

A08  
382



Mario Olivari, Alessandro Olivo

# **Tecnica ed economia dei trasporti ferroviari**



Copyright © MMXII  
ARACNE editrice S.r.l.

[www.aracneeditrice.it](http://www.aracneeditrice.it)  
[info@aracneeditrice.it](mailto:info@aracneeditrice.it)

via Raffaele Garofalo, 133/A-B  
00173 Roma  
(06) 93781065

ISBN 978-88-548-4691-3

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,  
di riproduzione e di adattamento anche parziale,  
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie  
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: aprile 2012

# Indice

- 001    **Capitolo I**  
*Il tracciato della linea ferroviaria*
- 1.1. Gli elementi base, 001 – 1.2. Il tracciato planimetrico, 004 – 1.3. L'andamento altimetrico, 012 – Bibliografia, 014.
- 015    **Capitolo II**  
*La sovrastruttura e il corpo stradale*
- 2.1. La sovrastruttura, 015 – Bibliografia, 031.
- 033    **Capitolo III**  
*La manutenzione della sovrastruttura*
- 3.1. Criteri e metodi di manutenzione, 033 – 3.2. Vincoli alla circolazione in linea del materiale mobile, 040 – Bibliografia, 043.
- 045    **Capitolo IV**  
*Prestazioni di trazione*
- 4.1. Resistenze al moto, 045 – 4.2. Sistemi di trazione, 052 – 4.3. Sistemi di frenatura, 053 – 4.4. Prestazioni di trazione, 059 – 4.5. Capacità di frenatura, 061 – Bibliografia, 064.
- 065    **Capitolo V**  
*Orario e composizione dei treni*
- 5.1. Impostazione della velocità del treno, 065 – 5.2. Composizione di un treno, 068 – 5.3. Costruzione degli orari, 070 – 5.4. Informazioni per la

condotta del treno, 077 – Bibliografia, 079.

081 **Capitolo VI**  
*Manutenzione e sicurezza*

6.1. Rumore e vibrazioni, 081 – 6.2. Affidabilità, manutenibilità e disponibilità, 084 – 6.3. Sicurezza e regolamentazione dell'esercizio, 086 – Bibliografia, 090.

091 **Capitolo VII**  
*Il sistema ferroviario*

7.1. Il sistema di trasporto ferroviario, 091 – Bibliografia, 100.

101 **Capitolo VIII**  
*L'esercizio ferroviario*

8.1. Circolazione dei treni in linea, 101 – 8.2. Distanziamento con marcia a vista, 102 – 8.3. Sistemi di distanziamento o di blocco, 108 – 8.4. Il sistema di controllo della marcia del treno (SCMT), 128 – Bibliografia, 130.

131 **Capitolo IX**  
*La potenzialità delle linee*

9.1. Potenzialità nel distanziamento con segnali fissi, 131 – 9.2. Metodo statico per il calcolo della potenzialità, 132 – Bibliografia, 136.

137 **Capitolo X**  
*Le stazioni*

10.1. Le stazioni ferroviarie, 137 – 10.2. Movimenti dei treni in stazione, 145 – 10.3. Sistemi centralizzati di regolazione della circolazione, 149 – 10.4. Stazioni di smistamento, 149 – 10.5. Impianti di stazione e criteri di dimensionamento, 155 – Il ciclo del carro, 160 – Bibliografia, 161.

163 Capitolo XI

*Economia dei trasporti ferroviari*

11.1. I costi, 163 – 11.2. Il prezzo del trasporto, 165 – 11.3. La tariffazione, 170 – 11.4. Metodi per calcolare il prezzo totale del trasporto al variare del sistema di tariffazione, 176 – 11.5. Tariffe merci, 180 – Bibliografia, 181.





## *Il tracciato della linea ferroviaria*

### **1.1. Gli elementi base**

Gli elementi fondamentali che caratterizzano il tracciato ferroviario sono: il raggio minimo dei tratti in curva e la pendenza massima delle sue tratte. Questi elementi sono definiti nella fase di progetto e sono funzione della velocità massima mantenibile sui tratti di linea in esame e delle modalità di circolazione sullo stesso segmento di tracciato.

A tal fine sarà necessario studiare attentamente l'effetto dei tratti in curva sulla velocità massima ammissibile e l'effetto, sia dei tratti non rettilinei e sia delle pendenze delle singole livellette (segmento di linea a pendenza costante), sulle resistenze al moto incontrate dal treno e sulle relative potenze necessarie da installare sui mezzi di trazione e sulle composizioni degli stessi convogli.

