

Corso di Infrastrutture Ferroviarie e Nodi Intermodali

Dispensa didattica

Le scelte *plano-altimetriche* del tracciato ferroviario: sicurezza e qualità d'esercizio

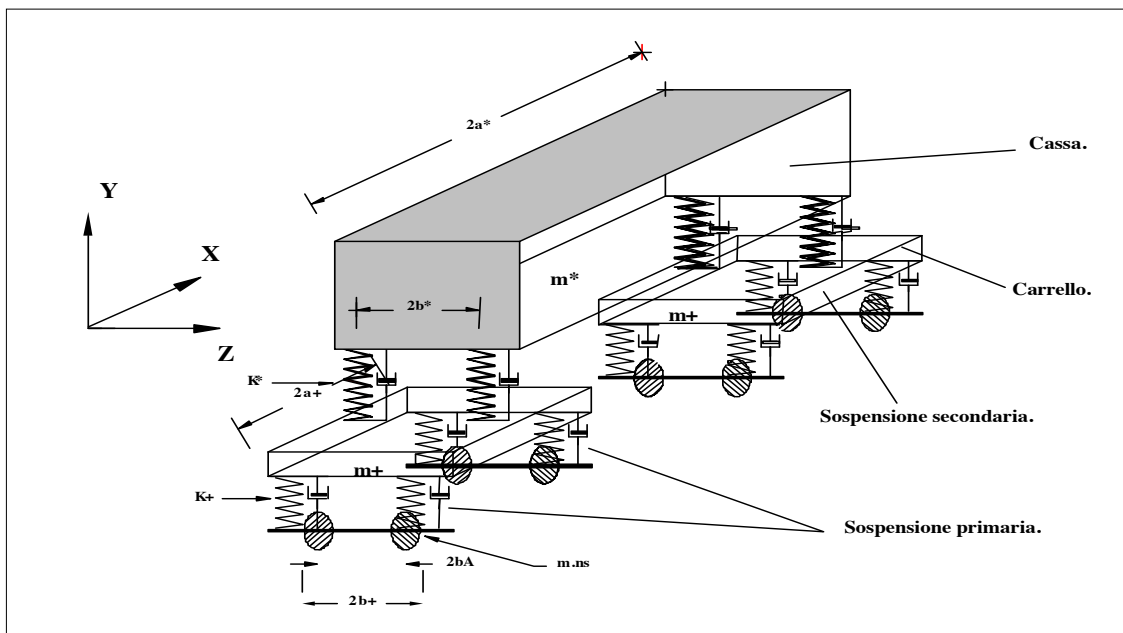
1. L'andamento planimetrico e l'analisi delle variabili

Gli elementi geometrici principali che caratterizzano il **tracciato di una linea ferroviaria** sono:

- il raggio minimo delle curve;
- la pendenza longitudinale massima.

Questi sono definiti nella fase di progetto e sono funzione della velocità massima mantenibile sui tratti di linea in esame e delle modalità di circolazione sulla stessa tratta.

La dinamica di marcia dei veicoli e, dunque, la qualità e la sicurezza d'esercizio (compreso il "comfort" per il trasporto passeggeri) dipenderà dalle particolari scelte *plano-altimetriche* del tracciato, dalla *correlazione* degli *elementi geometrici* (raggi verticali ed orizzontali, livellette, caratteristiche dei raccordi, sopraelevazione in curva, etc.), nonché dalle peculiarità della sede e dell'armamento ferroviario, degli apparati tecnologici, della linea area di contatto con il pantografo (per le tratte elettrificate), e, più in generale, dalle interazioni *veicolo-infrastruttura*.



Modello di analisi delle variabili caratteristiche della dinamica di marcia

In particolare, per gli investimenti riguardanti la mobilità su rotaia, grande importanza assume la definizione di variabili rappresentative del *comfort globale percepito*, al fine di una corretta comparazione dello scenario “*a progetto realizzato*” rispetto a quello originario (*ante-operam*). A tal scopo, sotto il profilo matematico, il *comfort* può considerarsi una grandezza soggettiva del “*sistema uomo*”, di tipo *logico* e va anche correlato anche al costo C_s sopportato dall’utente lungo gli “*n*” *archi* della rete complessivamente percorsi per compiere lo spostamento desiderato¹ supposto effettuato interamente con il medesimo vettore, dove:

$$C_s = \sum_1^n \left[\sum_1^m (c_s^h)_i^{-w_h} \right]^{-w_i},$$

con

$$\begin{cases} c_s^h = \text{costo per la generica variabile } h \text{ sopportato per l'iesimo arco percorso} \\ w_h = \text{peso attribuito dall'utente alla variabile } h \text{ per il comfort globale} \\ w_i = \text{peso relativo alla qualità del viaggio per l'iesimo ramo del tragitto} \end{cases}$$

e risultando $\sum w_{h,i} = 1$.

