenta un coefficiente d'attrito f' pari a circa 0,3 non variabile con la velocità.

Nel freno a tamburo (usato nei veicoli commerciali) l'elemento mobile è il tamburo (parte interna del cerchio) sulla cui superficie interna agiscono due ganasce (ad arco di cerchio ed imperniate, ad una estremità, ad una piastra solidale con il telaio del veicolo e che serrano progressivamente tale superficie) che mettono a contatto, con la superficie liscia del tamburo, un materiale tipo ferodo con un coefficiente d'attrito f' pari a circa 0,4 e praticamente costante rispetto alla velocità.

La frenatura in ferrovia e su strada

La frenatura su strada/2

Schema di freno stradale a disco



La frenatura in ferrovia e su strada

La frenatura su strada/3

Esempio di calcolo di spazio di frenatura

Calcolare lo spazio di frenatura, al limite di aderenza, per un'autovettura in marcia su una livelletta in discesa con pendenza del 5% alla velocità di 100 Km/h (27,78 m/s) e in presenza di un coefficiente di aderenza pari a 0,70.

Lo spazio di frenatura può essere calcolato:

$$s_f = \frac{1}{2} M_e v^2 / (R_T + R_f)$$

posto $a = 1$, $M_e = a M = M$ e dividendo per P si ha:

$$s_f = \frac{1}{2} v^2 / g (r_t + r_f) = \frac{1}{2} 27,78^2 / 9,81 (0,7 + 0,015 - 0,05) = 380,3 / 6,5 = 58.5 \text{ m}$$

Stimando il tempo di reazione in 1 s, lo spazio d'arresto vale:

$$s_a = 58,5 + 1 \times 27,78 = 86,3 \text{ m}$$

La frenatura in ferrovia e su strada

La frenatura in ferrovia/1

I freni ferroviari utilizzati sono: lo storico freno a ceppi ed il freno a dischi.

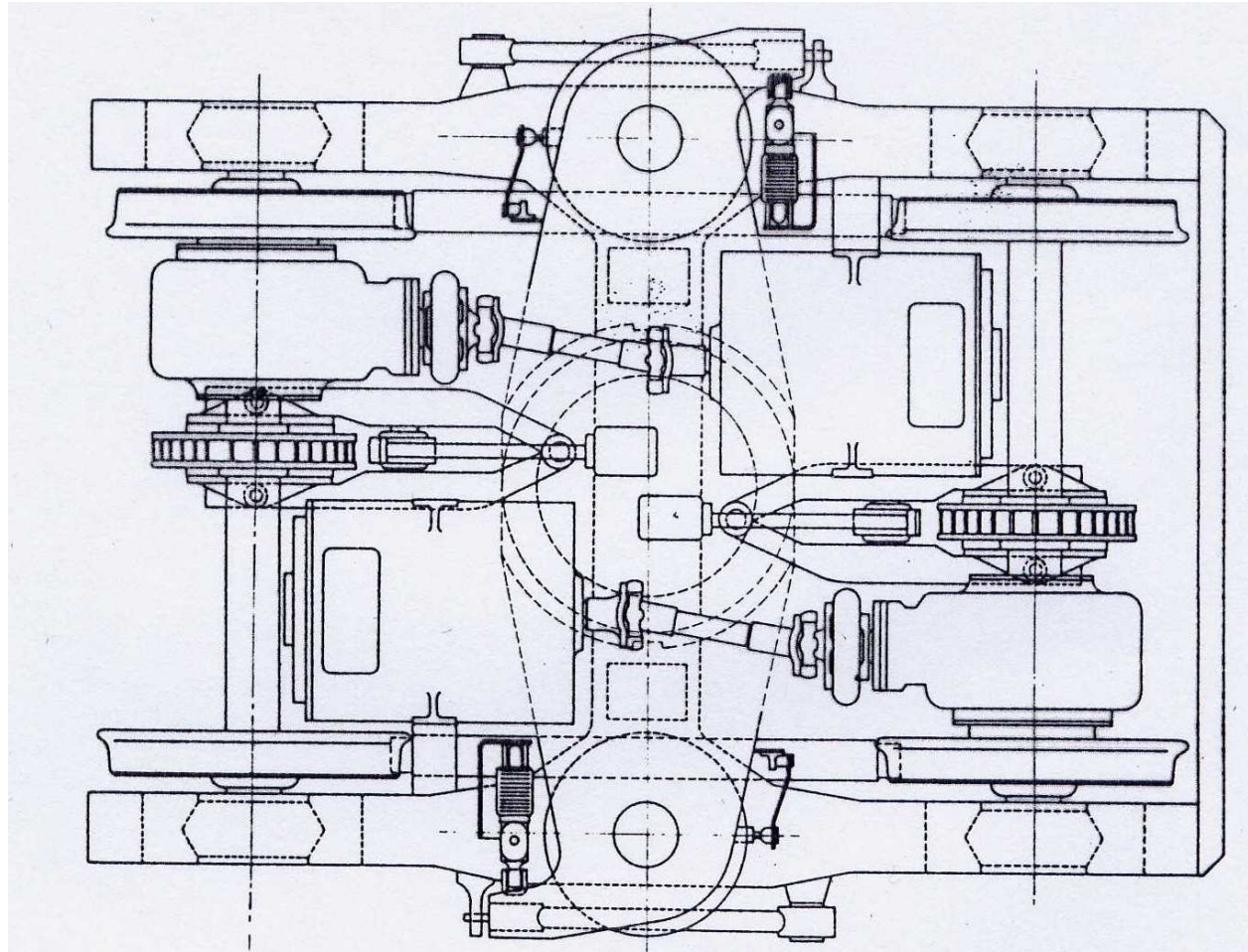
A differenza della strada, in presenza di una infrastruttura ferroviaria (binario) è possibile marciare in deriva (*coasting*). Durante la fase di frenatura gran parte dell'energia cinetica viene appunto eliminata sotto forma di calore (attraverso reostati di frenatura) o recentemente ed in particolari situazioni è altresì possibile trasformare tale energia cinetica utilizzando gli stessi motori di trazione per produrre energia elettrica. E' questo il freno motore ferroviario che viene sempre utilizzato per abbassare la velocità e renderla tale da permettere l'intervento efficace del freno ferroviario meccanico di tipo continuo a ceppi o a dischi.