Le caratteristiche geometriche del tracciato sono di norma riportate in elaborati di progetto detti *planimetrie* e *profili longitudinali*. Normalmente, la planimetria comprende il tracciato dell'asse dei binari con l'indicazione dei punti cosiddetti singolari che segnano l'inizio e la fine dei tratti *in rettilineo*, *in curva*, *di raccordo*, i loro sviluppi, nonché le caratteristiche topografiche della fascia di territorio adiacente alla linea.

Il profilo della linea è rappresentato da spezzate parallele tracciate in corrispondenza del piano del ferro (superiormente tangente alle rotaie) e del piano di posa della piattaforma.

I punti singolari riportati corrispondono agli estremi delle livellette e dei raccordi verticali per ognuno dei quali sono indicati gli sviluppi com-

plessivi. Un'ulteriore spezzata rappresenta il piano di campagna; lungo le singole spezzate sono riportati: le opere d'arte (ponti, viadotti, ecc.), i passaggi a livello, gli assi e gli estremi (deviatoi esterni) delle stazioni, i confini amministrativi della porzione di territorio attraversata.

La scala degli elaborati grafici dipende dal livello progettuale cui ci si riferisce (ad es., 1:10.000–1:1000 per le planimetrie–profilo, scale più dettagliate per livelli progettuali superiori).

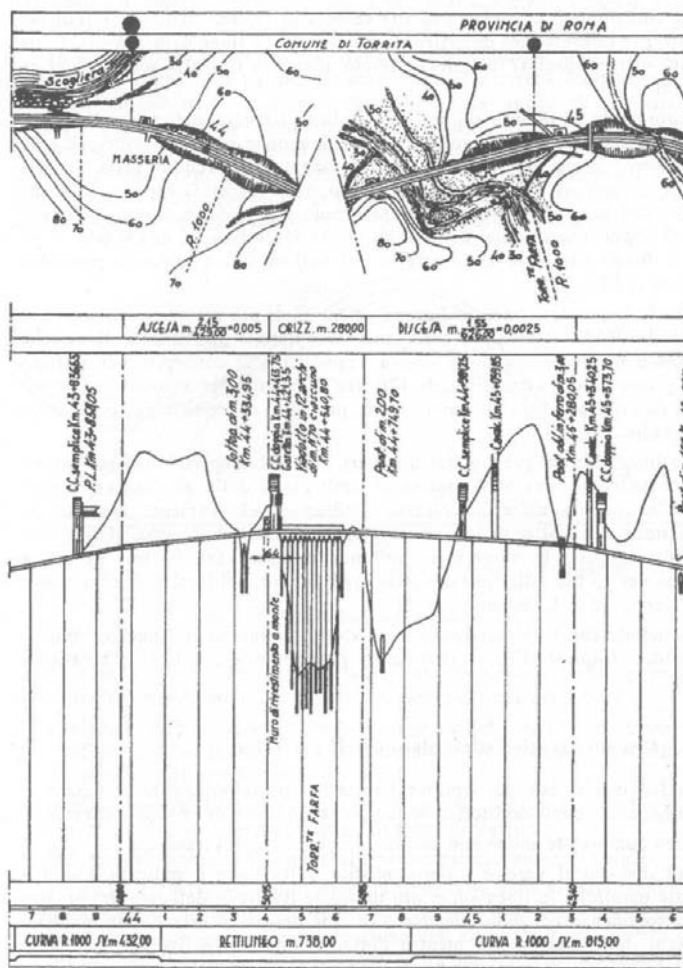


Fig. 1. Planimetria–profilo longitudinale di una linea ferroviaria

### 1.1.1. Velocità di progetto

Per velocità di progetto (VDP) si dovrebbe intendere la velocità max del treno, da prevedere come base di progetto per gli elementi geometrici, per raggiungere un confort accettabile dai passeggeri. Se una linea ha una certa VDP, ciò sta a significare che il treno che la percorre a quella velocità realizza la massima sicurezza con un confort adeguato in termini di accelerazioni e di variazioni nel tempo delle stesse. In effetti, in campo ferroviario, le cose sono un po' più complesse in quanto si utilizzano diverse forme di velocità:

- *velocità limite*, velocità alla quale si percorre una curva di raggio  $R$  avente la massima sopraelevazione possibile compatibile con valori prefissati dell'accelerazione non compensata ( $a_{nc}$ )
- *velocità di tracciato*, velocità limite della curva a raggio minore lungo la tratta (se questa è in rettilineo tale velocità è  $\infty$ )
- *velocità di rango*, velocità potenziali alle quali può essere percorsa una tratta con valori prefissati dei parametri meccanici e dinamici dei rotabili, senza sollecitazioni nocive sull'infrastruttura
- *velocità di fiancata*, velocità max ed effettiva (diversa in relazione al rango del rotabile) alla quale può essere percorsa una tratta in relazione alle caratteristiche della linea (armamento, segnalamento, ecc.)
- *velocità d'orario*, velocità alla quale è impostato l'orario ferroviario, minore della precedente, per consentire elasticità nel recupero di perditempo di varia natura.