Il problema può essere matematicamente affrontato in termini *booleani* attribuendo alle diverse relazioni del trinomio “*uomo-veicolo-via*”² che si realizzano durante il tragitto il valore 1 o 0 (cioè, lo stato di *comfort* esiste, ovvero non esiste). Poiché uno stato *privo di malessere* è determinato da quelle grandezze caratterizzanti detto trinomio che presentano valori ricadenti nel *dominio di tolleranza biologica* dell’utente, ne consegue che lo stato di *assenza di malessere* (individuato dalla non esplicitazione, durante il viaggio, di azioni volontarie di protezione da parte del soggetto interessato) integra uno *stato di comfort* solo se l’utente percepisce anche benessere durante il tragitto. Seguendo tale impostazione, si può quindi definire un’opportuna variabile $\Omega = F(a_u)$ che tenga conto

¹ Al crescere di C_s più elevato sarà il valore del grado di *comfort atteso* da parte dell’utente.

² Le condizioni peculiari del mezzo (tecnologia, sospensioni, stato di efficienza, etc.) e quelle del tracciato (andamento piano-altimetrico, indice di tortuosità, manutenzione, etc.), unitamente alle condizioni fisiche e psiche con cui l’utente affronta il viaggio, sono fattori rilevanti per definire lo *stato di comfort*. Particolare influenza esercitano pure la velocità di marcia e gli effetti delle vibrazioni sul corpo umano, esprimibili in funzione del livello delle accelerazioni e della relativa frequenza (in direzione laterale l’intervallo critico è compreso tra 0.2 e 2 Hz, cd “*motion sickness*”, mentre in direzione verticale risulta fra 0.2-10 Hz, con maggior rilevanza per le frequenze sopra i 4 Hz).

delle azioni a_u di adattamento e modifica comportamentale dell'utente, a seguito delle sue interazioni con il particolare *insieme* definito dalla relazione:

$$S = \varphi(v, t, a) \cdot \varepsilon \quad (1)$$

formato dagli elementi caratterizzanti la relazione “*veicolo-tracciato-ambiente*”, anche in relazione alle specifiche condizioni climatiche di contesto, definite nella (1) dal fattore ε .

Nel seguito verranno forniti alcuni elementi essenziali per la progettazione dei tracciati.

Andamento planimetrico

In funzione della tipologia di linea ferroviaria in studio è possibile operativamente riferirsi ai seguenti valori indicativi dei **raggi minimi** da adottare in curva:

– ferrovia ordinaria (min. assoluto)	500 m	(150 m)
– ferrovia alta velocità 250 km/h (Direttiss. Firenze–Roma)	3.000 m	
– alta velocità ≥ 300 km/h (min. assoluto)	10.000 m	(5.450 m)
– ferrovie di montagna a scartam. ridotto (min. assoluto)	100 m	(50 m)
– metropolitana (min. assoluto)	250 m	(150 m)
– metrotranvia (min. assoluto)	50 m	(25 m)
– tranvia (minimo assoluto)	25 m	(18 m)

Alla luce di quanto sopra riportato, è lecito domandarsi se sia corretto progettare una nuova ferrovia utilizzando normalmente raggi pari o prossimi al valore minimo di 150 m. La risposta è assolutamente negativa, in quanto raggi così piccoli devono essere adottati solo se servono a risolvere problemi estremi di fattibilità.

Difatti, l'adozione di curve di piccolo raggio genera i seguenti problemi di esercizio, sicurezza e confort di viaggio:

- riduzione della velocità:
 - con $R = 150 \text{ m} \rightarrow V = 50\text{--}60 \text{ km/h}$;
 - con $R = 350 \text{ m} \rightarrow V = 80\text{--}90 \text{ km/h}$;
 - con $R = 500 \text{ m} \rightarrow V = 100\text{--}105 \text{ km/h}$
 (pur con elevate sopraelevazioni del binario in curva);
- incremento del rumore (soprattutto per stridii e vibrazioni);

- accentuato consumo degli organi di rotolamento, quali rotaie e ruote, con conseguenti maggiori oneri di manutenzione.

