



Classificazione Decimale Dewey:

385 (23.) TRASPORTI FERROVIARI

MARIO OLIVARI
ALESSANDRO OLIVO

TEORIA TECNICA ED ECONOMIA DEI TRASPORTI FERROVIARI





©

ISBN
979-12-218-2079-9

PRIMA EDIZIONE
ROMA 16 LUGLIO 2025

Indice

- 7 **Capitolo I**
Il tracciato della linea ferroviaria
1.1. Gli elementi base, 7 – 1.2. Il tracciato planimetrico, 9 – 1.3. L'andamento altimetrico, 18 – Bibliografia, 20.
- 21 **Capitolo II**
La sovrastruttura e il corpo stradale
2.1. La sovrastruttura, 21 – Bibliografia, 38.
- 39 **Capitolo III**
La manutenzione della sovrastruttura
3.1. Criteri e metodi di manutenzione, 39 – 3.2. Vincoli alla circolazione dei treni, 45 – 3.3. Conclusioni, 49 – Bibliografia, 50.
- 51 **Capitolo IV**
Prestazioni di trazione
4.1. Resistenze al moto, 51 – 4.2. Sistemi di trazione, 58 – 4.3. Sistemi di frenatura, 59 – 4.4. Prestazioni di trazione, 64 – 4.5. Capacità di frenatura, 66 – Bibliografia, 70.
- 71 **Capitolo V**
Orario e composizione dei treni
5.1. Impostazione della velocità del treno, 71 – 5.2. Composizione di un treno, 74 – 5.3. Costruzione degli orari, 76 – 5.4. Informazioni per la condotta del treno, 84 – Bibliografia, 86.
- 87 **Capitolo VI**
Manutenzione e sicurezza
6.1. Rumore e vibrazioni, 87 – 6.2. Affidabilità, disponibilità, manutenibilità, 90 – 6.3. Sicurezza e regolamentazione dell'esercizio, 92 – Bibliografia, 96.

- 97 **Capitolo VII**
 Il sistema ferroviario
 7.1. Il sistema di trasporto ferroviario, 97 – Bibliografia, 107.
- 109 **Capitolo VIII**
 L'esercizio ferroviario
 8.1. Circolazione dei treni in linea, 109 – 8.2. Distanziamento, 110 – 8.3. Sistemi di distanziamento o di blocco, 116 – 8.4. Il sistema di controllo della marcia del treno (SCMT), 137 – Bibliografia, 140.
- 141 **Capitolo IX**
 La potenzialità delle linee
 9.1. Potenzialità nel distanziamento con segnali fissi, 141 – 9.2. Metodo statico per il calcolo della potenzialità, 142 – Bibliografia, 147.
- 149 **Capitolo X**
 Le stazioni
 10.1. Le stazioni ferroviarie, 149 – 10.2. Movimenti dei treni in stazione, 156 – 10.3. Sistemi centralizzati di regolazione della circolazione, 160 – 10.4. Stazioni di smistamento, 161 – 10.5. Dimensionamento impianti di stazione di smistamento, 166 – Il ciclo del carro, 171 – Bibliografia, 173.
- 175 **Capitolo XI**
 Economia dei trasporti ferroviari
 11.1. I costi, 175 – 11.2. Il prezzo del trasporto, 177 – 11.3. La tariffazione, 182 – 11.4. Metodi di calcolo del prezzo totale del trasporto al variare del tipo di tariffazione, 188 – 11.5. Tariffe merci, 192 – Bibliografia, 195.
- 197 **Capitolo XII**
 I treni a idrogeno
 12.1. Il treno a H₂, 197 – 12.2. Specifiche del treno, 198 – 12.3. I pro, 200 – 12.4. I contro, 201 – 12.5. Conclusioni, 202 – Bibliografia, 204.
- 205 **Capitolo XIII**
 I treni a levitazione magnetica
 13.1. Il sistema Maglev, 205 – 13.2. Tecnologie di levitazione, 209 – 13.3. Maglev vs treni AV, 210 – 13.4. I Maglev in esercizio, 212 – 13.5. Il sistema Hyperloop, 213 – 13.6. Considerazioni finali, 216 – Bibliografia, 218.

Il tracciato della linea

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 (segmenti 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 singolari che segnano l'inizio e la fine dei tratti in *rettifilo*, 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 (*pdf*) tangente alle rotaie superiormente 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 complessivi. 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.

