



UNIVERSITA' "MEDITERRANEA" DI REGGIO CALABRIA LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

CORSO DI INFRASTRUTTURE FERROVIARIE

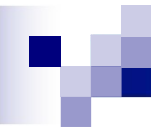
LECTURE 05 ANDAMENTO PLANO-ALTIMETRICO DEL TRACCIATO FERROVIARIO

Docente: Prof. Ing. Marinella Giunta



Stabilità del veicolo ferroviario in curva e sopraelevazione



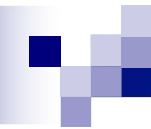


FORZA CENTRIFUGA IN CURVA

Quando un veicolo ferroviario percorre una curva circolare di raggio R è sottoposto alla **forza centrifuga**, la quale:

- Agendo sul veicolo ne facilita lo **svio** per sormonto della rotaia esterna da parte del bordinio.
- Trasmessa al binario lo sollecita trasversalmente cimentando la capacità di ancoraggio della massicciata con conseguente alterazione della geometria del binario ed, al limite, provocandone lo **slineamento**.
- Agendo sulla rotaia esterna è causa del **consumo del fianco del fungo** e provoca sollecitazioni a trazione sulle sue caviglie interne
- Agendo sui passeggeri limita il **comfort** di viaggio.





FORZA CENTRIFUGA IN CURVA

Le FS impongono un tetto alla **forza centrifuga** fissando un **limite all'accelerazione centrifuga**:

- $a_c = 0,6 \text{ m/s}^2$ per i **treni pesanti** (merci e viaggiatori composti da materiale ordinario);
- $a_c = 0,8 \text{ m/s}^2$ per i **treni viaggiatori** formati da materiale leggero (automotrice, elettromotrici) o da carrozze marcate per $V > 140 \text{ km/h}$, trainate da locomotive E646, E636, E632/633, E444;
- $a_c = 1 \text{ m/s}^2$ per i treni viaggiatori composti da materiale con **elevata stabilità e bassa aggressività sul binario** (E444, ETR250/300, ALE601, carrozze appositamente costruite);
- $a_c = 1,8 \text{ m/s}^2$ per i **treni ad assetto variabile** (tipo Pendolino).



FORZA CENTRIFUGA IN CURVA

Porre un limite all'accelerazione centrifuga ha come diretta conseguenza:

- una limitazione della velocità in curva;
- o
- un aumento del raggio minimo con conseguente irrigidimento del tracciato.

Infatti:

$$a_c = V^2/R$$

per cui

$$V_{\max} = \sqrt{a_{c\max} \cdot R}$$

ovvero

$$R_{\min} = \frac{V^2}{a_{c\max}}$$



FORZA CENTRIFUGA IN CURVA

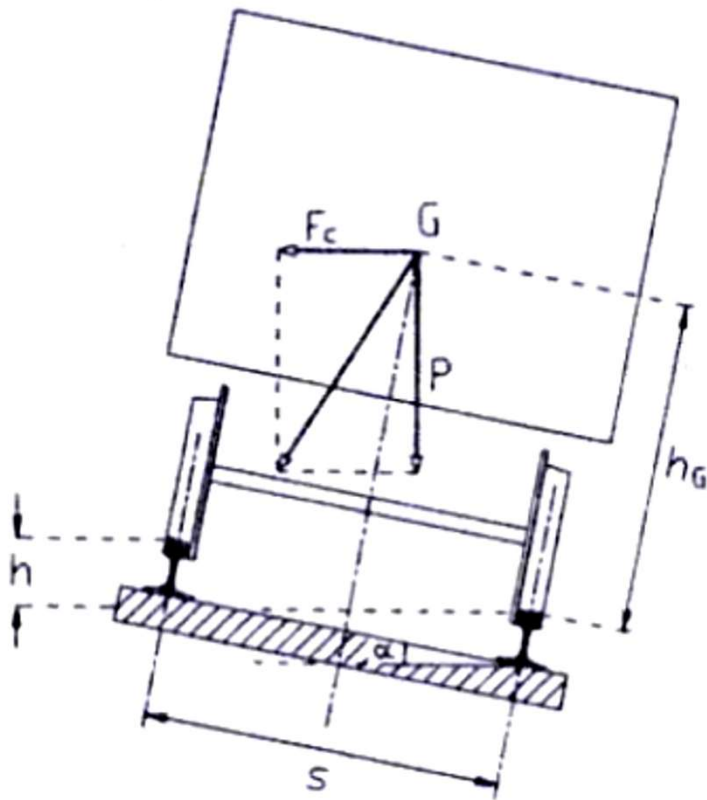
Valori di velocità massima in assenza di sopraelevazione

a_c [m/s ²]	V [Km/h]
0,4	$2,27 \sqrt{R}$
0,6	$2,77 \sqrt{R}$
0,8	$3,22 \sqrt{R}$
1	$3,60 \sqrt{R}$
2	$4,83 \sqrt{R}$

Per limitare gli effetti della forza centrifuga si conferisce al binario un assetto tale per cui la risultante della forza centrifuga e del peso sia normale al piano del ferro. Si introduce cioè sul binario stesso una **sopraelevazione h** della rotaia esterna rispetto a quella interna ricavabile dall'identità:



SOPRAELEVAZIONE IN CURVA



$$\frac{h}{S} = \frac{F_c}{P} = \frac{g}{P} \cdot \frac{v^2}{R}$$

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

$S = 1500 \text{ mm}$, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ e V in Km/h



SOPRAELEVAZIONE IN CURVA

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

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

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

$$j = \frac{S}{g} \cdot a_{nc}$$

**Difetto di
sopraelevazione**

$$h = 11,8 \frac{V^2}{R} - j$$



SOPRAELEVAZIONE IN CURVA

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'accelerazione centrifuga non compensata

a_c [m/s ²]	j [mm]
0,4	61
0,6	92
0,8	122
1	153
1,8	275



SOPRAELEVAZIONE IN CURVA

L'equazione precedente prende in esame un solo valore di velocità, mentre, normalmente, i regimi di circolazione presentano sempre un certo intervallo di velocità di esercizio, caratterizzato dalla **velocità massima** $V_{\max}$ dei treni veloci e dalla **velocità minima** $V_{\min}$ dei treni lenti.

Per la circolazione a $V_{\max}$ la componente parallela al piano del ferro della forza centrifuga prevale sulla componente del peso equidirezionata, di converso per la circolazione a $V_{\min}$ si verifica l'esatto contrario.

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

$$\frac{P}{g} \cdot a'_c = P \cdot \frac{h}{S} - \frac{P}{g} \cdot \frac{v_{\min}^2}{R} \quad h = 11,8 \cdot \frac{V_{\min}^2}{R} + \frac{S}{g} \cdot a'_c = 11,8 \cdot \frac{V_{\min}^2}{R} + e$$

e = eccesso di sopraelevazione



SOPRAELEVAZIONE IN CURVA

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{R}{11,8} \cdot (e + j) + V_{\min}^2} \quad [\text{Km/h}]$$

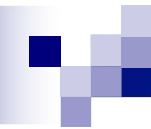
$$R = 11,8 \cdot \frac{V_{\max}^2 - V_{\min}^2}{e + j} \quad [\text{m}]$$

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

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 determinate.

Il momento della scelta del modello di esercizio è di estrema delicatezza.





SOPRAELEVAZIONE IN CURVA

Infatti:

V_{max} incide su:

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

V_{min} incide su:

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



SOPRAELEVAZIONE IN CURVA

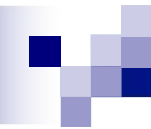
a_{nc} e quindi il difetto di sopraelevazione "j" incide

- 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.

a'_c e quindi l'eccesso di sopraelevazione "e" incide

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





SOPRAELEVAZIONE IN CURVA

Per facilitare una simile scelta si sono costruite delle tabelle per:

- accelerazione centrifuga non compensata $\mathbf{a_{nc}}$ - compresa fra 0,4 e 0,8 m/s²;
- accelerazione centripeta per ipercompensazione $\mathbf{a'_c}$ - compresa fra 0,4 e 0,6 m/s²;
- sopraelevazione $\mathbf{h}$ non superiore a 160 mm.



SOPRAELEVAZIONE IN CURVA

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:

$$V_{max} = 160 \text{ km/h}$$

$$a_{nc} = 0.60 \text{ m/s}^2$$

$$V_{min} = 80 \text{ km/h}$$

$$a'_c = 0.65 \text{ m/s}^2$$

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

Sulla **DD Roma – Firenze** il modello di esercizio è individuato mediante i parametri cinematici e dinamici di seguito riportati:

$$V_{max} = 250 \text{ km/h}$$

$$a_{nc} = 0.80 \text{ m/s}^2$$

$$R_{min} = 3.000 \text{ m}$$

$$V_{min} = 80 \text{ km/h}$$

$$a'_c = 0.65 \text{ m/s}^2$$

$$h_{max} = 125 \text{ mm}$$



SOPRAELEVAZIONE IN CURVA

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, però, curve di raggio diverso.

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}** - e curve di raggio maggiore dotate di sopraelevazioni inferiori.

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



SOPRAELEVAZIONE IN CURVA

1° caso

Utilizzare la relazione:

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

mantenendo costante l'accelerazione non compensata.

2° caso

Rendere l'**accelerazione non compensata proporzionale alla sopraelevazione**.

Esempio: per treni pesanti il valore di sopraelevazione funzione dell'accelerazione non compensata è dato da:

$$\Delta h = \frac{S}{g} \cdot a_{nc} = \frac{1435}{9,81} \cdot 0,6 = 87,8 \quad [\text{mm}]$$



SOPRAELEVAZIONE IN CURVA

La variazione di sopraelevazione che compensa in maniera costante l'accelerazione centrifuga è data da:

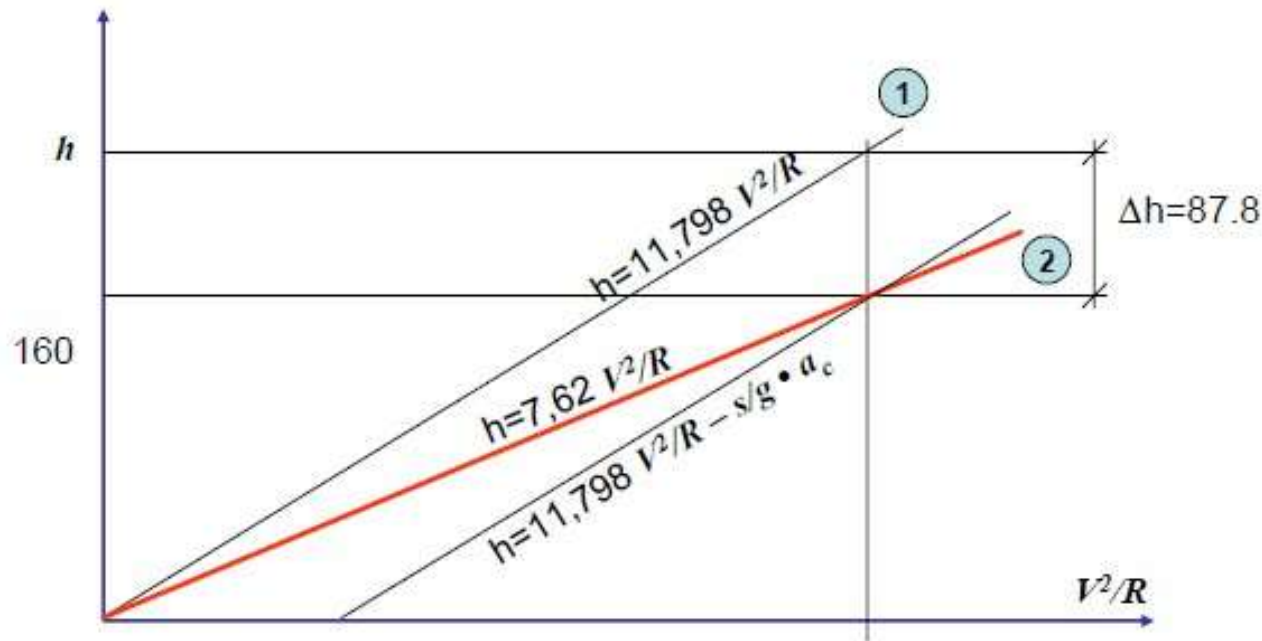
$$\frac{160}{160 + \Delta h} = 0,646$$

Quindi h , per treni pesanti, è data dalla relazione

$$h = 0,646 \cdot 11,8 \cdot \frac{V^2}{R} = 7,62 \cdot \frac{V^2}{R} \quad [\text{mm}]$$