Storicamente il freno a ceppi, costituito appunto da due ceppi portanti ognuno due soles (ceppi articolati) in ghisa, presenta un coefficiente d'attrito variabile con la velocità. *Wickert* ha trovato la seguente espressione sperimentale per tale coefficiente d'attrito : $m = m' (1 + a V) / (1 + b V)$ dove $m' = 0,45$ se in buone condizioni e $m' = 0,25$ in cattive condizioni; $a = 0,0112$ e $b = 0,06$; V in Km/h.

La frenatura in ferrovia e su strada

La frenatura in ferrovia/2

Schema di freno ferroviario a disco su carrello motore



La frenatura in ferrovia e su strada

La frenatura in ferrovia/3

Il freno ferroviario a dischi non si differenzia da quello stradale in via di principio (solo gli sforzi frenanti in gioco e quindi di conseguenza il dimensionamento di dischi e pinze variano): un disco solidale con la ruota (di solito due dischi ogni sala montata, cioè ogni due ruote, ad eccezione delle sale montate motrici che ne presentano un solo disco frenante viene serrato da una pinza dotata di pastiglie di ferro).

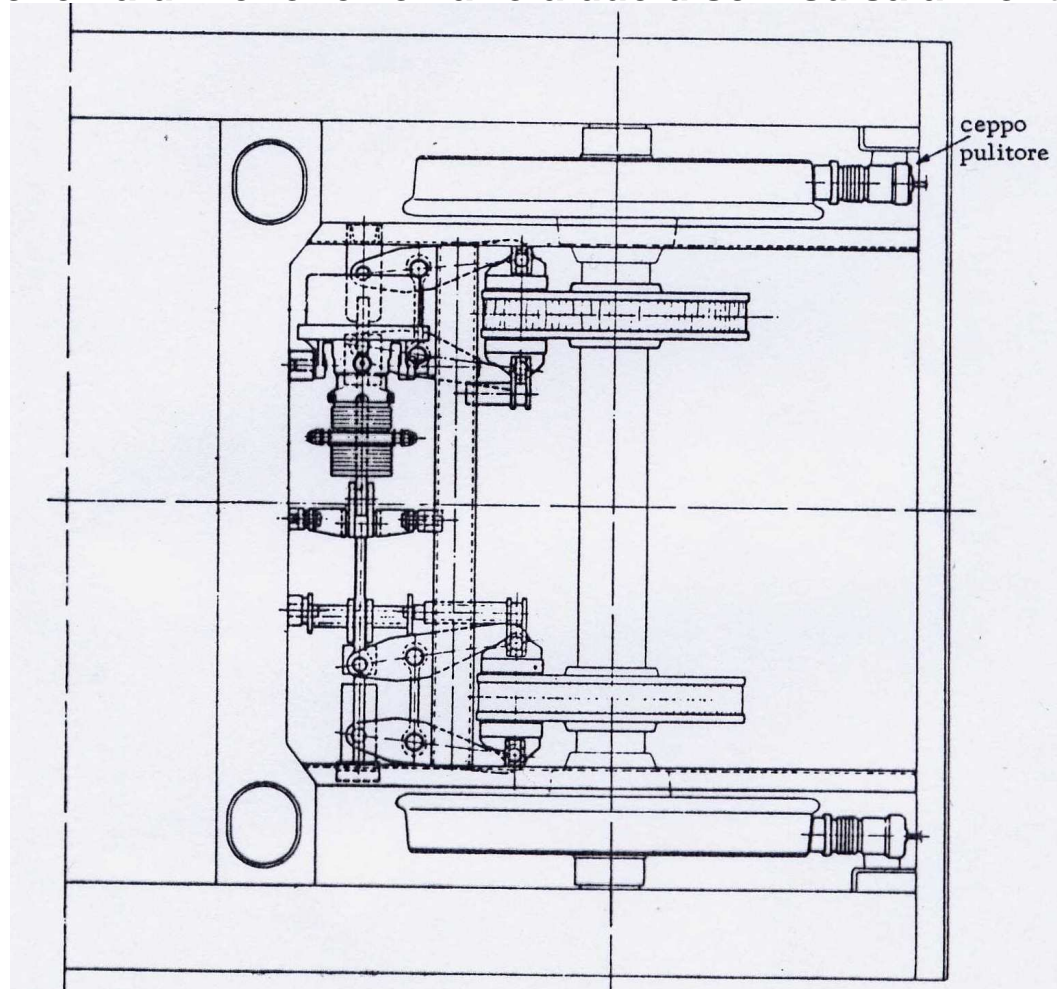
Nei veicoli stradali isolati l'impianto frenante è solitamente di tipo o idraulico o meccanico (rispettivamente se di servizio e di soccorso o se di stazionamento), in ferrovia, in presenza di convogli di veicoli (numerosi veicoli tra loro accoppiati, ma anche su strada: autotreni, autoarticolati), tale impianto frenante funziona ad aria compressa (tipo Westinghouse).

Le principali caratteristiche di un impianto frenante ferroviario di tipo continuo (viaggiatori e merci) permettono di abbattere i tempi morti (rapidità), di aumentare la sua efficacia (potenza), di graduare lo sforzo frenante (moderabilità), di garantirne l'efficacia (inesauribilità), di poter essere azionato da un unico posto di manovra (continuità) e poter inserirsi automaticamente in caso di rottura del convoglio (automaticità).