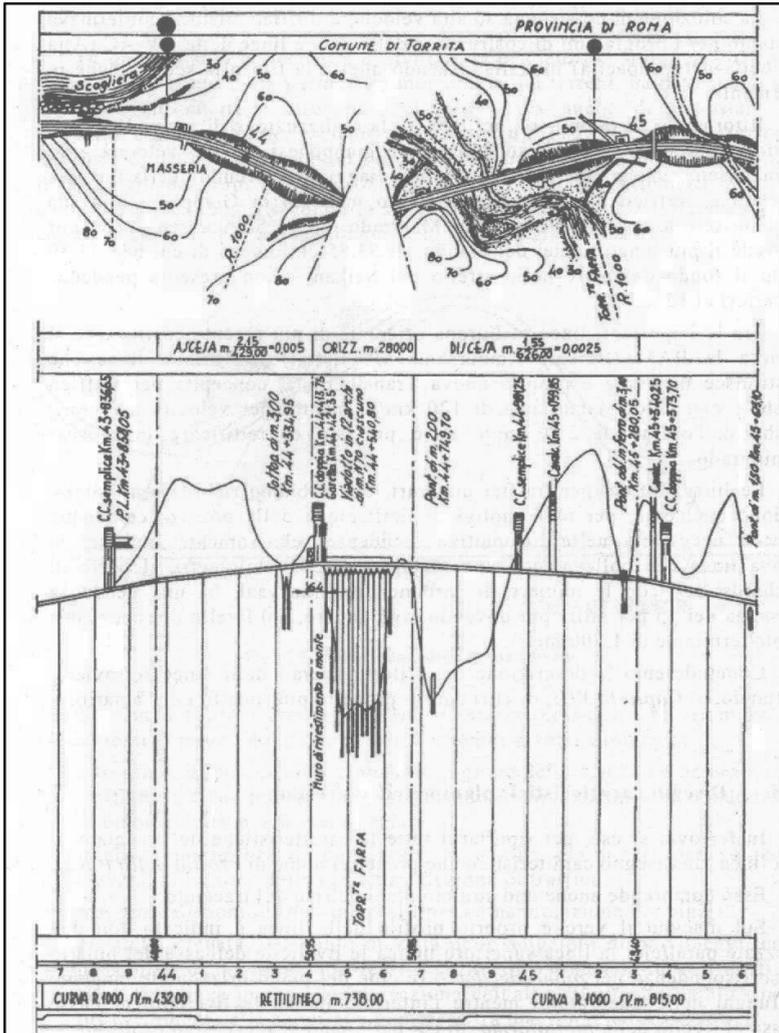


Figura 1. Planimetria–profilo longitudinale di una linea ferroviaria, Vicuna.

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 delle stesse nel tempo.

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 ∞)
- *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 (varia 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 pla-

nimetrico 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.

$$F_c = Ma_c = Mv^2/R = (P/g)v^2/R \quad [N] \quad (1)$$

M = massa del mezzo, kg

a_c = accelerazione centrifuga originata dalla traiettoria curva, ms^{-2}

v = velocità istantanea tangenziale di marcia, ms^{-1}

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

$P = Mg$, forza peso del mezzo, N

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

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

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

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 o di svio del mezzo 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 (asse c/ruote), cioè se il momento ribaltante è equilibrato da quello stabilizzante. Vale la:

$$F_c \underline{h} \leq P \underline{s}/2 \quad (3)$$

$$(P/g) \underline{h} v^2 / R \leq P \underline{s}/2 \rightarrow v^2 / R \leq g \underline{s}/2 \underline{h} \quad (3')$$

\underline{s} = scartamento binario, m

\underline{h} = altezza baricentro, m

da cui la velocità max in curva al limite del ribaltamento:

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

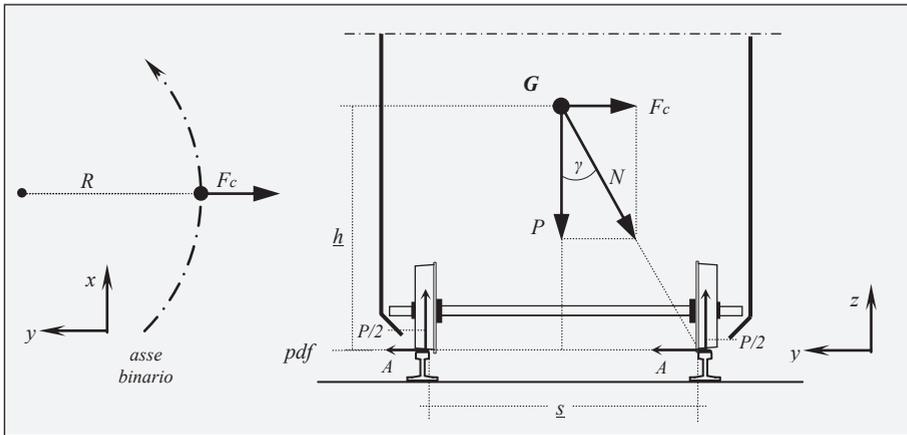


Figura 2. Equilibrio–limite del veicolo in curva in piano, AA.