SOPRAELEVAZIONE IN CURVA

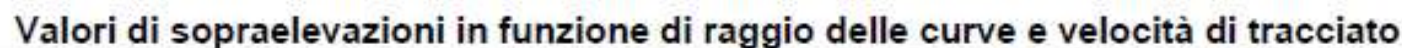


La retta 1 rappresenta le sopraelevazioni che compensano totalmente le accelerazioni centrifughe.

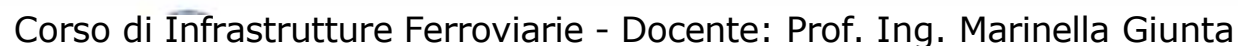
La retta 2 rappresenta le sopraelevazioni che compensano in maniera proporzionale alla sopraelevazione l'accelerazione centrifuga.

La retta parallela alla 1 rappresenta la variazione di sopraelevazione che compensa in maniera costante l'accelerazione centrifuga.





Valori di sopraelevazioni in fun

[illegible]

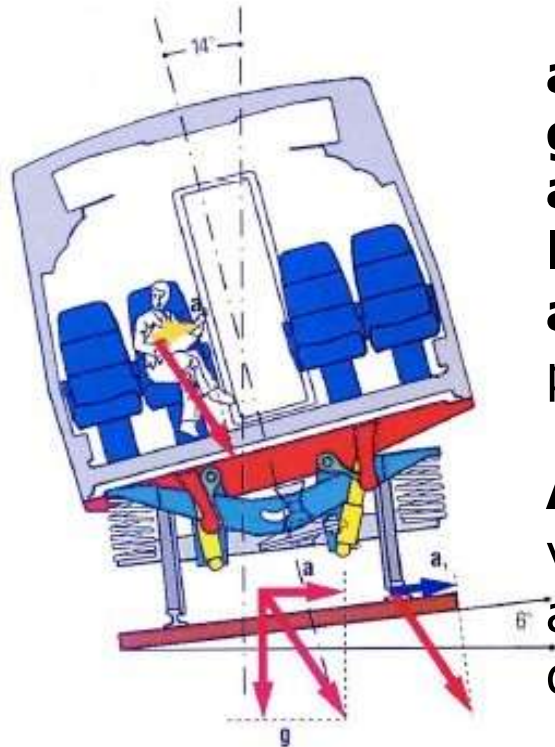
Sopraelevazioni calcolate per un'accelerazione non compensata di $0,8 \text{ m/sec}^2$

Raggi curve	VELOCITA' MASSIME PER AUTOMOTORI																						
	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160
150	7	12	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
175	5	8	12	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
200	3	6	9	13	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
225	1	4	7	10	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
250	0	2	5	8	11	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
275	0	1	3	6	9	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
300	-	0	2	4	7	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
325	-	0	1	3	6	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
350	-	-	0	2	4	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
375	-	-	0	1	3	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
400	-	-	-	0	2	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
425	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
475	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
525	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
550	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
575	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
625	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
650	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
675	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
725	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
750	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
775	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
825	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
850	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
875	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
925	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
950	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
975	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.025	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.050	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.350	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.550	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Raggi curve	VELOCITA' MASSIME PER AUTOMOTORI					
	50	55	60	65	70	75
150	7	12	15	-	-	-
175	5	8	12	15	-	-
200	3	6	9	13	16	-
225	1	4	7	10	13	-
250	0	2	5	8	11	14
275	0	1	3	6	9	12
300	-	0	2	4	7	10
325	-	0	1	3	6	8
350	-	-	0	2	4	7
375	-	-	0	1	3	5
400	-	-	-	0	2	4



PENDOLINO



a = accelerazione centrifuga

g = accelerazione gravitazionale

a₁ = accelerazione laterale non compensata a livello binario

a₂ = accelerazione laterale residua sui passeggeri .

A Con un treno a inclinazione variabile si può viaggiare in sicurezza e ad alte velocità con una accelerazione laterale non compensata, a livello del binario, pari a 2 m/sec².

Il principio su cui è basato un sistema ad assetto variabile, che permette alla cassa di inclinarsi verso l'interno durante le curve, è lo stesso che suggerisce la costruzione delle sopraelevazioni nelle curve delle linee ferroviarie. L'obiettivo è quello di compensare, almeno in modo parziale, l'accelerazione centrifuga allo scopo di ridurre l'accelerazione laterale sul passeggero e incrementare la velocità V .





PENDOLINO

Combinata con la sopraelevazione del binario, la variazione di angolo della cassa, che in automatico raggiunge un'inclinazione fino a 8° su tutte le carrozze, rende possibile la riduzione dell'accelerazione laterale sui passeggeri, a soli $0,7 - 0,8 \text{ m/sec}^2$, di gran lunga entro i limiti richiesti per un comfort adeguato $1 - 1,2 \text{ m/sec}^2$.

Tutto ciò rende possibile il raggiungimento di un **aumento del 30% della velocità in curva**, facendo il confronto con i treni convenzionali, in completa sicurezza e con un comfort eccellente, senza apportare modifiche alla già esistente geometria dell'infrastruttura.

Questo è il risultato di un attento lavoro di design rifinito negli anni attraverso prove e collaudi.

Questa tecnologia permette al Pendolino di raggiungere una **velocità massima di 250 Km/h**, in comfort e sicurezza.





Velocità in ambito ferroviario



CONCETTI DI VELOCITA' IN FERROVIA

In ambito ferroviario sono in uso differenti concetti di velocità:

- velocità limite;
- velocità di tracciato;
- velocità di rango;
- velocità di fiancata;
- velocità d'orario.

VELOCITA' LIMITE

La velocità alla quale viene percorsa una curva di raggio R, dotata della massima sopraelevazione (reale o ipotizzata), che determina un'accelerazione non compensata di 0,6 m/s².

$$\bar{V} = \sqrt{\frac{R}{11.8} \cdot \left(h + \frac{S}{g} \cdot a_{nc} \right)} = \sqrt{\frac{R}{11.8} \cdot \left(160 + \frac{1500}{9.81} \cdot 0.6 \right)} = 4.62 \sqrt{R} \quad [\text{Km/h}]$$



CONCETTI DI VELOCITA' IN FERROVIA

VELOCITA' DI TRACCIATO

Nell'ambito di un tratto di linea coesistono, oltre a rettilinei, curve di raggio diverso. Viene definita velocità di tracciato la velocità limite della **curva di raggio più piccolo**:

$$V_t = 4,62 \sqrt{R_{\min}} \quad [\text{Km/h}]$$

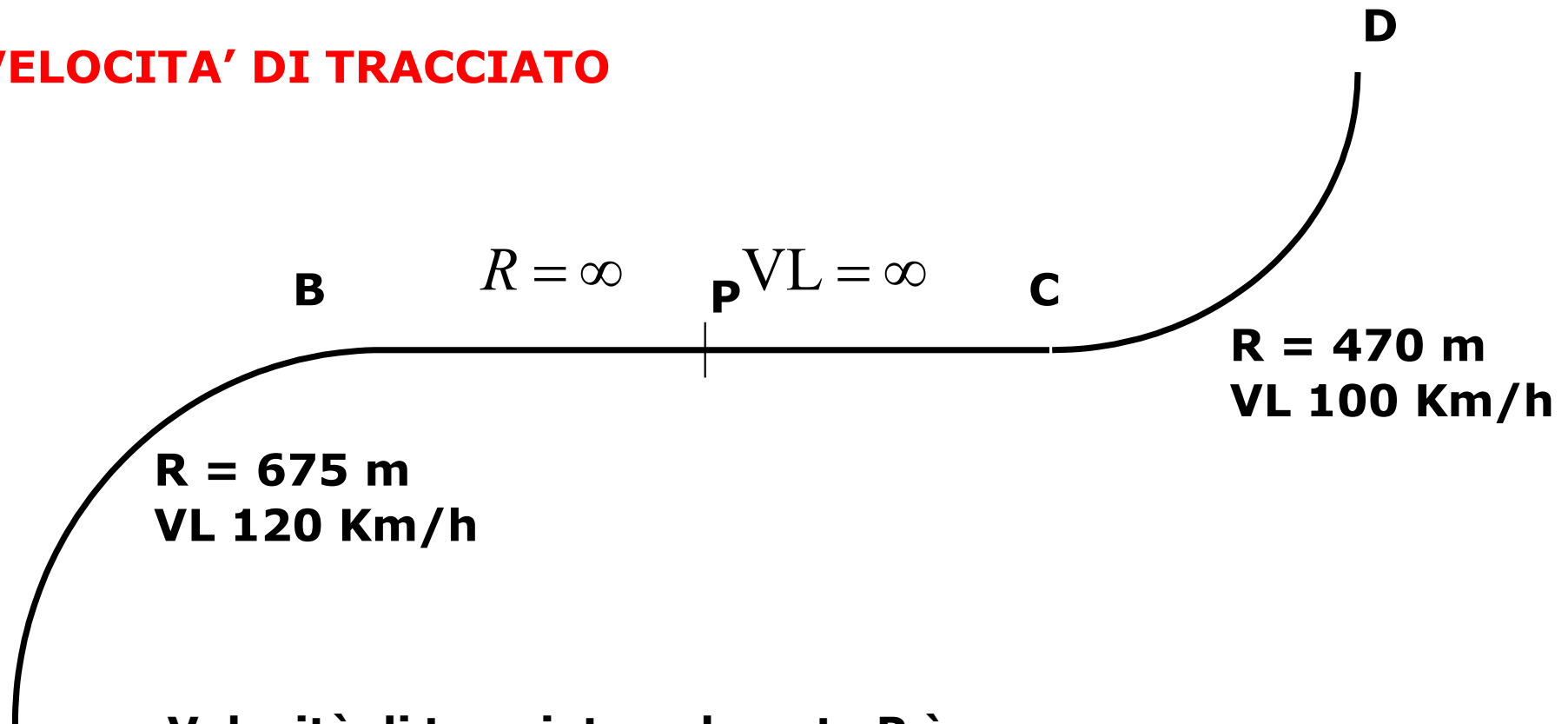
Tale curva sarà dotata di **sopraelevazione massima di 160 mm** e su di essa si manifesterà l'accelerazione non compensata massima di $0,6 \text{ m/s}^2$; alle altre saranno attribuite sopraelevazioni inferiori e su di esse si manifesteranno accelerazioni non compensate inferiori in proporzione al rapporto $h/160$:

$$a_{nc} = 0,6 \cdot \frac{h}{160} \quad [\text{m/s}^2]$$



CONCETTI DI VELOCITA' IN FERROVIA

VELOCITA' DI TRACCIATO



A

Velocità di tracciato nel punto P è:

- infinita se l'estesa viene divisa nelle tratte AB+BC+CD
- 120 Km/h se l'estesa viene divisa nelle tratte AC+CD
- 100 Km/h se l'intera tratta AD è considerata unica tratta



CONCETTI DI VELOCITA' IN FERROVIA

VELOCITA' DI TRACCIATO

L'esempio illustra l'importanza della suddivisione per la quale non esistono regole fisse ma occorre contemperare le esigenze di massima velocità media di tracciato con il non eccessivo frazionamento. Possono essere rispettati dei criteri generali:

1. La lunghezza minima della tratta non può essere inferiore a 2.000 m;
2. Nelle linee secondarie, ove non presenti tabelle di velocità, occorre che queste si verifichino in corrispondenza di impianti facilmente individuabili dal personale di macchina (fabbricato viaggiatori, ponte, cippo chilometrico, casa cantoniera, scambio estremo, segnale ecc..);
3. La velocità di tracciato non debbono determinare nelle corrispondenti velocità di rango variazioni, in diminuzione, maggiori di 60 Km/h. Ove ciò si verifichi occorrerà inserire una tratta tampone della lunghezza di 2000m.

170 Km/h ————— 160 Km/h ————— 100 Km/h



CONCETTI DI VELOCITA' IN FERROVIA

VELOCITA' DI RANGO

Riferendoci ai quattro valori di accelerazione centrifuga non compensata, si definisce **velocità di rango** A, B, C o P la velocità con la quale viene percorsa la curva di raggio minimo, nell'ambito di un tratto di linea, determinando un'accelerazione non compensata, rispettivamente di $0,6 \text{ m/s}^2$, $0,8 \text{ m/s}^2$, 1 m/s^2 ed $1,8 \text{ m/s}^2$ attribuendo alla sopraelevazione il suo valore massimo:

$$V_A = 4,62 \sqrt{R_{\min}} \quad [\text{Km/h}]$$

$$V_C = 5,15 \sqrt{R_{\min}} \quad [\text{Km/h}]$$

$$V_B = 4,89 \sqrt{R_{\min}} \quad [\text{Km/h}]$$

$$V_P = 6,07 \sqrt{R_{\min}} \quad [\text{Km/h}]$$

Le **velocità di rango** sono legate alla velocità di tracciato dai seguenti rapporti:

$$V_A = V_t; \quad V_B = 1,06 \cdot V_t; \quad V_C = 1,11 \cdot V_t; \quad V_P = 1,31 \cdot V_t.$$



CONCETTI DI VELOCITA' IN FERROVIA

VELOCITA' DI FIANCATA

Si definisce **velocità di fiancata**, la velocità massima con la quale un veicolo può percorrere un certo tratto di linea.

Essa risulterà **sempre minore**, o al limite uguale, alla **velocità di rango** relativa a quel determinato tipo di veicolo.

Tale velocità dipende dalle **caratteristiche costruttive** e dallo **stato di manutenzione** della tratta in esame e, in particolare:

- dal tipo e dalle condizioni di **armamento**;
- dallo stato del **corpo stradale**;
- dall'idoneità delle **opere d'arte** sotto binario a sopportare i carichi dinamici;
- dalle caratteristiche degli **impianti di trazione elettrica** e dal tipo di segnalamento;
- dalla presenza di **ostacoli** che possano interferire con il profilo minimo degli ostacoli;
- dalle caratteristiche della **circolazione**.





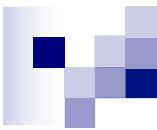
CONCETTI DI VELOCITA' IN FERROVIA

VELOCITA' D'ORARIO

La **velocità di percorrenza** dei treni viene impostata ad un valore inferiore alla velocità di fiancata, per conferire alla circolazione la flessibilità necessaria al recupero di eventuali ritardi.

Si definisce, pertanto, **velocità d'orario** la velocità alla quale è impostata la marcia dei convogli.





Andamento planimetrico del tracciato ferroviario





ANDAMENTO PLANIMETRICO

Planimetricamente il tracciato ferroviario è costituito da una successione di **rettifili**, **curve di transizione** e **curve circolari**.

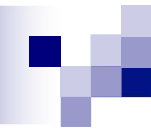
L'elemento planimetrico che condiziona la velocità massima ammissibile su una linea ferroviaria è il **raggio delle curve circolari**.

Tuttavia l'adozione di raggi minimi di valore elevato può rendere insostenibile il costo di costruzione della linea e problematico il suo inserimento nel territorio. Alcune Amministrazioni ferroviarie hanno fissato due valori di **raggio minimo**:

- il **primo**, riservato alle linee di grande comunicazione, generalmente compreso tra i 650 e i 1000 m,
- il **secondo**, legato a criteri di inscrivibilità del veicolo in curva, variabile dai 100 ai 350 m.

RFI prescrive che per nuovi tracciati dovrà adottarsi un raggio non inferiore a 275 m. In casi eccezionali possono essere autorizzati, se preventivamente concordati, valori meno restrittivi.





ANDAMENTO PLANIMETRICO

Osservazioni sperimentali hanno valutato pari a **1.5 secondi il tempo** durante il quale la cassa del veicolo riacquista il suo originario assetto verticale dopo l'uscita da una curva, per cui sarebbe consigliabile, in termini di comfort, l'interposizione, fra due curve consecutive discordi, di un tratto di **rettifilo di lunghezza** pari a:

$$l_r = \frac{1,5 \cdot V}{3,6}$$

con V espresso in km/h.





INDICATORI GENERALI DELL'ANDAMENTO PLANIMETRICO

Per definire le caratteristiche geometriche generali di un tracciato ferroviario è possibile definire due indicatori:

1. GRADO DI TORTUOSITA'

Il **grado di tortuosità** è definito come il rapporto percentuale fra l'estensione l_c delle curve circolari di raggio inferiore a un determinato valore e la lunghezza totale della linea l_r

$$\tau = \frac{l_c}{l_r} \cdot 100$$

Tale indice permette di valutare l'**attitudine di una linea esistente** a essere esercita ad una **velocità superiore** a quella di progetto senza interventi sul tracciato.

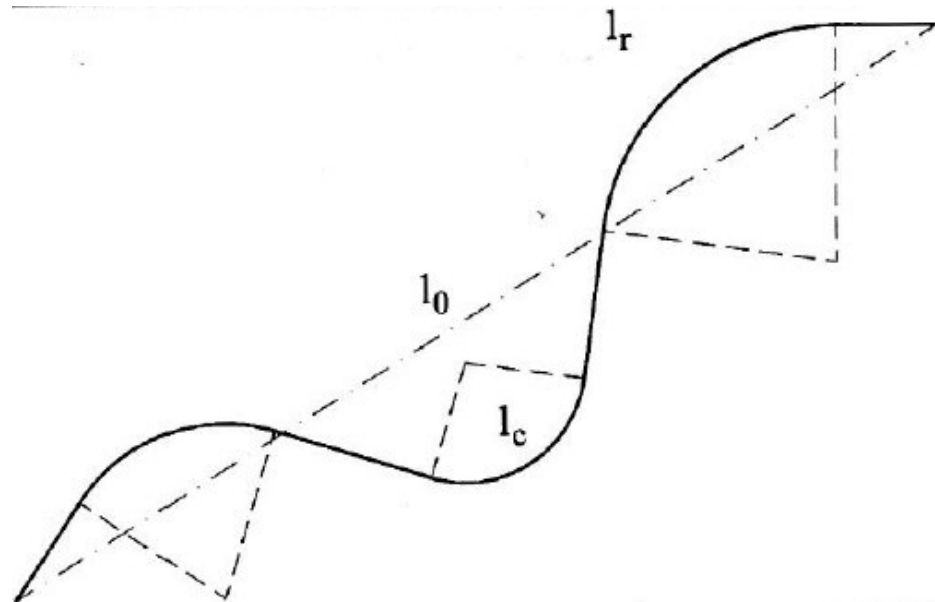


INDICATORI GENERALI DELL'ANDAMENTO PLANIMETRICO

2. INDICE DI ALLUNGAMENTO

L'**indice di allungamento** è definito dal seguente rapporto percentuale:

$$\alpha = \frac{l_r - l_o}{l_o} \cdot 100$$





CURVE DI TRANSIZIONE E RACCORDI DI SOPRELEVAZIONE

Per ottenere un elevato comfort di marcia, è necessario prevedere, nella progettazione ferroviaria, l'inserimento di:

- **curve di transizione** ovvero curve a raggio variabile nel passaggio rettilineo-curva circolare o nei raccordi di continuità (curve policentriche);
- **raccordi di sopraelevazione** per il collegamento del tratto di rotaia privo di sopraelevazione con quello sopraelevato. Le grandezze caratteristiche, assunte per il dimensionamento dei raccordi di sopraelevazione, sono il **contraccollo c** e la **velocità di rollo ω** .



CONTRACCOLPO

Il contraccolpo è dato dalla variazione dell'accelerazione centrifuga non compensata nell'unità di tempo:

$$c = \frac{a_{nc}}{t} \text{ [m/sec}^3 \text{]}$$

Se il tratto in curva è percorso a velocità costante

$$t = \frac{l}{v} \quad l \text{ [m]} \text{ e } v \text{ [m/sec]}$$

con l lunghezza del raccordo. Pertanto:

$$c = \frac{a_{nc} \cdot v}{l} = \frac{a_{nc} \cdot V}{3.6 \cdot l}$$

$c \leq 0,30 \text{ m/sec}^3$ molto buono

$0,30 \leq c \leq 0,45 \text{ m/sec}^3$ buono

$0,45 \leq c \leq 0,70 \text{ m/sec}^3$ accettabile

$0,70 \leq c \leq 0,85 \text{ m/sec}^3$ eccezionalmente accettabile



ANDAMENTO PLANO - ALTIMETRICO

Velocità di rollio

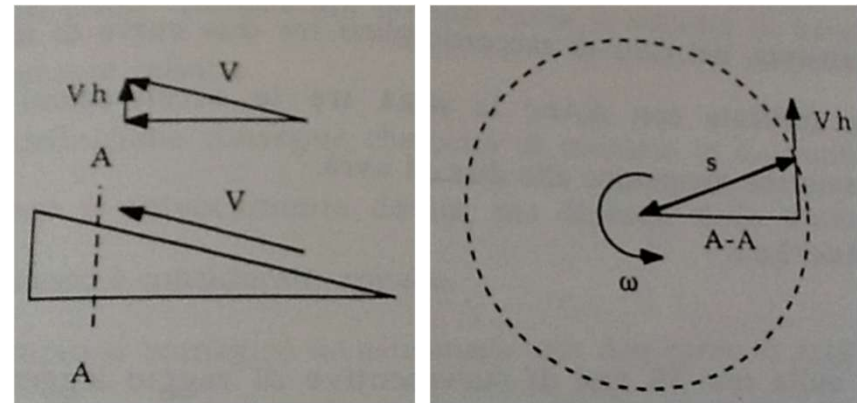
La **velocità angolare** ω con cui un veicolo ferroviario, considerato rigido e di lunghezza trascurabile, ruota intorno al punto di fermo sulla rotaia bassa nel piano perpendicolare alla direzione del moto, ossia:

$$\omega = \frac{h}{S \cdot t} \text{ [rad/sec]}$$

in cui:

- ***h*** sopraelevazione in mm;
- ***S*** pari a 1500 mm;
- ***t*** tempo di percorrenza del raccordo in sec.

$$\omega = \frac{h \cdot V}{3,6 \cdot S \cdot l} \text{ [rad/sec]} \quad \text{con } V \text{ in Km/h e } l \text{ in m}$$



VELOCITA' DI SOLLEVAMENTO

In alternativa alla velocità di rollo si può utilizzare la **velocità di sollevamento** che è la componente verticale della velocità con la quale si muove la ruota esterna percorrendo il raccordo di sopraelevazione:

$$V_s = \frac{h \cdot V}{3.600 \cdot l} \text{ [mm/sec]}$$

Con:

V in Km/h

l in m

h in mm



RACCORDO DI SOPRELEVAZIONE

Fissati dei valori limite al contraccollo, alla velocità di rollio ed alla velocità di sollevamento è possibile determinare la lunghezza del raccordo.