Per attenuare i problemi dovuti alle curve di piccolo raggio, è possibile adottare alcuni provvedimenti:

- lubrificare le superfici di rotolamento, mediante applicazione di modificatore d'attrito;
- porre in opera adeguate barriere antirumore;
- adottare armamenti antivibranti;
- ricorrere a soluzioni tecniche o materiali sofisticati per i rodiggi dei rotabili (ruote, cerchioni, assi, boccole, cuscinetti), utili a contenere rumore e vibrazioni e a prolungare la vita utile degli elementi interessati (ad es. acciai ad alta resistenza, cuscinetti intelligenti dotati di sensori, ruote elastiche, ruote rinforzate mediante pallinatura, etc.)

Un ruolo fondamentale per la stabilità dei veicoli ferroviari e per l'usura dei materiali a contatto ruota-rotaia è svolto dalla **forza centrifuga (a_c)**; questa, difatti:

- agendo sul veicolo, ne facilita lo svio per sormonto della rotaia esterna da parte del bordino;
- trasmessa al binario, lo sollecita trasversalmente alterando la capacità di ancoraggio della massicciata e, pertanto, la geometria del binario;
- agendo sulla rotaia esterna, causa il consumo del fianco del fungo e provoca sollecitazioni a trazione sulle sue caviglie interne;
- agendo sui passeggeri, ne limita il comfort di viaggio.

Le FS impongono un tetto alla forza centrifuga fissando un **limite alla relativa accelerazione** in funzione della tipologia di veicolo ferroviario.

Porre un tetto ad a_c equivale a limitare la velocità condizionando l'esercizio:

$$V = 3,6 \cdot \sqrt{a_{nc} \cdot R} \quad (\text{km/h})$$

ovvero ad aumentare il raggio irrigidendo il tracciato.

Per sfuggire ad una simile situazione occorre conferire al binario un assetto normale alla risultante della forza centrifuga e del peso, introducendo sul binario stesso una **sopraelevazione h** della rotaia esterna rispetto a quella interna (ved. Fig. 1), pari a:

$$h = 11,8 \cdot V^2/R$$

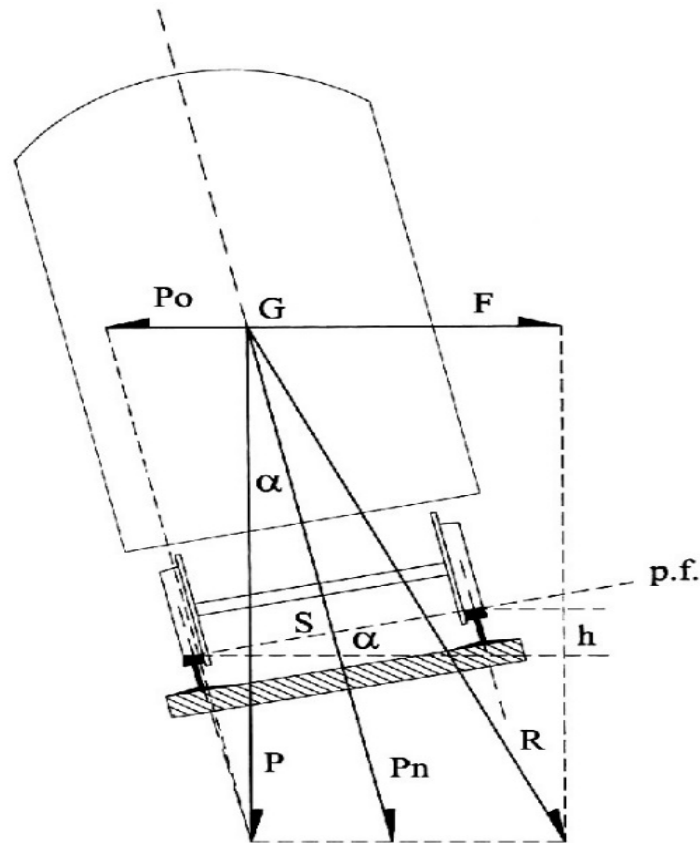


Figura 1: Forze in gioco e sopraelevazione per l'equilibrio in curva di un veicolo ferroviario

Se si accetta che continui ad agire sul veicolo una **componente orizzontale a_{nc} non compensata**, si ottiene:

$$\frac{P}{g} \cdot \frac{V^2}{R} = \frac{P}{g} \cdot a_{nc} + \frac{P}{S} \cdot \frac{h}{S}$$

da cui:

$$h = 11,8 \cdot \frac{V^2}{R} - \frac{S}{g} \cdot a_{nc}$$

$$j = \frac{S}{g} \cdot a_{nc} \quad h = 11,8 \cdot \frac{V^2}{R} - j$$

Ad a_{nc} viene comunemente attribuito il nome di **accelerazione centrifuga non compensata**, mentre a j quello di **difetto di sopraelevazione**.