Si noti 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 derivante dall’aumento di velocità; con il sopralzo H si uguagliano le reazioni orizzontali sulle rotaie annullando lo slittamento laterale, Fig. 3.

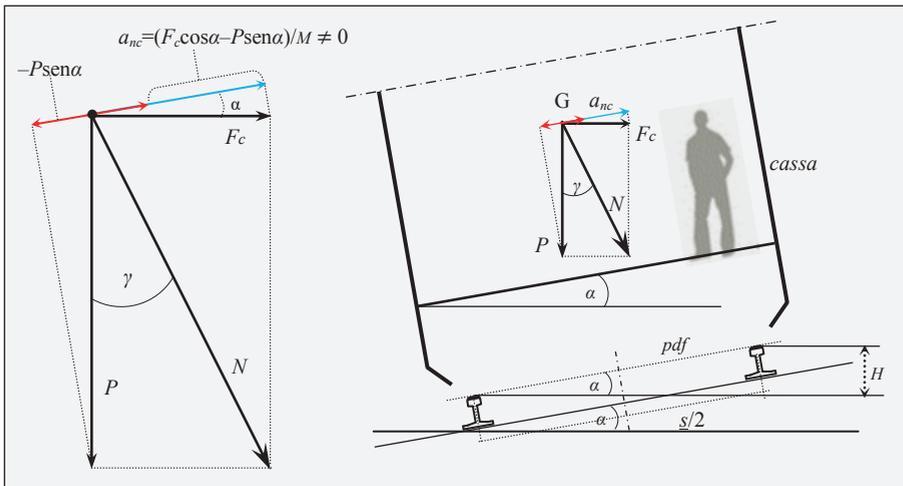


Figura 3. Sopralzo rotaia in curva: bilanciamento parziale, AA.

Si può progettare la pendenza trasversale α del piano del ferro (*pdf*) onde compensare totalmente la forza centrifuga F_c : perché si abbia il

totale bilanciamento della forza 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:

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

$$P \sin \alpha = F_c \cos \alpha = \cos \alpha (P/g) v^2 / R$$

da cui:

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

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

$$\sin \alpha = H / \underline{s} \rightarrow \tan \alpha = H / \underline{s} \quad (5')$$

H = sopralzo rotaia esterna, m

\underline{s} = distanza assi rotaie a scartamento standard, $1,5 m$

da (5) e (5'):

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

se H [mm], V [km/h], R [m]:

$$H \approx 11,8 V^2 / R \quad [mm] \quad (6')$$

Viceversa, assegnato il sopralzo (H) potrà determinarsi la velocità con cui il mezzo percorre la curva con neutralizzazione completa delle azioni centrifughe; dalla (6):

$$v = (gRH / \underline{s})^{1/2} \quad [m/s] \quad (7)$$

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 de-

ve 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 ($\pm 5 \text{ mm}$)
- l'applicazione della (6) porta a sopralzi inammissibili sulle curve strette (300–350 *m*) perché, se il treno è fermo in curva⁽¹⁾, si potrebbe rovesciare per spostamento del carico
- si trascurano le azioni giroscopiche della masse rotanti.

Ciò premesso, la sopraelevazione max ammessa da Rfi è $H=160 \text{ mm}$ 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 dalle norme Rfi in m/s^2 , variano fra 0,6 per rango⁽²⁾ di velocità A, 0,8 per rango B, 1,0 per rango C e 1,8 per rango P.

A questi valori–limite corrispondono, per $H=160 \text{ mm}$, le velocità max in curva espote in Tab. 1.

(1) Per un veicolo fermo in curva l'accelerazione centripeta $a'_{cp}=g\text{sen}\alpha$, quindi per $H=160 \text{ mm}$ essa risulta pari a $\approx 9,81 \cdot 160/1500=1,05 \text{ ms}^{-2}$, superiore al limite ammesso di $0,65 \text{ m/s}^2$.