Per esempio nel sistema ad alta velocità italiano, il **contraccollo limite** è fissato in **0.15 m/sec³**.

$$l = \frac{a_{nc} \cdot V}{3.6 \cdot c} \quad [\text{m}]$$

$$l = \frac{h \cdot V}{3,6 \cdot S \cdot \omega} \quad [\text{m}]$$

$$l = \frac{h \cdot V}{3.600 \cdot V_s} \quad [\text{m}]$$

RANGO Velocità	a_{nc} [m/sec ²]	c [m/sec ³]	ω [rad/sec]	V_s [mm/sec]
A	0,6	0,25	0,036	54
B	0,8	0,35	0,038	57
C	1,0	0,40*	0,04	60

* eccezionalmente e temporaneamente può raggiungere il valore di 0,6 m/sec²

LINEE	c [m/sec ³]	V_s [mm/sec]
Direttissima Roma-Firenze	0,24	37,5
AV/AC	0,15**	23,4

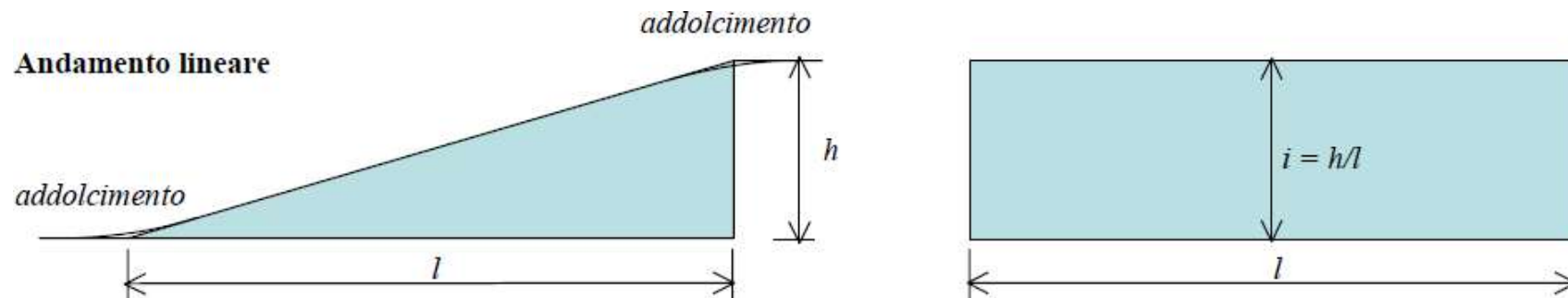
** eccezionalmente
può arrivare fino al
valore di 0,25
m/sec³.



RACCORDO DI SOPRELEVAZIONE

Raccordo lineare

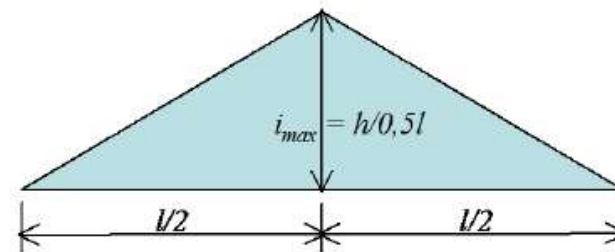
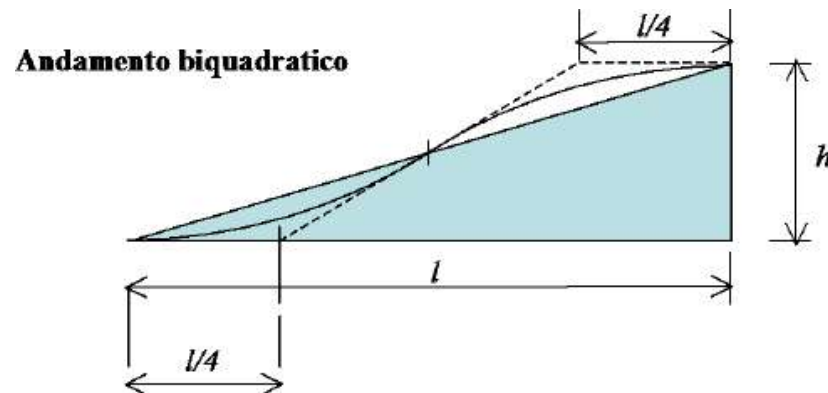
Il raccordo si realizza variando linearmente la quota della rotaia esterna (a pendenza $i = \text{cost.}$) e introducendo un arrotondamento all'inizio e alla fine dello stesso. Presenta il vantaggio della semplicità costruttiva e manutentiva ma determina brusche variazioni di c contraccolpo e ω velocità di rollio all'inizio e alla fine.



RACCORDO DI SOPRELEVAZIONE

Raccordo con andamento biquadratico

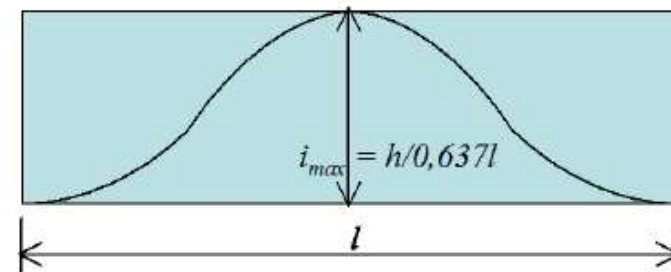
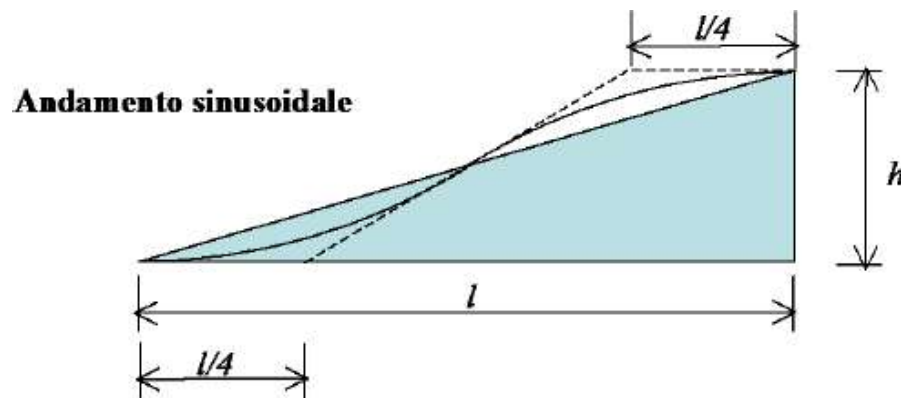
Si evitano le brusche variazioni di c *contraccollo* e ω velocità di rollio all'inizio e alla fine ma si aumenta la pendenza massima.

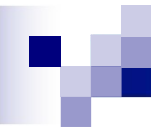


RACCORDO DI SOPRELEVAZIONE

Raccordo con andamento sinusoidale

Si evitano le brusche variazioni di *c contraccollo* e ω velocità di rollio all'inizio e alla fine ma si aumenta la pendenza massima.





RACCORDI PLANIMETRICI

La definizione della forma e della lunghezza del raccordo di sopraelevazione rende obbligata quella del **raccordo planimetrico** che, allo scopo di bilanciare istante per istante la componente della forza centrifuga sul piano del ferro con la componente del peso sullo stesso piano in modo tale che la loro differenza non presenti discontinuità o inversioni di segno, deve:

- iniziare nello stesso punto del raccordo di sopraelevazione;
- avere la stessa lunghezza;
- produrre un andamento lineare dell'accelerazione centrifuga.

Occorre distinguere tra:

Raccordo rettifilo – curva

Raccorda curva - curva



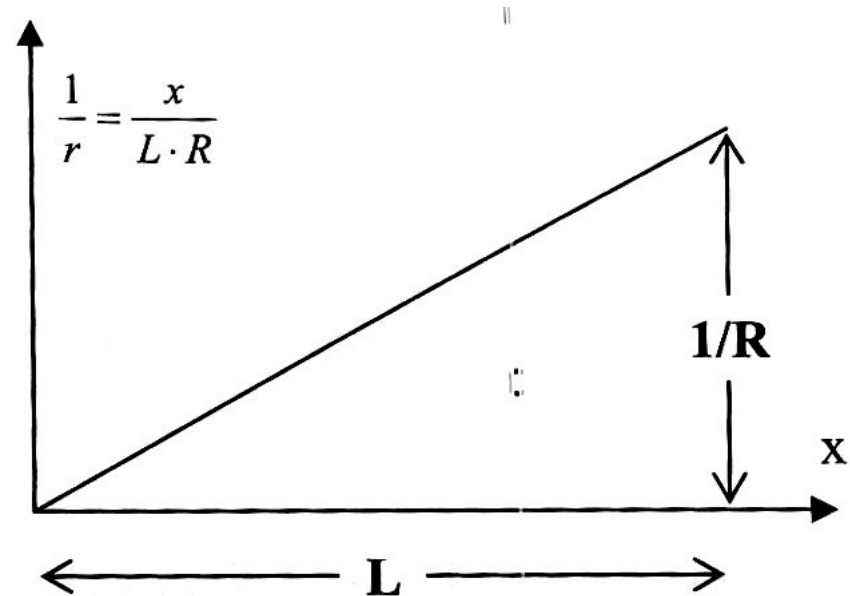
RACCORDI PLANIMETRICI

Raccordi planimetrici rettilo - curva

Per produrre un andamento lineare dell'accelerazione centrifuga nelle reti ferroviarie si adotta la parabola cubica espressa dall'equazione intrinseca:

$$\frac{1}{r} = \frac{x}{LR}$$

essendo ***R*** il raggio della curva e ***L*** la lunghezza del raccordo, approssimata alla proiezione della curva stessa sull'asse delle ascisse, nel piano curvatura-spazio.