Difetti di sopraelevazione in funzione dell'acc. centrifuga non compensata

a_{nc} (m/s ²)	j (mm)	a_{nc} (m/s ²)	j (mm)
0,4	61	1	153
0,6	92	1,8	275
0,8	122		

L'equazione che li correla prende in esame un solo valore di velocità, mentre i regimi di circolazione prevedono sempre un intervallo di velocità di esercizio, caratterizzato dalla **velocità massima Vmax** dei treni veloci e dalla **velocità minima Vmin** dei treni lenti.

Per la circolazione a **Vmax** la componente parallela al piano del ferro della forza centrifuga prevale sulla componente del peso in pari direzione, di contro per la circolazione a **Vmin** si verifica l'esatto contrario.

In quest'ultimo caso sul veicolo agisce una forza risultante diretta verso il centro della curva planimetrica.

$$\frac{P}{g} \cdot a'_c = \frac{P}{g} \cdot \frac{h}{S} - \frac{P}{g} \cdot \frac{V_{\min}^2}{R}$$

$$h = 11.8 \cdot \frac{V_{\min}^2}{R} + e$$

In definitiva, è possibile scrivere:

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{R}{11.8} e + j} + V_{\min}^2 \quad [\text{km/h}]$$

$$R = 11.8 \cdot \frac{V_{\max}^2 - V_{\min}^2}{e + j} \quad [\text{m}]$$

$$h = e + j \cdot \frac{V_{\max}^2}{V_{\max}^2 - V_{\min}^2} - j \quad [\text{mm}]$$

Fissando, quindi, il modello di esercizio nelle sue caratteristiche di circolazione - **V_{max}** e **V_{min}** - e in quelle dinamiche - **j** ed **e** - il raggio della curva e la sopraelevazione del binario sono univocamente determinati.

2. Il modello di esercizio

La velocità **V_{max}** incide sui costi:

- di costruzione, condizionando le caratteristiche geometriche del tracciato, le sezioni della linea e la qualità delle opere in terra e della sovrastruttura;
- di esercizio, condizionando i consumi di energia;
- di manutenzione, condizionando le azioni sul binario e le tolleranze.

La velocità **V_{min}** incide sui costi

- di costruzione, in quanto la sua diversità da V_{max} irrigidisce il tracciato;
- di esercizio, condizionando i consumi di energia;
- di manutenzione, condizionando le azioni sul binario.

La accelerazione **a_{nc}** e il difetto di sopraelevazione **j** incidono:

- sul comfort della circolazione veloce;
- sui costi di costruzione, condizionando il raggio minimo delle curve;
- sui costi di manutenzione, a causa delle azioni sulla rotaia esterna delle curve che procurano modifiche alle caratteristiche geometriche del binario e consumo del bordo interno di quella rotaia.

La accelerazione **a'_c** e l'eccesso di sopraelevazione **e** incidono:

- sui costi di manutenzione, a causa delle azioni sulla rotaia interna delle curve, che procurano modifiche alle caratteristiche geometriche del binario e consumo del suo bordo interno.

La sopraelevazione del binario (rotaia esterna) massima per lo scartamento ordinario in Italia è pari a 160 mm.

La velocità in curva è determinabile come segue:

$$a_{nc} = \frac{V^2}{12,96 * R} - \frac{h}{153}$$

ovvero:

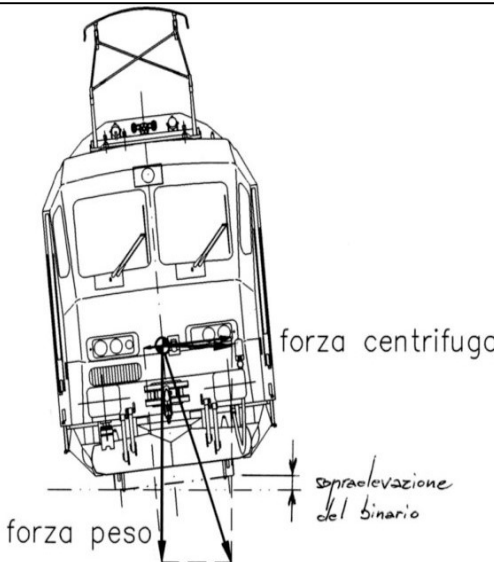
$$V = 3,6 \sqrt{\left(a_{nc} + \frac{h}{153}\right) R}$$

con:

V velocità, in km/h

R raggio di curva, in m

h sopraelevazione del binario, in mm



The diagram shows a train from a top-down perspective in a curve. A vertical arrow pointing down from the center of the train is labeled 'forza peso' (weight force). A horizontal arrow pointing outwards from the center of the train is labeled 'forza centrifuga' (centrifugal force). On the right side of the track, a vertical arrow pointing upwards from the outer rail to a dashed horizontal line is labeled 'sopraelevazione del binario' (track superelevation).