La frenatura in ferrovia e su strada

La frenatura in ferrovia/4

Schema di freno ferroviario a due dischi su sala montata



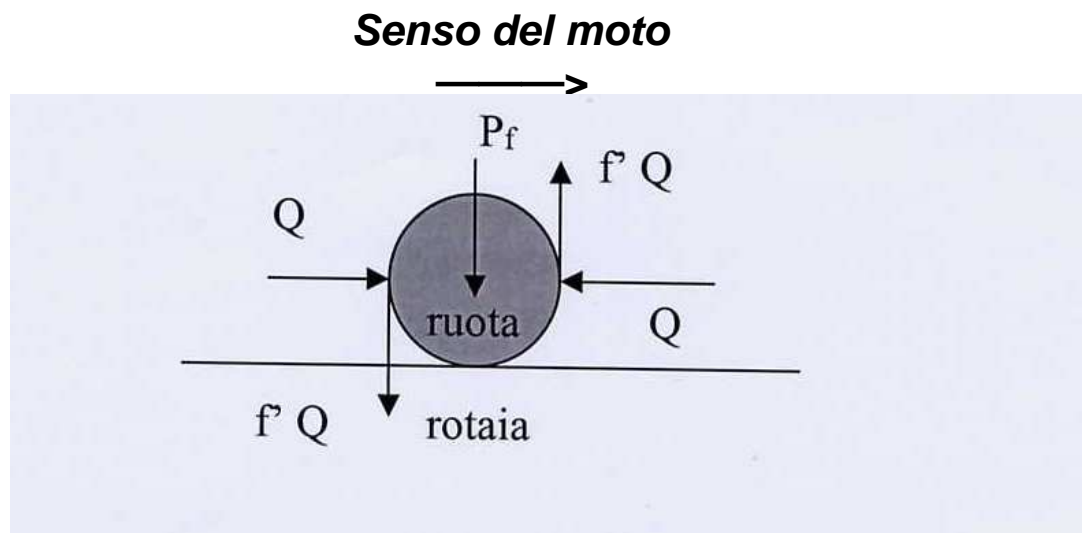
La frenatura in ferrovia e su strada

La frenatura in ferrovia/5

In frenatura occorre che sia sempre verificata la condizione di aderenza (cioè che la ruota rotoli senza strisciare). Al limite dell'aderenza quindi si dovrà verificare:

$$f' Q = f_a P_f 1000$$