RACCORDI PLANIMETRICI

Equazione della parabola cubica sul piano cartesiano

$$y = \frac{x^3}{6RL}$$

con:

L = lunghezza del raccordo di sopraelevazione

R = raggio della curva circolare

Per una buona qualità della circolazione è necessario che siano soddisfatte le seguenti condizioni:

1. il raccordo parabolico deve confinare con la curva circolare da un lato e con il rettilineo dall'altro;
2. nei punti d'inizio e fine raccordo parabolico le curve a contatto devono avere la stessa tangente del raccordo stesso;
3. nei punti d'inizio e fine raccordo non devono esserci discontinuità di curvatura.



RACCORDI PLANIMETRICI

Raccordo parabolico-formulario

Tangente nel generico punto di ascissa x

$$y' = \operatorname{tg} \alpha = \frac{x^2}{2LR}$$

Tangente nel punto finale x=L

$$y' = \operatorname{tg} \alpha = \frac{L}{2R}$$

Ordinata del punto finale

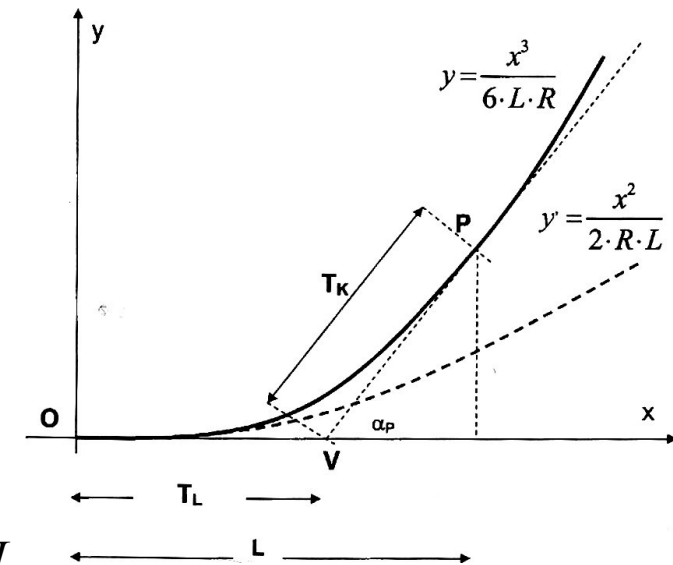
$$y = \frac{L^2}{6R}$$

Tangente lunga

$$T_L = x_P - \frac{y_P}{\operatorname{tg} \alpha_P} = L - \frac{\frac{L^2}{6R}}{\frac{L}{2R}} = L - \frac{L}{3} = \frac{2}{3}L$$

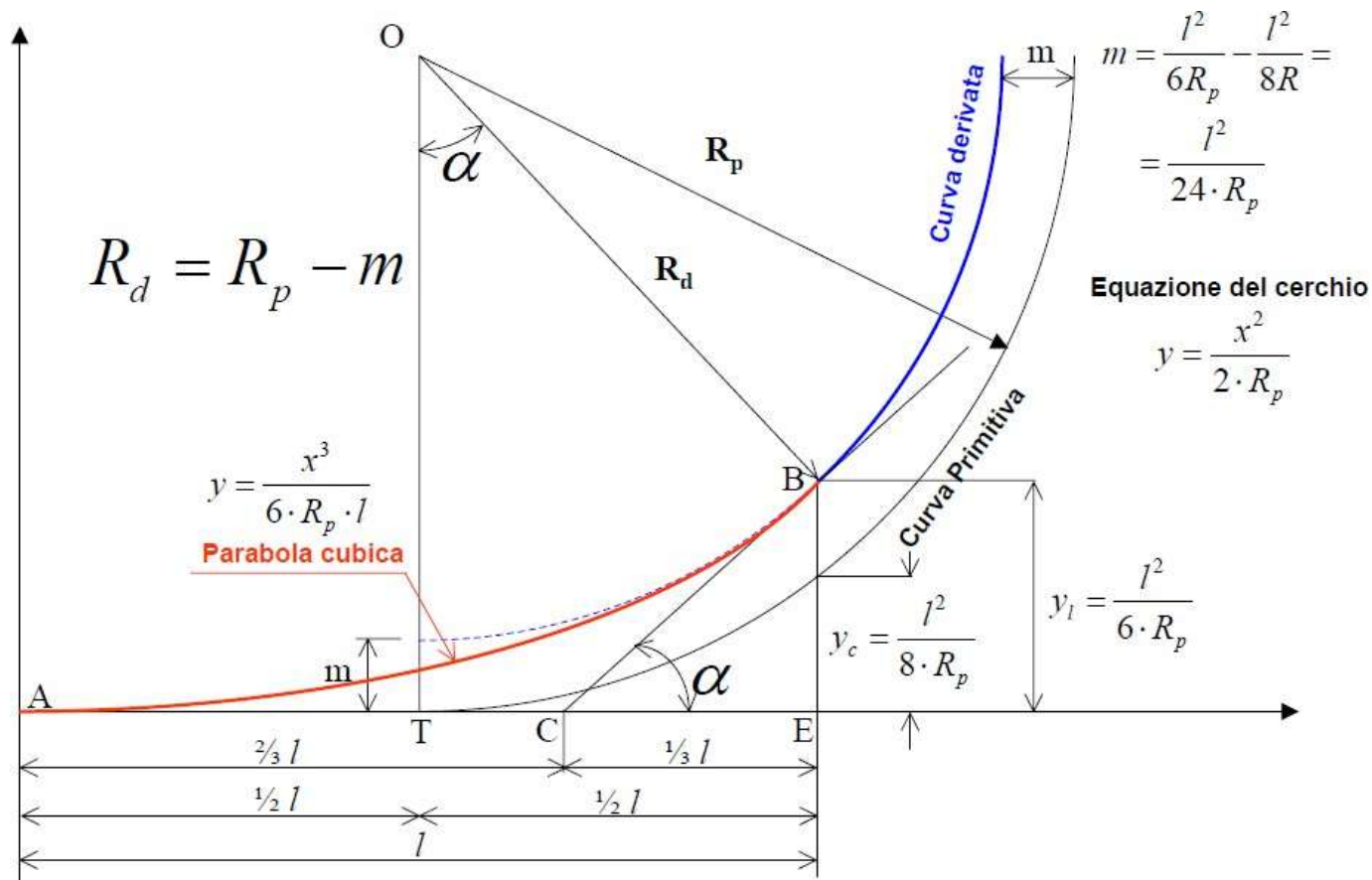
Tangente corta

$$T_K = \sqrt{(y_P)^2 + \left(\frac{L}{3}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{L^2}{6R}\right)^2 + \left(\frac{L}{3}\right)^2} = \frac{L}{6R} \sqrt{L^2 + 4R^2} \cong \frac{L}{3}$$



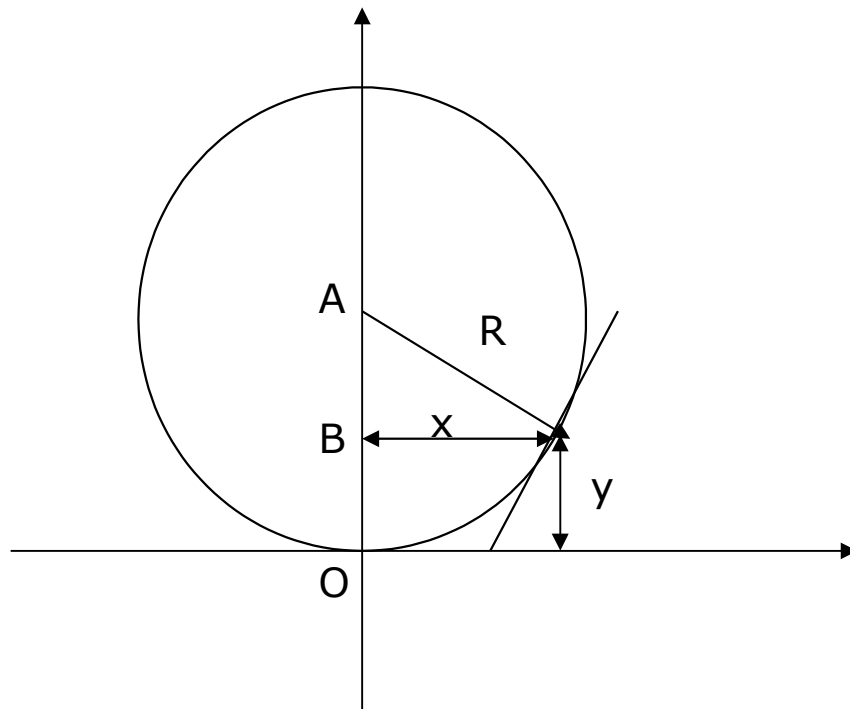
RACCORDI PLANIMETRICI

Inserimento della parabola cubica nei tracciati ferroviari



RACCORDI PLANIMETRICI

Coordinate dei punti di una circonferenza



$$OB = OA - AB$$

$$y = R - \sqrt{R^2 - x^2}$$

$$R - y = \sqrt{R^2 - x^2}$$

$$(R - y)^2 = R^2 - x^2$$

$$R^2 - 2Ry + y^2 = R^2 - x^2$$

$$x^2 + y^2 = 2Ry \Rightarrow x^2 = 2Ry \Rightarrow y = \frac{x^2}{2R}$$

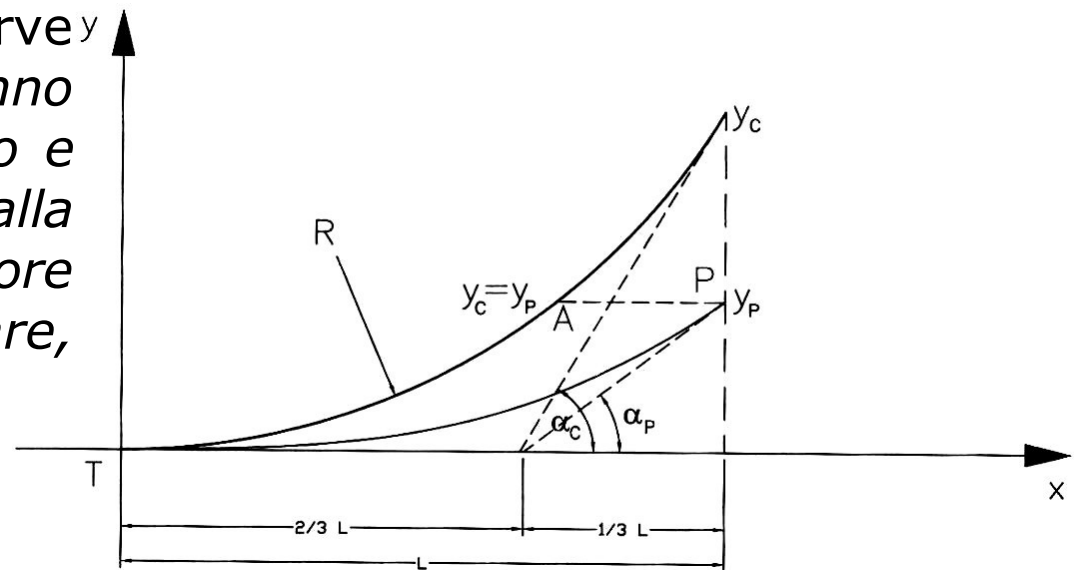


RACCORDI PLANIMETRICI

Inserimento della parabola cubica nei tracciati ferroviari

Se si sovrappone alla curva circolare di raggio R un *raccordo parabolico* partendo dallo stesso punto e con la stessa tangente, dopo un'uguale lunghezza d'ascissa L il punto P sul raccordo parabolico presenta un'ordinata (y_P) minore di quella (y_C) del punto corrispondente sul cerchio di raggio R .