Si definisce pure una velocità minima per tener conto che sulle linee transitano treni lenti (80 km/h) che limitano il sopralzo e, quindi, la velocità limite in curva.

## 1.2. Il tracciato planimetrico

### 1.2.1. Dinamica in curva

Lo studio dell'equilibrio dinamico del veicolo ferroviario in curva coinvolge aspetti tecnologici e fisici e costituisce la base per il progetto

planimetrico del tracciato e della sovrastruttura ferroviaria. Durante il moto in curva si genera la forza centrifuga  $F_c$  (1) che tende a ribaltare i veicoli, sollecita la rotaia esterna del binario e riduce il comfort dei viaggiatori.

$$F_c = ma_c = mv^2/R = (P/g)v^2/R \quad [\text{N}] \quad (1)$$

$m$  = massa del mezzo, kg

$a_c$  = accelerazione centrifuga generata dalla traiettoria curva del moto,  $\text{ms}^{-2}$

$v$  = velocità istantanea di marcia,  $\text{ms}^{-1}$

$R$  = raggio, sull'asse binari, del tratto curvilineo percorso, m

$P$  = forza peso del mezzo, N

$g$  = accelerazione di gravità,  $9,806 \text{ ms}^{-2}$ .

Dalla (1) deriva la velocità max di percorrenza di una curva:

$$v = (Ra_c)^{1/2} \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

### 1.2.2. Stabilità e moto in curva

Altro importante problema è quello relativo alla stabilità in curva del veicolo: infatti, i limiti dell'accelerazione trasversale ammissibile imposti dal comfort dei passeggeri sono di norma più restrittivi di quelli relativi al rischio di ribaltamento del mezzo o di svio dalla via di corsa. Durante il moto in curva sul veicolo agiscono la forza peso  $P$  e la forza centrifuga  $F_c$  applicate nel baricentro G (Fig. 2); se la curva è in piano il veicolo non si ribalta se la risultante delle forze agenti sul baricentro cade entro il perimetro d'appoggio della sala, cioè se il momento ribaltante è equilibrato da quello stabilizzante, vale la:

$$F_c h \leq Ps/2 \quad (3)$$

da cui:

$$(P/g)hv^2/R \leq Ps/2 \rightarrow v^2/R \leq gs/2h$$

quindi, la velocità max in curva al limite del ribaltamento:

$$v = (gRs/2h)^{1/2} \quad [\text{m/s}] \quad (4)$$

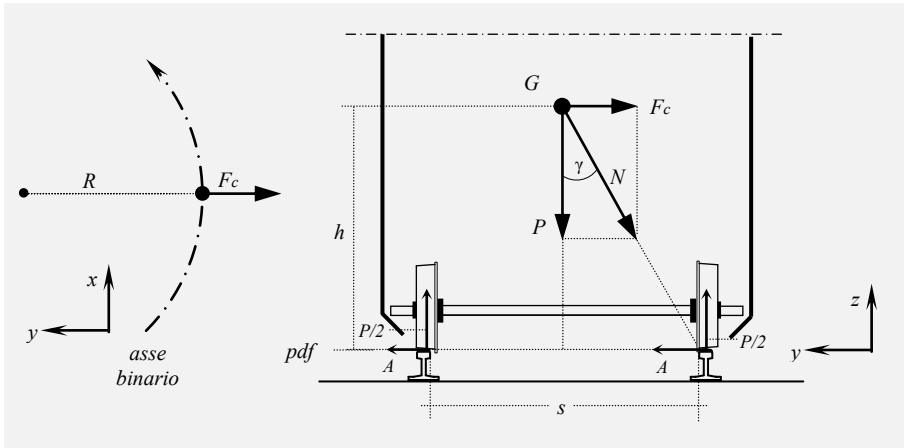


Fig. 2. Equilibrio–limite del veicolo in curva in piano

Si può notare che sopraelevando la rotaia esterna si possono avere velocità maggiori in quanto si riesce a compensare, in tutto o in parte (bilanciamento totale o parziale), l'incremento di accelerazione centrifuga conseguente all'aumento di velocità. Con il sopralzo si uguagliano le reazioni orizzontali sulle rotaie, annullando lo slittamento laterale.