Nella rete tradizionale FS, alla sopraelevazione si attribuisce il **valore massimo di 160 mm** ponendosi con un congruo margine di sicurezza rispetto al valore di 180 mm considerato limite massimo per il riavvio del treno fermatosi accidentalmente in curva.

A tale valore corrisponde un **modello di esercizio** caratterizzato dai seguenti parametri:

$$V_{max} = 160 \text{ km/h} \qquad a_{nc} = 0,60 \text{ m/s}^2$$

$$V_{min} = 80 \text{ km/h} \qquad a'c = 0,65 \text{ m/s}^2$$

certamente inadeguati alle esigenze di una circolazione moderna, anche attribuendo ad a_{nc} valori maggiori pari a $0,8 \text{ m/s}^2$ o di 1 m/s^2 .

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

Rango	$a_{nc} [\text{m/s}^2]$	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 argo- mentato 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				
	$a_{nc} \text{ [m/s}^2\text{]}^1$	$a'_{cp} \text{ [m/s}^2\text{]}^2$	$R_{min} \text{ [m]}$	$\delta_{max} \text{ [mm]}^3$
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 δ_{max} è quello corrispondente al raggio minimo.			

Ad esempio, sulla **DD Roma – Firenze** il modello di esercizio individuato consta dei parametri cinematici e dinamici di seguito riportati:

$$\begin{array}{lll}
 V_{max} = 250 \text{ km/h} & a_{nc} = 0.80 \text{ m/s}^2 & R_{min} = 3.000 \text{ m} \\
 V_{min} = 80 \text{ km/h} & a'_{c} = 0.65 \text{ m/s}^2 & h_{max} = 125 \text{ mm}
 \end{array}$$

Sulla rete **A.V. italiana**:

$$\begin{array}{lll}
 V_{max} = 300 \text{ km/h} & a_{nc} = 0.60 \text{ m/s}^2 & R_{min} = 5.361 \text{ m} \\
 V_{min} = 80 \text{ km/h} & a'_{c} = 0.65 \text{ m/s}^2 & h_{max} = 106 \text{ mm}
 \end{array}$$

In un tratto di linea, percorso per esigenze di esercizio a velocità costante, coesistono curve di raggio diverso.

Tra queste, esiste una curva più stretta il cui raggio R_{min} permette di rispettare i parametri prescelti del modello di esercizio, alla quale si attribuirà il corrispondente valore massimo della sopraelevazione h_{max} , ed esistono curve di raggio maggiore dotate di sopraelevazioni inferiori.

Volendo calcolare la sopraelevazione corrispondente a curve di raggio diverso dal minimo è possibile seguire due metodi.

1. Utilizzare la:

$$h = 11.8 \cdot \frac{V^2}{R} - \frac{S}{g} \cdot a_{nc}$$

mantenendo costante l'accelerazione non compensata.

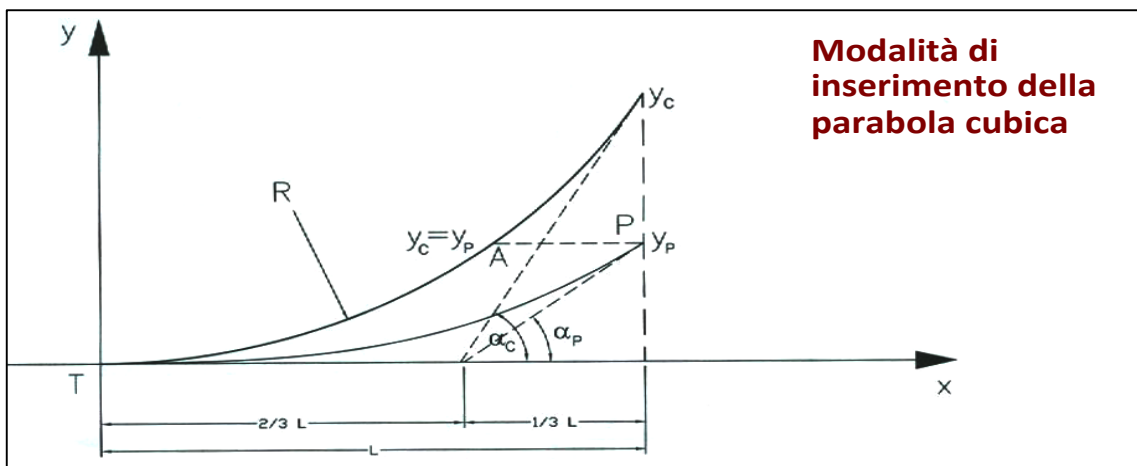
2. Rendere l'**accelerazione non compensata proporzionale alla sopraelevazione**, ottenendo, nel campo delle velocità normali, un'equazione del tipo:

$$h = \frac{160}{160 + 92} \cdot 11.8 \cdot \frac{V^2}{R} \quad [\text{mm}]$$

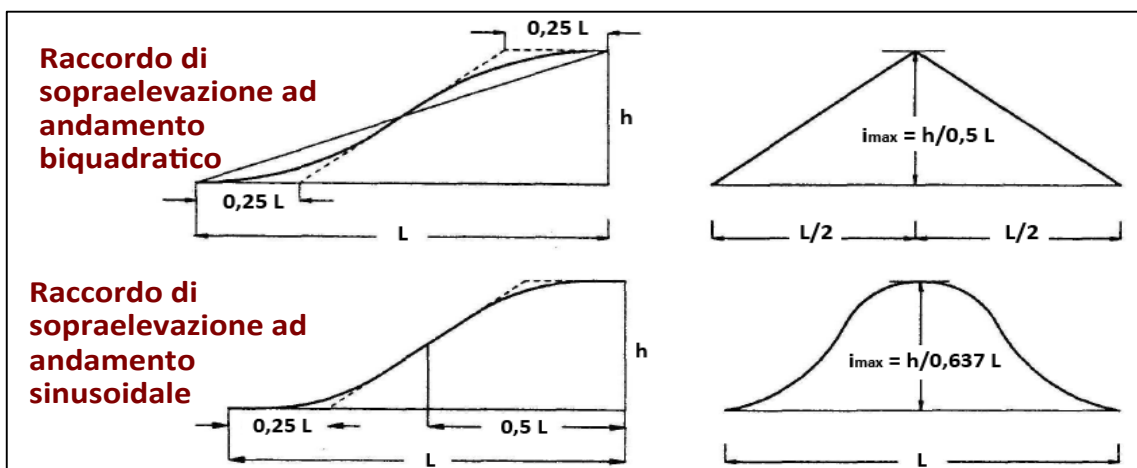
$$h = 7.5 \frac{V^2}{R} \quad [\text{mm}]$$

Fra i rettilinei e le curve circolari vengono interposti i raccordi di transizione:

- nelle ferrovie italiane: raccordi parabolici (parabola cubica);
- negli altri casi: raccordi clotoidici.



Più recentemente sono state prospettate altre soluzioni tecniche che fanno riferimento a raccordi ad andamento biquadratico e sinusoidale.



Lungo i raccordi di transizione si sviluppano le rampe di sopraelevazione.

La pendenza massima delle rampe di sopraelevazione è pari a:

- | | |
|---|----------|
| ➤ ferrovia, per $V > 100$ km/h | 1 mm/m |
| ➤ ferrovia, per $V = 75\text{--}100$ km/h | 1,5 mm/m |
| ➤ ferrovia, per $V \leq 75$ km/h | 2 mm/m |
| ➤ metropolitana | 3 mm/m |
| ➤ tranvia | 3 mm/m |

2.1 Analisi dei fenomeni di svio

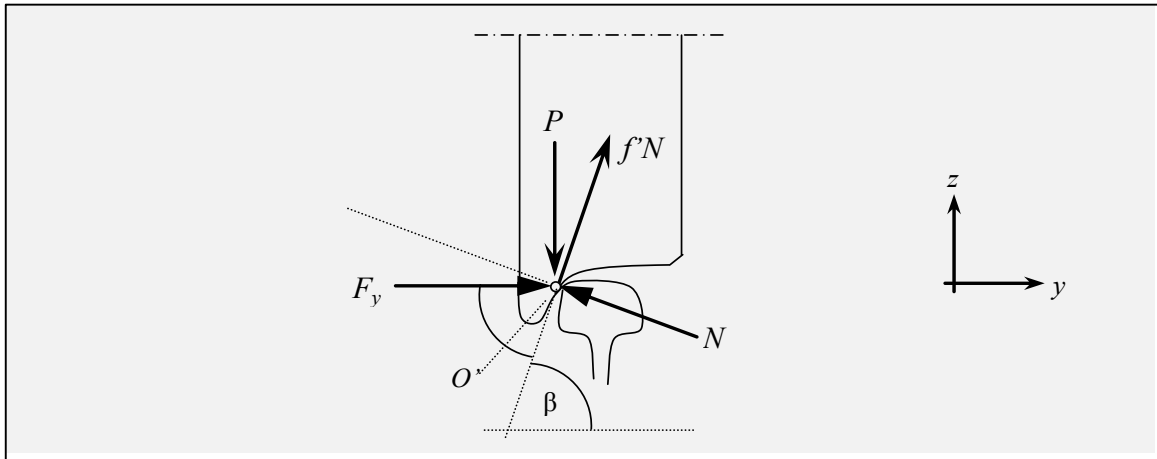
Infine, una particolare analisi occorre effettuare per la caratterizzazione scientifica del problema dello **svio**, al fine di ottimizzare compiutamente “*ante-operam*” il progetto.