Anche le tangenti alle due curve nel punto di ascissa $x = L$ avranno un coefficiente angolare diverso e precisamente la tangente alla parabola assume un valore minore della tangente alla curva circolare, essendo $P < C$.

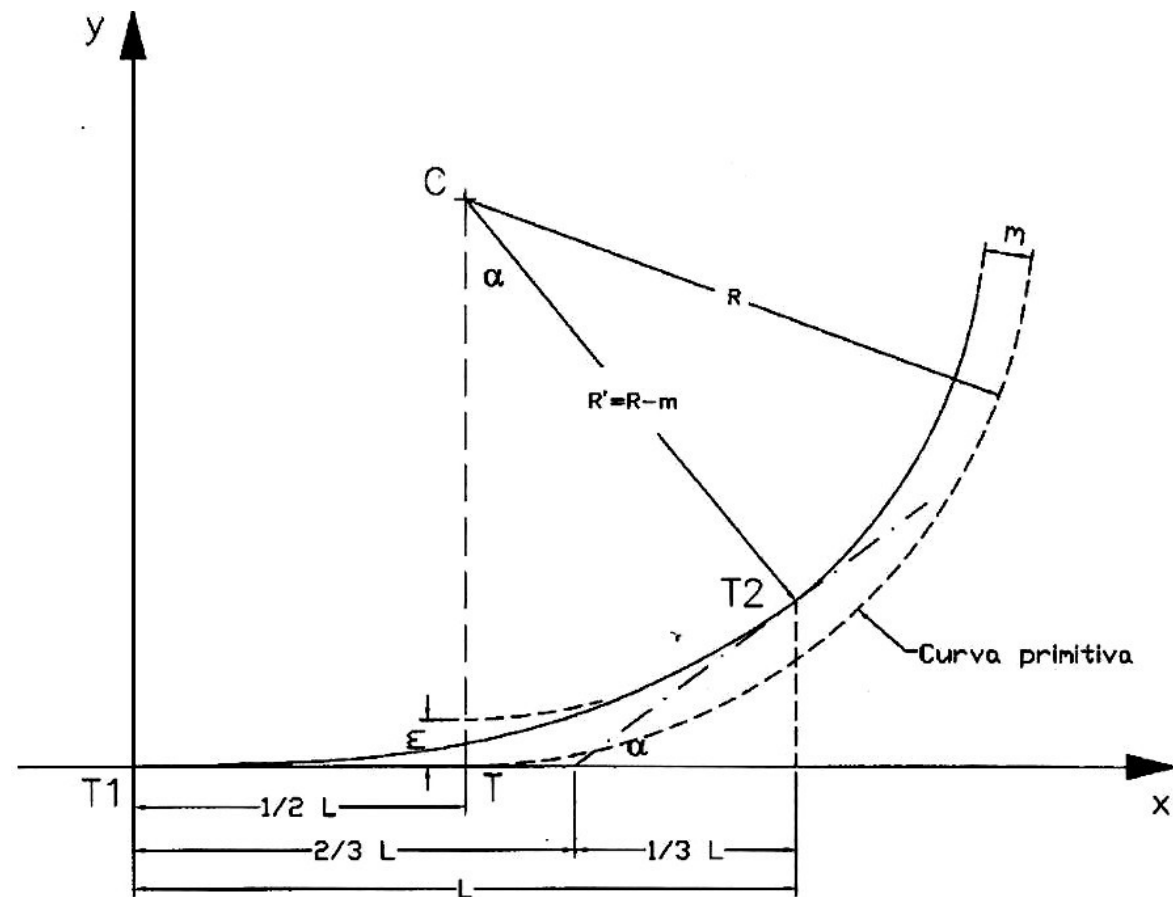


RACCORDI PLANIMETRICI

Inserimento della parabola cubica nei tracciati ferroviari

Per ottenere la stessa tangente nel punto di contatto tra le due curve è necessario ricorrere anche allo spostamento del cerchio verso il centro, oltre che allo scorrimento di T verso T' .

La soluzione di tale problema è stata fornita da Nordling, da cui deriva il nome del raccordo parabolico adottato nel trasporto su ferro.



RACCORDI PLANIMETRICI

Inserimento della parabola cubica nei tracciati ferroviari

Il raccordo Nordling può essere implementato in due modi:

- **a raggio conservato**, spostando l'intera curva circolare parallelamente a se stessa, secondo la bisettrice dell'angolo al vertice;
- **a centro conservato**, distribuendo la lunghezza del raccordo metà per parte rispetto al punto di tangenza T della curva primitiva, bloccando nella sua posizione originaria il centro della curva circolare e operando lo spostamento della curva tramite la riduzione del raggio R di una quantità m , pari allo scostamento.

La prima soluzione, che presenta il vantaggio di mantenere l'invariabilità del raggio R , comporta alcune complicazioni per effetto dello spostamento del centro della curva, che addirittura, per angoli al vertice piccoli, rende non applicabile tale metodologia perché si hanno spostamenti del centro eccessivi.

La soluzione comunemente adottata è quella di inserimento a centro conservato.



RACCORDI PLANIMETRICI

Inserimento della parabola cubica nei tracciati ferroviari

L'ordinata del raccordo parabolico per $x = L$ vale:

$$y_P = \frac{L^2}{6R}$$

L'ordinata del cerchio originario, per $x = L/2$, è ottenibile dalla seguente espressione:

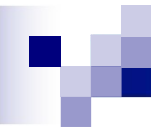
$$y_C = \frac{L^2}{8R}$$

Alla fine del raccordo, le due curve devono essere a contatto, quindi, la circonferenza deve spostarsi di:

$$m = y_P - y_C = \frac{L^2}{6R} - \frac{L^2}{8R} = \frac{L^2}{24R}$$

riducendo della stessa quantità il raggio della circonferenza.





RACCORDI PLANIMETRICI

Inserimento della parabola cubica nei tracciati ferroviari

L'introduzione del raccordo parabolico modifica il raggio della curva primitiva, della quantità ***m***:

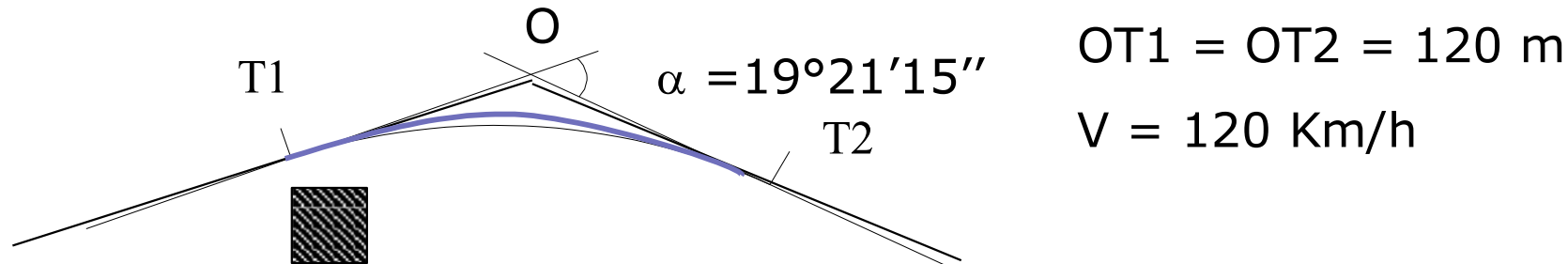
$$R_p = R_d + m$$

spostando il tracciato su di una curva derivata.



RACCORDI PLANIMETRICI

Esempio



Angolo al centro = α

$$\alpha = 19^\circ 21' 15'' = 19^\circ,3542 \quad \alpha/2 = 9^\circ,6771$$

$$R = T/(\text{tg}\alpha/2) = 120/\text{tg}9^\circ,6771 = 120/0,1608 = 703,72 \text{ m}$$

$$h = 7,5 \cdot V^2/R = 153,45 \text{ mm} \approx 160 \text{ mm}$$

Per $V > 100 \text{ Km/h}$ la pendenza del raccordo di sopraelevazione è $p = 0,001$

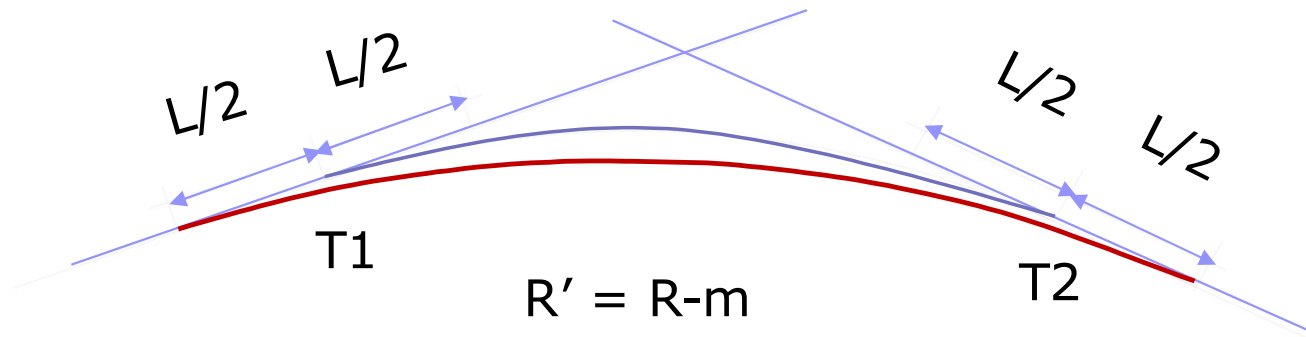
La lunghezza del raccordo di sopraelevazione è pertanto

$$L = h/p = 0,160/0,001 = 160 \text{ m}$$



RACCORDI PLANIMETRICI

Applicazione



$$m = L^2/24R = 160^2/24 \cdot 703,72 = 1,52 \text{ m}$$

Nell'originario punto di tangenza la curva subisce uno spostamento pari a:

$$m/2 = 0,76 \text{ m}$$



RACCORDI PLANIMETRICI

Applicazione

Quando si effettuano operazioni di questo tipo occorre sempre verificare che il tracciato definitivo sia compatibile con ostacoli o punti notevoli. Se ciò non si verifica si può:

- 1. modificare il raggio originario e quindi i punti di tangenza della curva circolare originaria con i rettifili. Infatti a parità di angolo di deviazione diminuendo R diminuisce anche lo sviluppo delle tangenti;*
- 2. la pendenza p e quindi lo sviluppo L del raccordo;*
- 3. la sopraelevazione h , imponendo maggiori o minori valori dell'accelerazione centrifuga non compensata, il che influisce su L .*



RACCORDI PLANIMETRICI

Raccordo curva-curve

Si definiscono policentriche curve composte da più archi di cerchio di raggio differente aventi, nel punto di contatto, la medesima tangente.