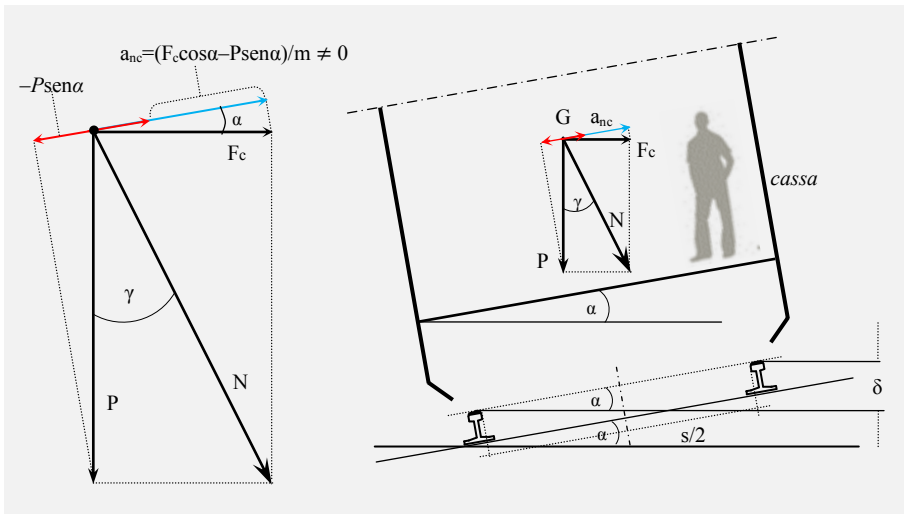


Fig. 3. Sopralzo rotaia in curva – bilanciamento parziale

Si potrebbe progettare la pendenza trasversale del *pdf* ( $\alpha$ ) in modo da compensare totalmente la forza centrifuga: perché si abbia il completo bilanciamento della forza centrifuga  $F_c$  occorre che il sopralzo sia tale da rendere normale al *pdf* la risultante  $N$ ; tale condizione (scomponendo sulla parallela al *pdf* peso e forza centrifuga) comporta:

$$F_c \cos \alpha - P \sin \alpha = 0$$

$$P \sin \alpha = F_c \cos \alpha = \cos \alpha P v^2 / gR$$

da cui:

$$\tan \alpha = v^2 / gR \quad (5)$$

poiché  $\alpha$  è, in pratica, molto piccolo ( $\approx 6^\circ$ ),  $\tan \alpha = \sin \alpha$ ; ed essendo:

$$\sin \alpha = \delta / s \rightarrow \tan \alpha = \delta / s \quad (5')$$

$\delta$  = sopralzo rotaia esterna, m

$s$  = distanza assi rotaie per scartamento standard, 1,5 m

da (5) e (5'):

$$\delta = s v^2 / gR = 1,5 v^2 / 9,81 R = 0,153 v^2 / R \quad [\text{m}] \quad (6)$$

per  $\delta$  [mm],  $V$  [km/h],  $R$  [m]:

$$\delta \approx 11,8 V^2 / R \quad [\text{mm}] \quad (6')$$

Viceversa, assegnato il sopralzo  $\delta$  potrà determinarsi la velocità con cui il mezzo percorre la curva con neutralizzazione completa delle azioni centrifughe. Dalla (6):

$$v = (gR\delta/s)^{1/2} \quad [\text{m/s}] \quad (7)$$

Se  $v$  è  $>$  o  $<$  del valore (7) si avrà un sovraccarico sulla rotaia esterna o su quella interna.

La riduzione della  $F_c$  ha lo scopo di migliorare il comfort dei viaggiatori e ridurre gli sforzi tra ruota esterna e rotaia. La sopraelevazione è

ottenuta rialzando la rotaia esterna mentre quella interna mantiene la quota della livelletta di progetto.

Per scegliere la sopraelevazione max di progetto di una linea si deve considerare il *range* di velocità dei treni che la percorreranno scegliendo un valore che compensi il più possibile la  $F_c$  per i treni più veloci – si abbia, cioè, un'accelerazione centrifuga non compensata  $a_{nc}$  verso l'esterno non superiore a un valore dato – e, allo stesso tempo contenga, in limiti accettabili, la spinta verso l'interno per i treni lenti.