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. seguente. 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 bordini 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 bordini, 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 *bordini– rotaia*.



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 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 fN che tende a spingere verso l'alto la ruota ed 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 fN e in quella ortogonale si deduce la relazione:

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

Tale formula matematica (relazione di Pochet), fornisce il valore massimo, 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 e dell'angolo β che dipende dal cerchione (a cerchioni nuovi β varia da 60 a 67 °). L'usura del cerchione modifica il profilo del bordino e fa aumentare β 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:

$$F_y \leq P$$

3. L'andamento altimetrico e sue caratterizzazioni progettuali

Il profilo altimetrico è costituito da:

- **livellette** = tratti di strada/ferrovia a pendenza costante
- **raccordi verticali** = raccordi fra livellette di diversa pendenza (concavi/convessi)

Nel seguito, si riportano alcuni valori di riferimento dei raggi dei raccordi verticali e della pendenza delle livellette utilizzabili per una corretta progettazione ferroviaria, nonché alcune nozioni di base sulle pendenze da adottare.

Valori indicativi per i **raggi dei raccordi verticali** in funzione del sistema ferroviario di trasporto:

- | | | |
|---|----------|------------|
| ➤ ferrovia AV Italia (min. eccezionale) | 23.150 m | (17.400 m) |
| ➤ ferrovia ordinaria (min.) | 10.000 m | (3.000 m) |
| ➤ metropolitana (min.) | 3.000 m | (1.800 m) |
| ➤ tranvia (min.) | 400 m | (200 m) |

Valori indicativi per le **pendenze massime di livelletta** in funzione del sistema ferroviario di trasporto:

➤ ferrovia ordinaria	35 ‰
➤ ferrovia a traffico misto	12,5 ‰
➤ ferrovia AV specializzata pass.(AV Italia)	35 ‰ (21‰)
➤ ferrovia a cremagliera	250 ‰
➤ metropolitana (massimo assoluto)	40 ‰ (55‰)
➤ tranvia (massimo assoluto)	40 ‰ (60‰)

Valori indicativi per le **pendenze massime di livelletta** in funzione del livello di linea ferrata (indicative):

➤ linee principali in pianura	5-8 ‰
➤ linee principali su terreno accidentato	15-18 ‰
➤ linee principali in montagna	20-25 ‰
➤ linee secondarie	30-35 ‰
➤ in galleria	10 ‰

Ogni 1 ‰ di pendenza in più equivale ad una resistenza aggiuntiva di 1 kg x 1 t trasportata.

In **galleria** la pendenza è limitata a causa della minore aderenza dovute alle condizioni ambientali, ovvero alla presenza di umidità.

Per pendenze superiori al 35 ‰ occorre, generalmente, assicurare l'aderenza mediante sistemi a cremagliera.

La pendenza fondamentale è la pendenza da attribuire ai rettifili perché una data locomotiva, a velocità costante, abbia un determinato rendimento del trasporto.

Pendenza innocua: è la pendenza che permette al treno in corsa il recupero in discesa del lavoro speso in salita.

Pendenza nociva: è la pendenza che richiede l'uso del freno e consente un recupero in discesa solo parziale del lavoro consumato in salita.

La **pendenza limite**, o pendenza minima di frenamento, è la pendenza della livelletta in discesa e in rettifilo lungo la quale il veicolo, se non frenato, inizia il moto.

Indicando con r_0 la resistenza specifica al moto di un veicolo, la pendenza limite è proprio pari a r_0 .

Per basse velocità, r_0 è circa 2-3 kg/t.

Pertanto, con pendenze $> 2-3 \text{ ‰}$ non è possibile mantenere fermo un veicolo senza l'uso dei freni.

Questa è teoricamente la pendenza massima da assegnare ai binari nei piazzali delle stazioni, per impedire che i treni in sosta si muovano spontaneamente.