I due archi di cerchio componenti la policentrica sono caratterizzati da due valori diversi dell'accelerazione centrifuga non compensata per cui occorre introdurre, a cavallo del punto di contatto, un raccordo che contenga il contraccollo, la velocità di rollo, e dove avvenga gradualmente la variazione della sopraelevazione

Il dimensionamento del raccordo di sopraelevazione intermedio si ottiene applicando gli stessi concetti espressi precedentemente adattandoli alla situazione di contatto fra due curve, cioè:

$$c = \frac{\Delta a_{nc} \cdot V}{3.6 \cdot l} \quad [\text{m/sec}^3] \qquad \omega = \frac{\Delta h \cdot V}{3.6 \cdot S \cdot l} \quad [\text{rad/sec}]$$

dove Δa_{nc} e Δh sono le differenze fra i valori delle accelerazioni non compensate e delle sopraelevazioni relativi alle due curve componenti la policentrica.

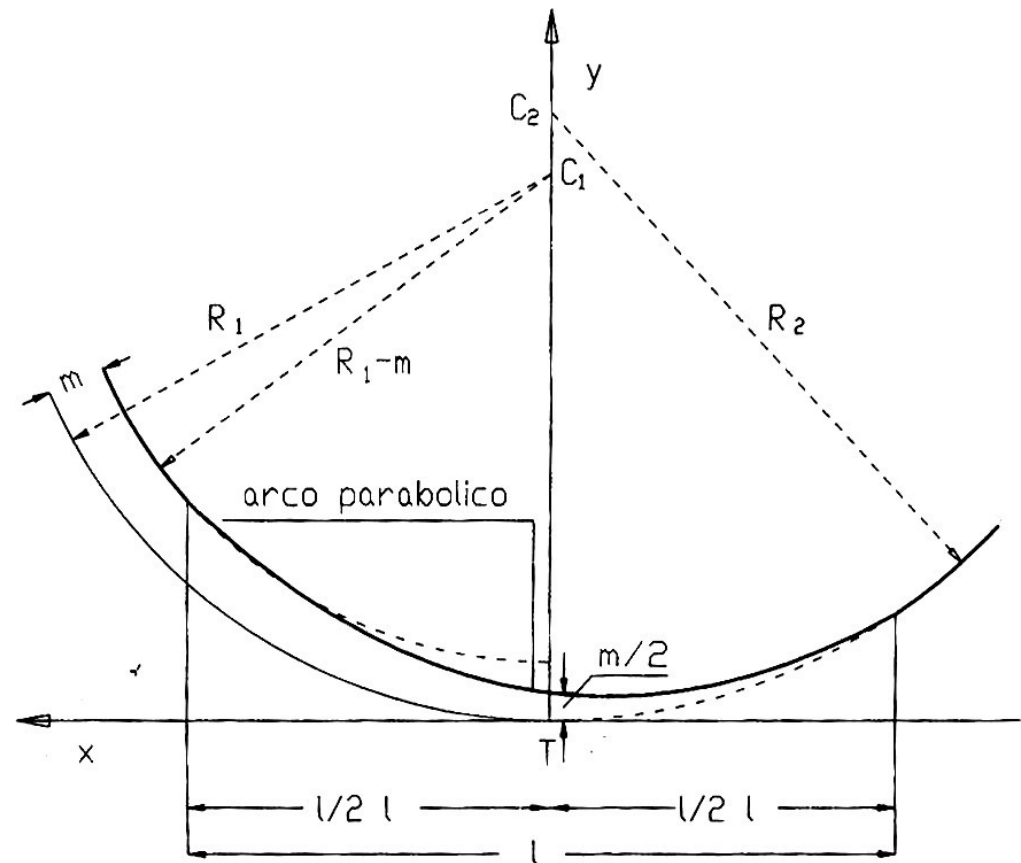


RACCORDI PLANIMETRICI

Raccordo curva-curve

L'introduzione di un raccordo di sopraelevazione intermedio impone la creazione di un raccordo parabolico che eviti brusche variazioni all'accelerazione centrifuga non compensata.

Imponendo al raccordo parabolico nel suo punto d'inizio la curvatura della prima curva componente la policentrica e nel punto di fine quella della seconda curva, il raccordo parabolico stesso si sviluppa a cavallo del punto di tangenza T , e la curva di raggio minore avrà una riduzione di raggio pari a:



RACCORDI PLANIMETRICI

Raccordo curva-curve

$$m = \frac{l^2}{24} \cdot \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Mentre il raccordo intermedio intercetta l'asse delle y a una distanza dall'origine pari ad $m/2$.

L'introduzione fra i due tratti di curva circolare componenti una policentrica di un raccordo parabolico della stessa lunghezza del raccordo di sopraelevazione permette una variazione lineare dell'accelerazione centrifuga non compensata, ma richiede lo spostamento m .

Nel caso in cui quest'ultimo sia incompatibile con punti fissi esistenti di una linea in esercizio, la lunghezza del raccordo parabolico dovrà essere determinata in funzione del valore massimo accettabile di m e il raccordo di sopraelevazione entrerà nei due tratti di curva circolare avendo attribuito al punto di mezzo del raccordo parabolico la sopraelevazione:

$$h_m = \frac{h_1 + h_2}{2}$$



RACCORDI PLANIMETRICI

Raccordo curva-curve

L'andamento dell'accelerazione centrifuga non compensata sarà sempre lineare, essendo tale sia la variazione della sopraelevazione che quella della curvatura nel raccordo parabolico intermedio, **ma presenterà due discontinuità e altrettanti cambiamenti di segno delle pendenze in corrispondenza di punti inizio e fine del raccordo parabolico stesso.**

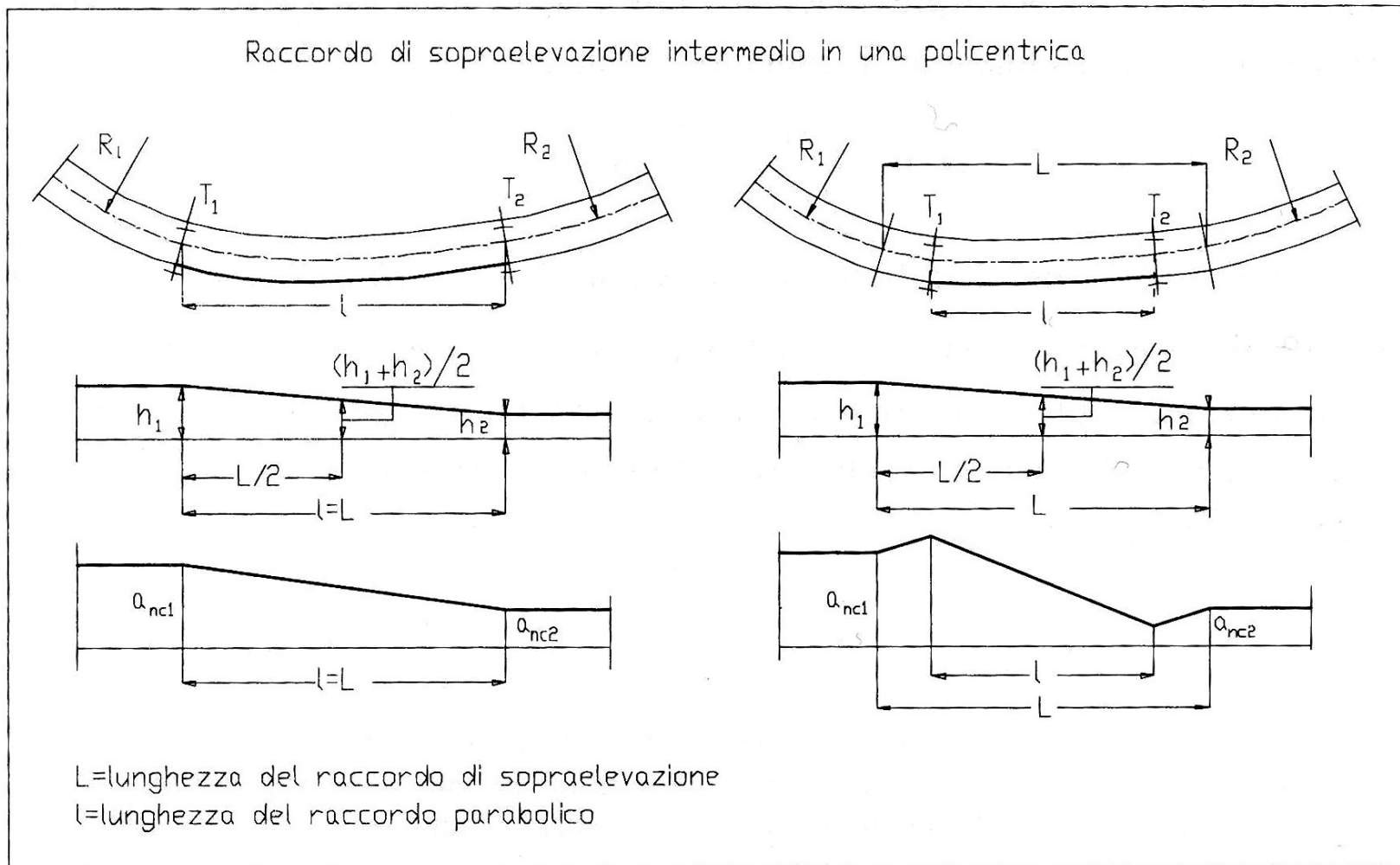
Le verifiche dei valori di c e ω dovranno essere effettuate sia nei tratti in cui il raccordo parabolico coesiste con il raccordo di sopraelevazione che nei tratti in cui esso entra nelle curve circolari.

Presentandosi tale necessità nel tratto intermedio, essa si ripresenterà anche all'ingresso e all'uscita della policentrica dove sarà ancora necessario far entrare il raccordo di sopraelevazione nel tratto di curva circolare, essendo da evitare il suo attestamento nel punto di fine raccordo parabolico per l'inversione di segno che subirebbe l'accelerazione in corrispondenza del punto di inizio del raccordo parabolico.