La sopraelevazione di progetto è, dunque, funzione delle velocità previste, dei raggi della curve, dell'accelerazione centrifuga  $a_{nc}$  e di quella centripeta per ipercompensazione  $a'_{cp}$  ammesse.

Non è però possibile realizzare un sopralzo *ideale* perché:

- non tutti i treni di una linea marciano alla stessa velocità
- non tutti i pezzi che compongono un treno hanno la stessa altezza del baricentro
- è necessaria una certa tolleranza nella posa del binario ( $\pm 5$  mm)
- l'applicazione della (6) porta a sopralzi inammissibili sulle curve strette (300–350 m) perché, se il treno è fermo in curva<sup>1</sup>, si potrebbe rovesciare per spostamento del carico
- si trascurano le azioni giroscopiche delle masse rotanti.

Ciò premesso, la sopraelevazione max ammessa da  $R_f$  è di 160 mm con un margine di 20 mm rispetto al limite di 180 mm per il riavvio di un treno arrestatosi in curva. Per garantire un buon confort di marcia ai pax è necessario limitare il valore dell'accelerazione  $a_{nc}$ ; i valori massimi ammessi variano fra 0,6 (rango<sup>2</sup> velocità A), 0,8 (rango B), 1,0 (rango C) e 1,8 (rango P)  $m/s^2$ . A questi valori–limite corrispondono, per  $\delta=160$  mm, le seguenti velocità max in curva (Tab. 1):

<sup>1</sup> Per un veicolo fermo in curva l'accelerazione centripeta  $a'_{cp}=g\sin\alpha$ , quindi per  $\delta=160$  mm essa risulta pari a  $\approx 9,8 \cdot 160/1500=1,05$   $ms^{-2}$ , superiore al limite ammesso di 0,65  $m/s^2$ .

<sup>2</sup> Il *rango* di una linea ferroviaria identifica una o più categorie di velocità max raggiungibili dalle diverse categorie di treni su un dato tratto di linea. È identificato con un apposito cartello posto a lato del binario. Per sfruttare appieno le caratteristiche del materiale rotabile, sono previsti, sulla stessa tratta, limiti di velocità diversi a seconda del *rango* d'appartenenza del convoglio, la cui attribuzione è fatta in base alle qualità dinamiche del materiale (tipologia dei carrelli e delle sospensioni), nonché all'assetto, eventualmente variabile, e alla disposizione delle masse.

Tab. 1. Ranghi di velocità e velocità max per  $\delta=160$  mm

Rango	$a_{nc}$ [ $m/s^2$ ]	Velocità [km/h]
A	0,6	$4,62 R^{1/2}$
B	0,8	$4,89 R^{1/2}$
C	1,0	$5,15 R^{1/2}$

In Tab. 2 si riportano i valori dei parametri caratteristici di cui si è argomentato in precedenza, che sono stati adottati da Rfi come modello d'esercizio per linee a velocità ordinaria e ad alta velocità (AV).

Tab. 2. Parametri dei modelli d'esercizio di Rfi

Linee a velocità ordinaria				
	$a_{nc}$ [ $m/s^2$ ] <sup>1</sup>	$a_{cp}^*$ [ $m/s^2$ ] <sup>2</sup>	$R_{min}$ [m]	$\delta_{max}$ [mm] <sup>3</sup>
$V_{max}$ 160 km/h	0,60	–	1260	160
$V_{min}$ 80 km/h	–	0,65		
Linee ad alta velocità				
$V_{max}$ 300 km/h	0,60	–	5350	105
$V_{min}$ 80 km/h	–	0,60		
1 Accelerazione centrifuga non compensata verso l'esterno.				
2 Accelerazione centripeta non compensata verso l'interno.				
3 Il $\delta_{max}$ è quello corrispondente al raggio minimo.				

Valori più elevati dell'accelerazione sono tollerati solo nell'esercizio delle linee metropolitane, sulle quali la brevità delle tratte percorse rende accettabili valori di accelerazione centrifuga non compensata più elevati, o su treni composti da materiali rotabile appositamente studiato per alte velocità in curva (treni ad assetto variabile).