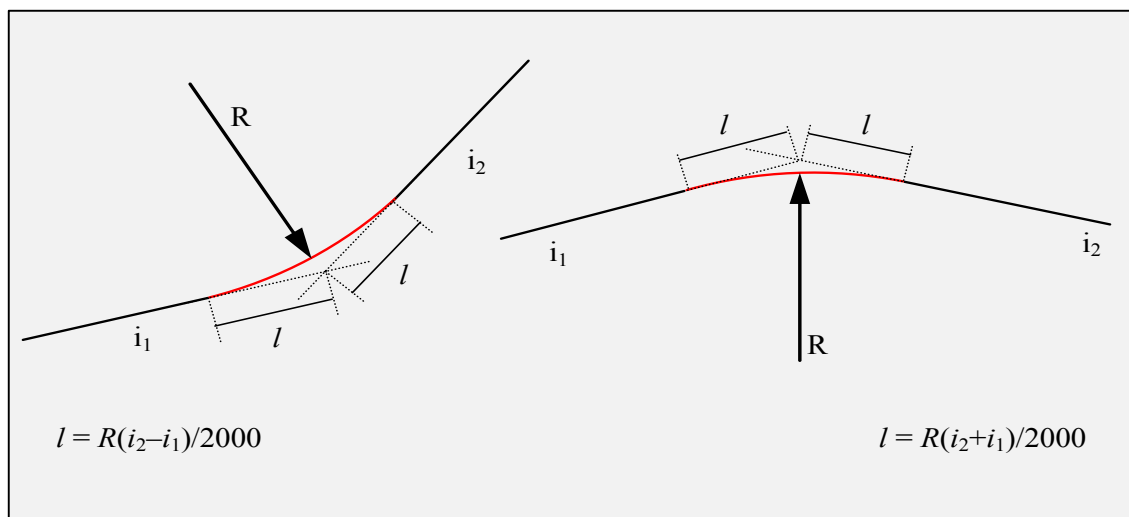
I raccordi altimetrici hanno la funzione di raccordare livellette consecutive a pendenze diverse.

Sono realizzati con archi di cerchio di ampio raggio in modo da ridurre a valori accettabili la variazione dell'accelerazione di gravità in corrispondenza del cambio di livelletta.

Il **raggio del raccordo verticale** viene determinato limitando la variazione di accelerazione verticale dovuta all'accelerazione centrifuga che nasce percorrendo l'arco di raccordo concavo o convesso in studio:

$$R = V^2 / (12,96 \cdot a_v)$$

con R in metri, V in km/h e $a_v < 0,5 \text{ m/s}^2$ (accelerazione verticale).



Per linee ordinarie il raggio minimo è di 3000 m e per quelle ad AV è di 25.000 m; imponendo il valore limite di av si può ricavare il corrispondente valore del raggio del raccordo. E' comunque necessario evitare che il raccordo altimetrico si sviluppi in corrispondenza di un tratto planimetrico a curvatura variabile (parabola cubica in Italia).

In caso contrario, si potrebbero creare:

- instabilità nel veicolo in marcia;
- indesiderati sforzi di torsione nelle rotaie.
-

Bibliografia

1. LO BOSCO D. e Coll. - Un modello matematico per l'ottimizzazione degli investimenti nei trasporti ferroviari e stradali, Ed. ARACNE (www.aracne editrice.it), Roma
2. AA.VV. - RFI "Argomenti" – Rivista di Rete Ferroviaria Italiana, consultabile via web.
3. Impianti ferroviari – Tecnica ed esercizio – di L. Mayer (a cura di P.L. Guida - E.Milizia) – Pubblicazione CIFI
4. La sovrastruttura ferroviaria – di G. Bono, C. Focacci, S. Lanni – Pubblicazione CIFI
5. Elementi generali dell'esercizio ferroviario – di R. Marini, L. Franceschini, A. Garofalo – Pubblicazione CIFI
6. BONORA G., FOCACCI C., —Funzionalità e progettazione degli impianti ferroviari, Cifi, Roma, 2002.
7. POLICICCHIO F., —Lineamenti di infrastrutture ferroviarie, Firenze University Press, 2007.
8. Manuale del binario: sottostruttura, sovrastruttura, manutenzione, economicità – di B. Lichtberger – Editore Eurail press Hamburg
9. Strade e ferrovie. Tecniche progettuali e costruttive per le infrastrutture di trasporto terrestri – di M. Servetto – Editore Il Sole 24 Ore

Siti web

- www.cifi.it
- www.ferroviedellostato.it/
- www.rfi.it