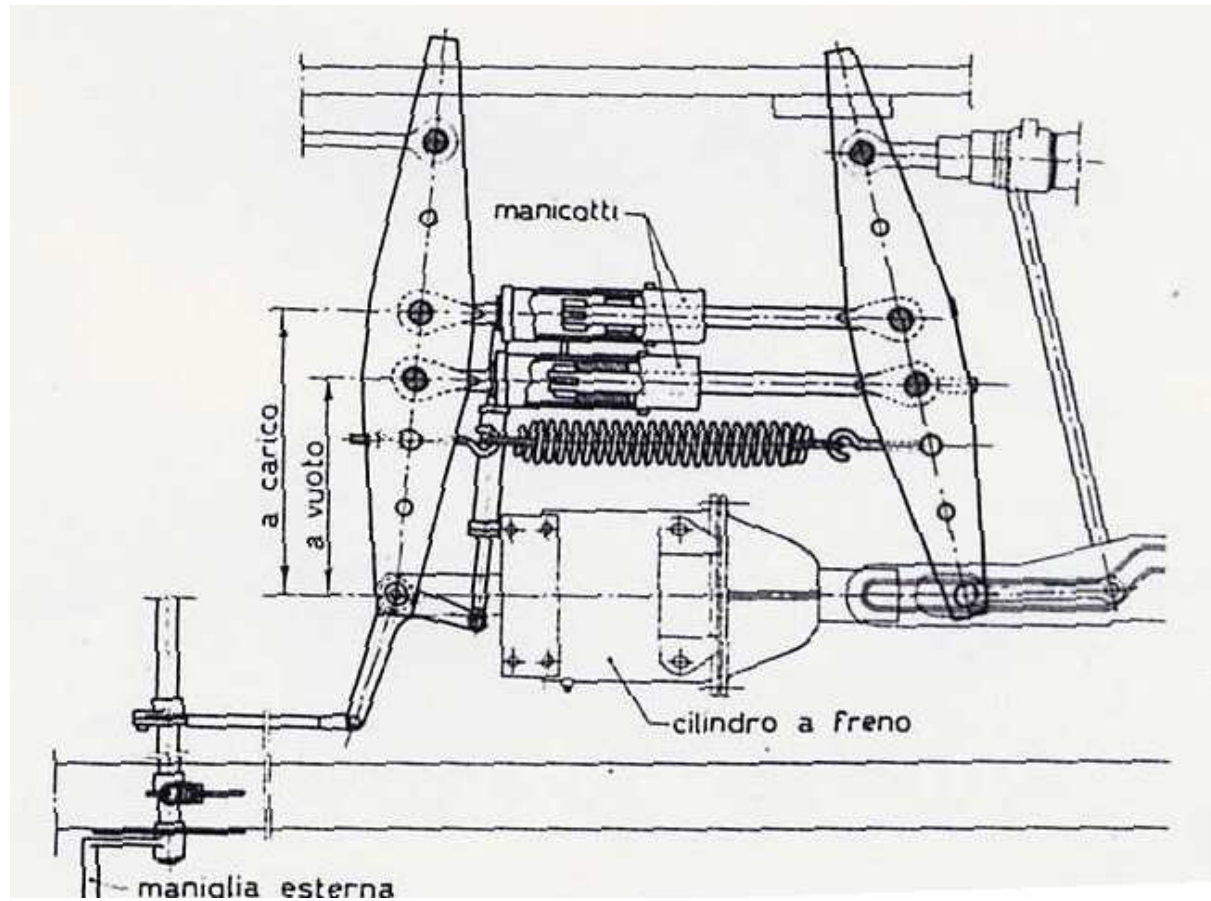
con: f' = coefficiente d'attrito (ceppo/cerchione), f_a = coefficiente d'aderenza (ruota/rotaia), $Q = k P_f$ è lo sforzo applicato al ceppo (con: k = percentuale di frenatura (P_f = è il peso gravante sulle ruote frenate e nel caso in cui non tutte le ruote siano frenate si definisce $1/n$ = rapporto di frenatura il rapporto P_f / P_t tra il peso gravante sulle ruote frenate ed il peso totale).