Grazie all'assetto variabile di alcuni treni (ETR 450, *Pendolino*) si ha la possibilità di aumentare la velocità in curva rispetto ai veicoli normali poiché l'assetto variabile consente l'inclinazione della cassa di un ulteriore angolo  $\beta$  (oltre ad  $\alpha$ ) verso l'interno della curva (come su un mezzo a due ruote) in modo che il pavimento–cassa formi con l'orizzontale un angolo  $(\alpha+\beta)$ . In questo caso i passeggeri sono sottoposti all'accelerazione non compensata  $a_{nc}^*$  (ponendo = 1 i coseni di  $\alpha$  e  $\beta$ ):

$$\begin{aligned}
 a_{nc}^* &= (v^2/R) - g \sin(\alpha+\beta) = (v^2/R) - g(\sin\alpha\cos\beta + \cos\alpha\sin\beta) \\
 &= (v^2/R) - g \sin\alpha - g \sin\beta = a_{nc} - g \sin\beta
 \end{aligned}
 \quad (8)$$



Ad esempio, per  $\beta=8^\circ$ , pur accettando una  $a_{nc}$  dell'ordine di  $1,8 \text{ m/s}^2$ , la  $a_{nc}^*$  sui pax, dalla (8), è minore di  $0,5 \text{ m/s}^2$ .

A parità di condizioni, con convogli formati da elementi a pendolamento attivo (comandato da sistemi di basculamento assistito elettronicamente) la velocità di percorrenza delle curve potrebbe incrementarsi fino a  $\approx 20\%$ .

La sopraelevazione è ottenuta innalzando progressivamente la rotaia esterna lungo il raccordo altimetrico di transizione di lunghezza  $L$ , con andamento lineare, pertanto la pendenza di rampa ( $i=h/L$ ) è costante.

Poiché lungo le curve di transizione l'accelerazione centrifuga aumenta linearmente, ne risulta che anche l' $a_{nc}$  ha andamento lineare in quanto differenza di due grandezze a variazione lineare e, quindi, la sua variazione (contraccolpo) risulta costante.

### 1.2.3. Lo svio

Condizione necessaria ma non sufficiente perché si passi dalla stabilità allo svio è che si sviluppi una forza laterale qualsiasi. Infatti una forza trasversale  $F_y$  applicata a un asse ferroviario, tende a spingere l'asse medesimo fuori dal binario, provocandone lo *svio* (o deragliamento), v. Fig. 4.

La forza  $F_y$ , detta *forza d'asse*, può essere dovuta a:

- reazioni tangenziali d'attrito nel contatto tra la superficie di rotolamento e il cerchione
- forze laterali di natura qualunque (forza centrifuga, vento, ecc.) applicate all'intero veicolo e trasmesse attraverso le ruote.

Lo svio è più frequente in curva per la presenza della forza centrifuga ma risulta possibile anche in rettilineo per particolari condizioni di vento a causa del gioco rotaie-bordini; è il bordino della ruota esterna che si oppone allo svio, esercitando la forza  $F_y$  sul fianco interno della rotaia (la ruota esterna è quella verso la quale è diretta la forza d'asse  $F_y$ ).

Per la ruota ferroviaria munita di bordino, il valore limite di questa forza trasversale non dipende da fenomeni di aderenza e di elasticità dei due corpi a contatto, bensì dall'accoppiamento di forma *bordino-rotaia*.

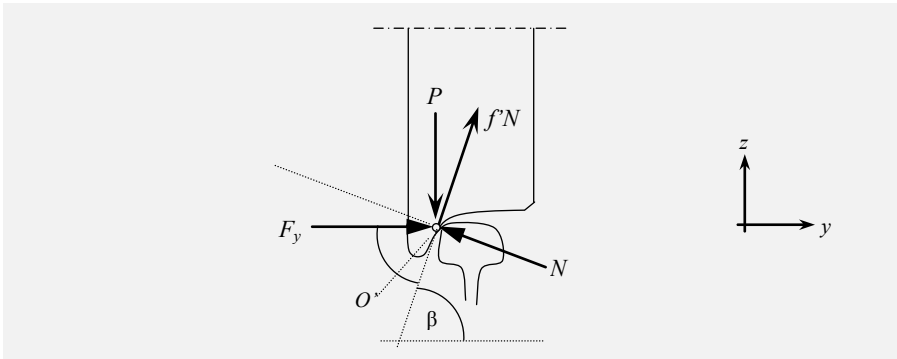


Fig. 4. Forze agenti sulla ruota in condizioni di svio

$\beta$  = angolo formato dal fianco del bordino sull'orizzontale; poiché il fianco non è verticale, è sempre  $\beta < 90^\circ$

$N$  = reazione opposta dal fianco della rotaia diretta secondo la normale al piano del fianco del bordino

$f$  = coefficiente d'attrito cinetico bordino–rotaia

$fN$  = reazione d'attrito

$F_y$  = forza d'asse.