(2) Il *rango* di una linea identifica una o più categorie di velocità max raggiungibili dalle diverse categorie di treni su una data tratta; è identificato con un apposito cartello posto a lato del binario. Per sfruttare appieno le caratteristiche dei rotabili 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.

Tabella 1. Ranghi di velocità e velocità max per $H=160$ mm, Rfi

Rango	a_{nc} [m/s^2]	Velocità max [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 adottati da Rfi come modello d'esercizio per linee a velocità ordinaria e alta velocità (AV).

Tabella 2. Parametri dei modelli d'esercizio, Rfi

Linee a velocità ordinaria				
velocità	a_{nc} [m/s^2] ¹	a'_{cp} [m/s^2] ²	R_{min} [m]	H_{max} [mm] ³
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 sopralzo H_{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 materiale 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 β (oltre ad α) verso l'interno della curva (come un motociclo) 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 α e β):

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

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

A parità di condizioni, con convogli formati da elementi a pendolamento attivo comandato da sistemi di basculamento elettronico, 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 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: e infatti una forza trasversale F_y applicata a un asse ferroviario, tende a spingere l'asse medesimo fuori dal binario provocandone il deragliamento o svio, come illustrato in 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⁽³⁾ che si oppone allo svio, esercitando la forza F_y sulla fiancata interna della rotaia.

Per la ruota ferroviaria con 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*.

Con riferimento alla Fig. 4, il fenomeno del deragliamento può essere brevemente descritto nel modo che segue.

(3) La ruota esterna è quella verso la quale è diretta la forza d'asse F_y .

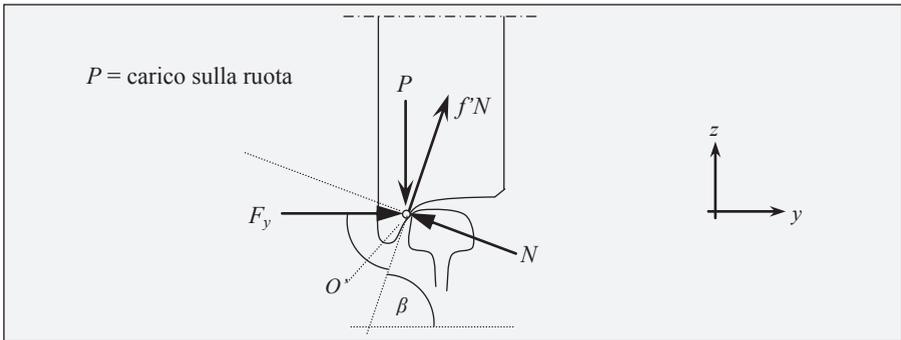


Figura 4. Forze agenti sulla ruota esterna in condizioni di svio, AA.

β = 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 radente cinetico bordino-rotaia

$f'N$ = reazione d'attrito

F_y = forza d'asse.

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 $f'N$ 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 mezzo.

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 formula di Pochet-Nadal:

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

La (9) 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-rotaia f' e dell'angolo β che dipende dal cerchione (a cerchioni nuovi $\beta=60-67^\circ$). L'usura del cerchione modifica il profilo del bordino e fa aumentare β assicurando, quindi, una migliore stabilità al veicolo.

Un coefficiente f' pari a $\approx 0,30$ (rotaie asciutte), è più sicuro per lo svio ($f'=0,3:\beta=60^\circ \rightarrow F_y=0,95P$; $f'=0,1:\beta=60^\circ \rightarrow F_y=1,39P$), ma si dovrebbe adottare $f'\approx 0,15$ (rotaie umide) per garantire l'aderenza sul bagnato. Nella pratica dell'esercizio si ritiene che la stabilità allo svio sia assicurata se:

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

1.2.4. *Traslazione laterale della linea (ripage)*

È importante verificare anche la sicurezza alla traslazione laterale della linea ferroviaria (*ripage*): ciò in quanto 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:

$$F_y = 0,85(1000+3,27P) \quad [N] \quad (11)$$

F_y = sforzo trasversale max esercitato dall'assile, N

$P = Mg$ = carico verticale massimo per assile, kN .

Si noti come il vincolo della linea abbia una rilevanza costante, mentre risulta preponderante l'influenza della massa del veicolo.

Per $P=100 \text{ kN}$ l'influenza della linea è del 23%, quella del veicolo del 77%; tali 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 circolare e v.v., nella realiz-

zazione 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 a_{nc} 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^3 .