La frenatura in ferrovia e su strada

La frenatura in ferrovia/6

Schema della timoneria di un freno ferroviario



La frenatura in ferrovia e su strada

La frenatura in ferrovia/7

Per essere quindi garantiti contro il pericolo di slittamento alle basse velocità (minori di 10 Km/h) la percentuale di frenatura k dovrà risultare minore o uguale al 60-70 %.

L'equazione generale del moto diventa: $R_T + R_f = - M_e dv/dt$

con: $R_f = f' Q$ e $R_T = r_T P_t$ (con: $r_T = r_{nm} +/- i$ e $Q = 1000 k 1/n P_t$)

Lo spazio di frenatura si calcola eguagliando l'energia cinetica immagazzinata al lavoro speso per frenare:

$$\frac{1}{2} M_e v^2 = (R_t + R_f) s$$

da cui si ricava lo spazio di frenatura: $s_f = \frac{1}{2} v^2 1000 M_e 1 / (R_t + R_f)$

Lo spazio d'arresto è dato dalla somma di quello di frenatura a cui va aggiunto lo spazio percorso a velocità costante (di inizio frenatura) durante l'istante (da 3 sec. per treni viaggiatori, sino a 10 sec per treni merci) che tiene conto dei tempi di percezione, di reazione, e di manovra e massima efficienza (potenza) del freno.

La frenatura in ferrovia e su strada

La frenatura su ferrovia/8

Esempio di calcolo di spazio di frenatura

Calcolare lo spazio di frenatura (al limite di aderenza) per un convoglio ferroviario costituito da 2 automotrici i cui assi siano tutti frenanti e nell'ipotesi che marci a 100 Km/h (27,78 m/s) su una livelletta in discesa con pendenza del 5 per mille in presenza di un coefficiente di aderenza pari a 0,16. Il peso del convoglio sia di 800 kN.

In prima approssimazione lo spazio di frenatura può essere espresso:

$$s_f = v^2 / 2 g (f_a - i) = 27,78^2 / 2 \times 9.81 (0,16 - 0,005) = 254 \text{ m}$$

cui vanno aggiunti gli spazi percorsi durante i tempi di percezione e reazione.

Stimando questi ultimi in 3 s, lo spazio d'arresto vale:

$$s_a = 254 + 3 \times 27,78 = 337,3 \text{ m}$$