Con riferimento alla figura, il fenomeno può essere brevemente descritto nel seguente modo: se la ruota per qualche motivo inizia a sollevarsi, il contatto con la rotaia avviene solo tramite il bordino che preme sul fianco interno del fungo della rotaia; nel punto di contatto tra la rotaia e la ruota in rotazione si trasmette un sistema di forze costituito dal carico verticale  $P$  e dalla forza trasversale  $F_y$  che danno luogo a una risultante  $N$ . Poiché la ruota continua a rotolare, essendo rigidamente collegata per mezzo dell'asse all'altra ruota, che è ancora completamente appoggiata con il cerchione sul fungo, il bordino sfrega contro il fianco della rotaia e la forza risultante  $N$  produce una reazione d'attrito radente  $fN$  che tende a spingere verso l'alto la ruota e a sollevarla.

Dall'equilibrio del sistema di forze applicate nel punto di contatto  $O'$ , si trova il valore limite del rapporto  $F_y/P$  oltre il quale la ruota sale sul binario e, quindi, dà luogo allo svio del treno.

Affinché la ruota si *arrampichi* sul binario, la risultante delle forze che tendono a farla salire dovrà essere maggiore delle forze che invece

tendono a riportarla verso il basso. Dall'equilibrio lungo la direzione  $f'N$  e in quella ortogonale si deduce la relazione:

$$F_y/P = (\tan\beta - f')/(1 + f'\tan\beta) \quad (9)$$

La (9), nota come formula di Pochet, fornisce il valore max, per un dato peso  $P$  gravante sulla ruota, della forza laterale  $F_y$  oltre il quale potrebbe aversi lo svio, in funzione del coefficiente d'attrito ruota-rotaila e dell'angolo  $\beta$  che dipende dal cerchione (a cerchioni nuovi  $\beta$  varia da 60 a 67 °). L'usura del cerchione modifica il profilo del bordino e fa aumentare  $\beta$  assicurando, quindi, una migliore stabilità al veicolo. Il coefficiente d'attrito  $f'$  può assumere valori di 0,20÷0,30 (rotaie asciutte), ma è più sicuro adottare valori di 0,15 (rotaie umide).

Nella pratica dell'esercizio ferroviario si ritiene che la stabilità allo svio sia assicurata per:

$$F_y \leq P \quad (10)$$

#### 1.2.4. Traslazione laterale della linea – ripage

È importante verificare anche la sicurezza alla traslazione laterale della linea ferroviaria nota come *ripage*.

Il veicolo in curva tende a spostare la linea e, affinché ciò non accada, bisogna limitare le sollecitazioni laterali; tali limiti sono dovuti alla tecnologia della linea e alla massa del veicolo che la percorre.

Il valore limite della resistenza della linea che non deve essere superato viene definito sperimentalmente dalla:

$$F_y = 0,85(1000 + 3,27P) \quad [\text{daN}] \quad (11)$$

$F_y$  = sforzo trasversale massimo esercitato dall'assile, daN

$P$  = carico verticale massimo per assile, N.

Si noti come il vincolo della linea abbia una rilevanza costante, mentre risulta preponderante l'influenza della massa del veicolo. Con  $P=100$  kN l'influenza della linea risulta del 23 %, quella del veicolo del 77 %; queste percentuali aumentano all'aumentare del carico per asse.

### 1.2.5. Moto in curva: curve di transizione

Al fine di evitare la brusca variazione dell'accelerazione trasversale che si genera nel passaggio da moto rettilineo a moto circolare e vv., nella realizzazione dei tracciati ferroviari si utilizzano curve di transizione (parabola cubica su linee ordinarie e ad AV).

Tale curva è dimensionata per cercare di mantenere il più lineare possibile il contraccolpo (variazione dell'accelerazione *n.c.* nell'unità di tempo) facendo anche in modo che la velocità di rotazione del veicolo attorno al suo asse baricentrico cresca uniformemente.

Generalmente, il *range* del contraccolpo accettato sui raccordi parabolici varia fra 0,15 e 0,6 m/s<sup>3</sup>.

Rfi adotta per le linee ordinarie 0,25 m/s<sup>3</sup> per  $a_{nc}=0,6$  m/s<sup>2</sup> come valore normale che può salire a 0,35 m/s<sup>3</sup> per  $a_{nc}=0,8$  m/s<sup>2</sup> (rango B), mentre per linee in rango C ( $a_{nc}=1,0$  m/s<sup>2</sup>) si arriva a 0,40 m/s<sup>3</sup> (eccezionalmente a 0,60); infine, per le linee ad alta velocità il valore max del contraccolpo è di 0,15 m/s<sup>3</sup>.