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

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 della linea 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 per i passeggeri dovuti alla variazione dell'accelerazione verticale di gravità in coincidenza del cambiamento di pendenza (concorde o discorde), le livellette consecutive a pendenza diversa sono appropriatamente raccordate con archi di circonferenza.

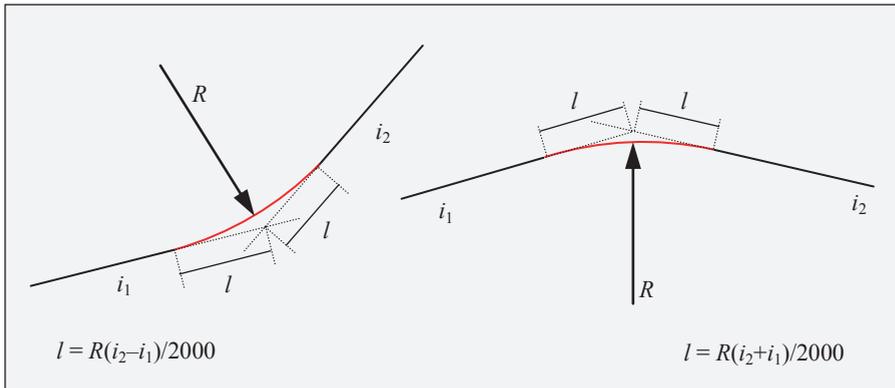


Figura 5. Raccordi verticali fra livellette di pendenza concorde e discorde, AA.

1.3.1. I raggi dei raccordi verticali

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 (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:

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

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 AV è di $25\,000 \text{ m}$. 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.
- BRUNER M., CORAZZA G.R., COSCIOTTI E., “Lo svio, cento e più anni di ricerche su un problema complesso, gli inizi e la scuola francese”, *Ingegneria Ferroviaria*, n. 12, 2009.
- CORINI F., “Costruzione ed esercizio delle ferrovie”, Utet, Torino, 1950.
- DE GREGORIO C., “Meccanica della locomozione terrestre, marittima e aerea”, Denaro, Palermo, 1960.
- DE LUCA M., “Tecnica ed economia dei trasporti”, Cuen, Napoli, 1989.
- GUERRIERI M., “Infrastrutture ferroviarie, metropolitane, tranviarie e per ferrovie speciali. Elementi di pianificazione e di progettazione”, Maggioli, 2017.
- MARIÉ G., “Etude complémentaire sur la stabilité du matériel des chemins de fer. Theorie des deraillements et profil de bandages”, *Memoirs de la Société des Ingenieurs Civils*, Nov. 1910.
- MARQUIS B., GREIF R., “Application of Nadal limit in the prediction of wheel climb derailment”, *Proc. of the ASME/ASCE/IEEE Joint Rail Conference*, pp. 1-8, Pueblo, CO-US, 2011.
- MAYER L., “Impianti ferroviari, tecnica ed esercizio”, II Ed., Cifi, Roma, 1986.
- NADAL M.J., “Theorie de la stabilité des locomotives, Part II: mouvement de lacet”, *Annales des Mines*, 10, 232, 1896.
- OLIVARI M., OLIVO A., “Tecnica ed economia dei trasporti ferroviari”, Aracne, Roma, 2012.
- ORLANDI A., “Meccanica dei trasporti”, Pitagora, 1990.
- PANAGIN R., “Dinamica del veicolo ferroviario”, Levrotto & Bella, Torino, 2018.
- POCHET L., “Theorie du mouvement en courbe sur les chemins de fer avec ses applications à la voie et au matériel. Nouvelle méthode ayant pour but d’assurer en courbe le roulement parfait des essieux”, Dunod, Paris, 1882.
- POLICICCHIO F., “Lineamenti di infrastrutture ferroviarie”, Firenze University Press, 2007.
- RICCI S., “Dispense del Corso di Trasporti ferroviari”, Università La Sapienza, Roma, 2008.
- RICCI S., “Ingegneria dei sistemi ferroviari - Tecnologie, metodi e applicazioni”, Egaf, 2013.
- STAGNI E., “Meccanica della locomozione”, Pàtron, Bologna, 1968.
- VICUNA G., “Organizzazione e tecnica ferroviaria”, Cifi, Roma, 1993.

Sitologia

cifi.it
ferroviedellostato.it/
livre-rare-book.com
rfi.it
uic.asso.fr