## 1.3. L'andamento altimetrico

La pendenza di una linea ferroviaria corrisponde alla tangente trigonometrica dell'angolo giacente sul piano verticale fra la tangente all'asse viario e il piano orizzontale; è misurata in millesimi, cioè in per mille [‰].

La pendenza massima teorica di una linea potrebbe essere quella che permette di mantenere ferma una locomotiva frenata (140 ‰), ma tale valore limite non ha significato pratico perché dipende da un coefficiente d'attrito che è fortemente variabile in ragione della natura e dello stato delle superfici a contatto e, inoltre, non permetterebbe il rimorchio di veicoli. I valori pratici sono molto inferiori; nelle linee italiane non si supera il limite del 35 ‰ (il 12 ‰ su linee con velocità di progetto  $\geq 160$  km/h); su ferrovie secondarie si possono raggiungere valori anche del 70 ‰; per pendenze superiori è necessario avvalersi di sistemi di trazione che esulano dall'aderenza naturale.

Al fine di rendere minimi i disagi dovuti alla variazione dell'accelerazione verticale di gravità in coincidenza del cambiamento di pen-

denza (concorde o discorde), le livellette consecutive a pendenza diversa sono raccordate con archi di circonferenza.

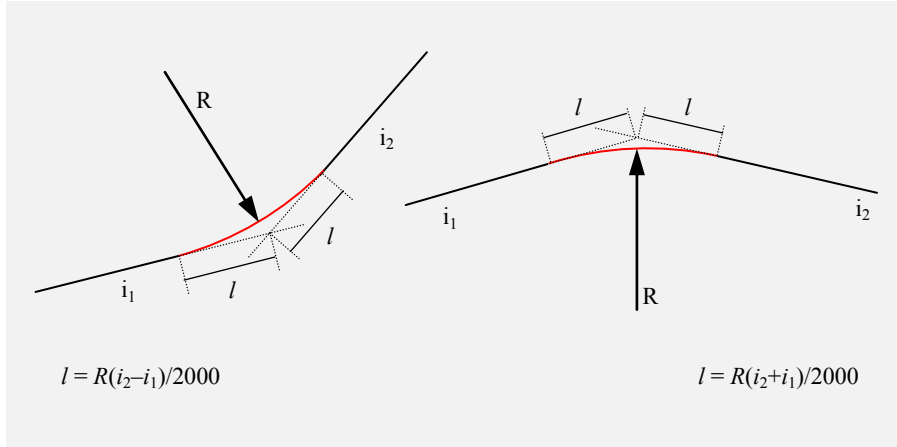


Fig. 5. Raccordi verticali fra livellette di pendenza concorde e discorde

Il valore del raggio dei raccordi circolari dipende dall'accelerazione verticale  $a_v$  che s'intende raggiungere per le relative velocità d'esercizio della linea. La misura del raggio del raccordo si ottiene imponendo un limite alla variazione dell'accelerazione verticale  $a_v$  (in % dell'accelerazione gravitazionale) che si genera per effetto dell'accelerazione centrifuga che nasce percorrendo i raccordi. In Italia il valore usualmente adottato per l'accelerazione verticale è di  $0,4 \text{ m/s}^2$ .

Per il raggio del raccordo si adotta l'espressione:

$$R = V^2/12,96a_v \quad [\text{m}] \quad (12)$$

R = raggio raccordo circolare, m

V = velocità di tracciato, km/h

$a_v$  = accelerazione verticale,  $<0,5 \text{ m/s}^2$ .

Comunque, per linee ordinarie il raggio minimo è di 3000 m e per quelle ad AV è di 25.000 m. È ovvio che imponendo il valore limite di  $a_v$  si può ricavare il corrispondente valore del raggio del raccordo.

## **Bibliografia**

BONORA G., FOCACCI C., “Funzionalità e progettazione degli impianti ferroviari”, Cifi, Roma, 2002.

POLICICCHIO F., “Lineamenti di infrastrutture ferroviarie”, Firenze University Press, 2007.

RICCI S., “Dispense del Corso di Trasporti ferroviari”, Università La Sapienza, Roma, 2008.

## **Siti web**

[www.cifi.it](http://www.cifi.it)

[www.ferroviedellostato.it/](http://www.ferroviedellostato.it/)

[www.rfi.it](http://www.rfi.it)

[www.uic.asso.fr](http://www.uic.asso.fr)