RACCORDI PLANIMETRICI E DI SOPRELEVAZIONE

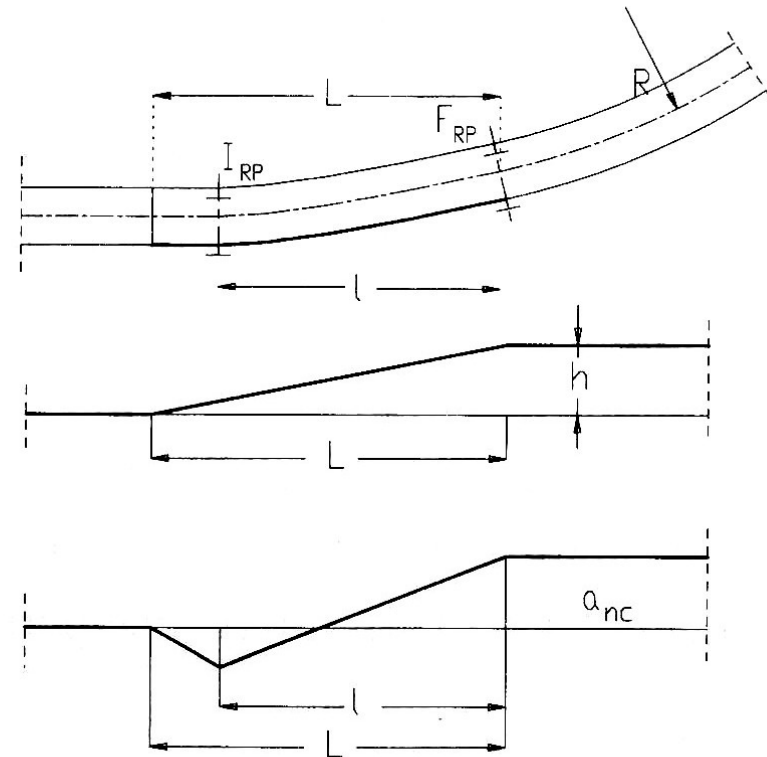
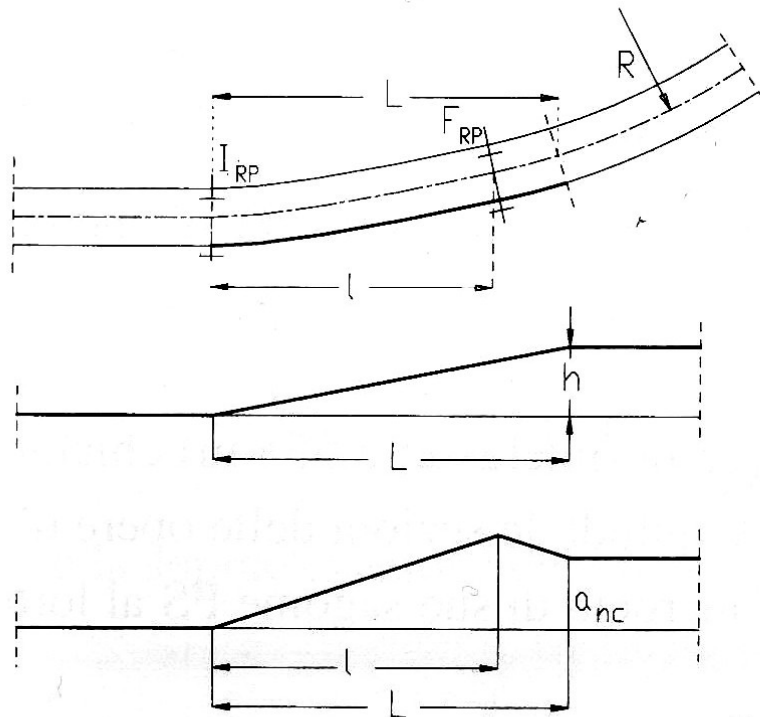
Raccordo curva-curva



RACCORDI PLANIMETRICI E DI SOPRELEVAZIONE

Raccordo rettifilo-curva

Raccordo di sopraelevazione non coincidente con il raccordo parabolico
 L =lunghezza del raccordo di sopraelevazione l =lunghezza del raccordo parabolico





RACCORDO DI SCARTAMENTO

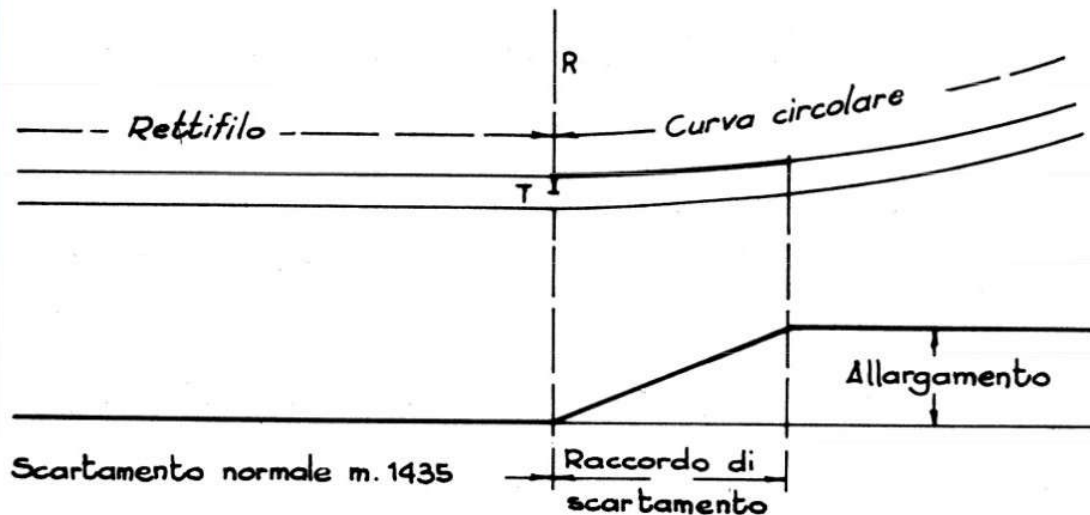
Lo scartamento nelle linee ordinarie è di 1435 mm. Nelle curve di raggio inferiore a 485 m take scartamento aumento fino ad un massimo di 1465 mm. Il raccordo tra lo scartamento in rettilo e quello nelle curve con sovrascartamento si realizza in modo diverso a seconda che esista o meno un raccordo di transizione.

Inoltre, la variazione di scartamento lungo il raccordo di scartamento segue queste condizioni:

- incremento di 1mm ogni ml per linee con $V \geq 70$ Km/h
- incremento di 2mm ogni ml per linee con $V < 70$ Km/h
- incremento di 3mm ogni ml eccezionalmente per linee secondarie con $R < 300$ m.

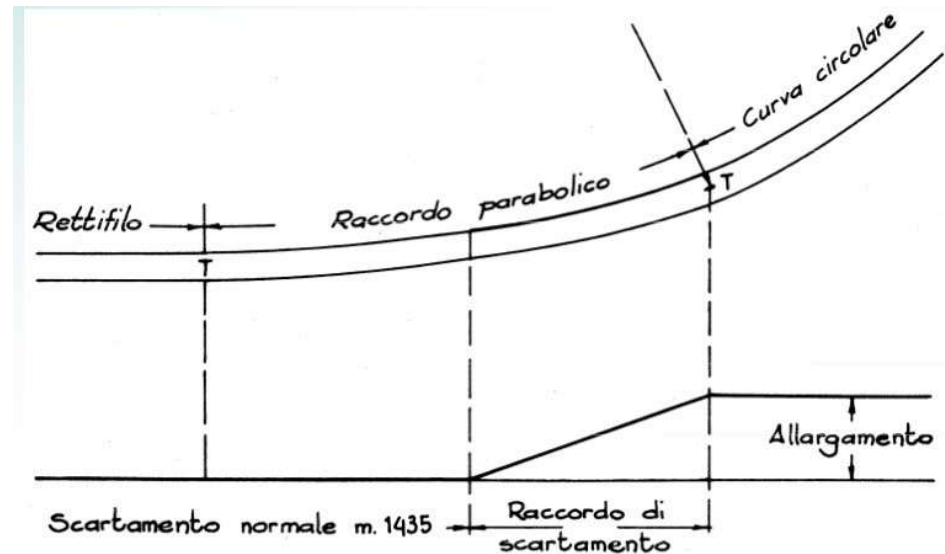


RACCORDO DI SCARTAMENTO

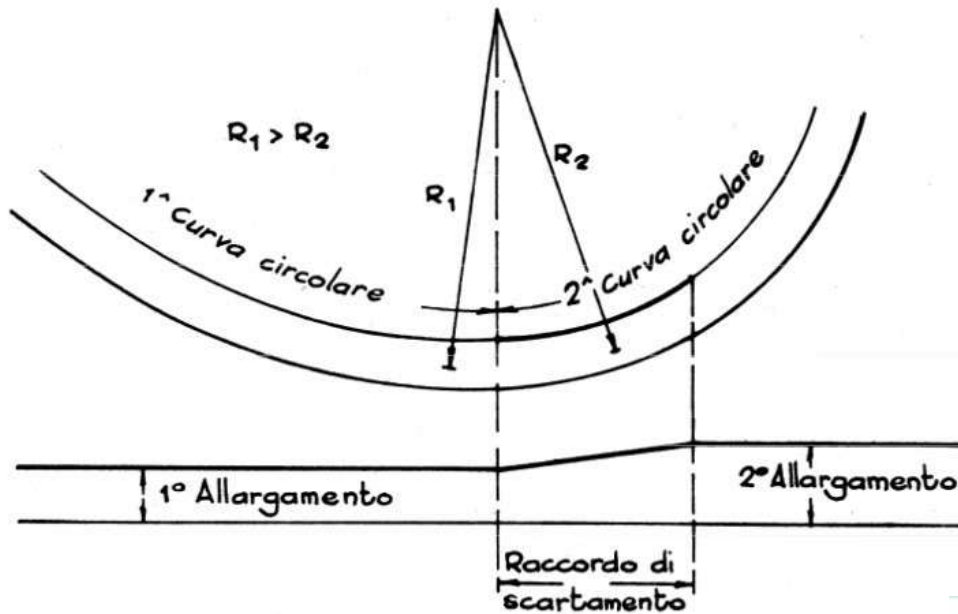


Nelle curve **senza raccordo di transizione** il raccordo di scartamento si realizza nel tratto in curva immediatamente adiacente il punto di tangenza con il rettifilo.

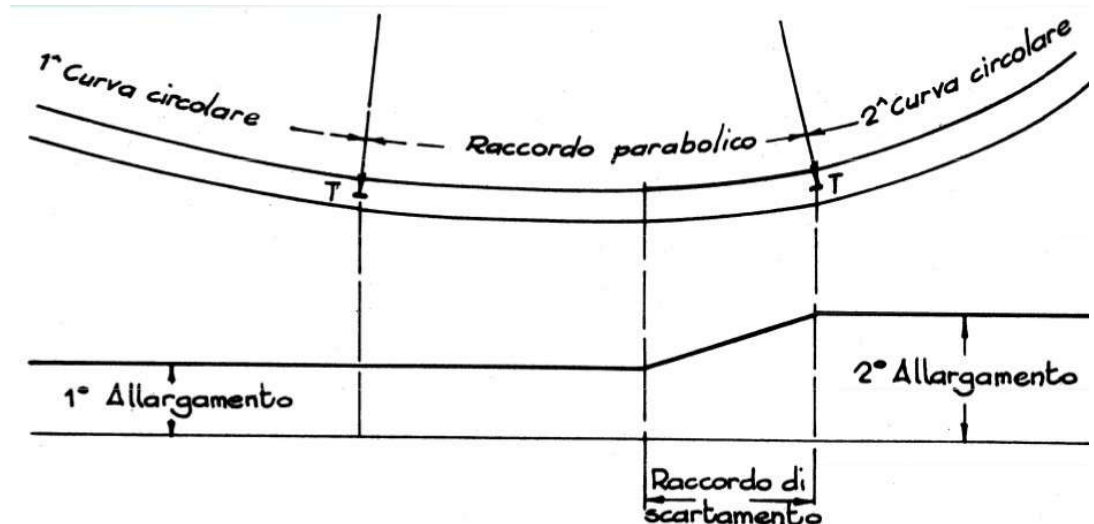
Nelle curve **con raccordo di transizione** il raccordo di scartamento si realizza sul tratto di raccordo parabolico immediatamente precedente la curva.



RACCORDO DI SCARTAMENTO



Nelle curve policentriche **con** **raccordo intermedio** il raccordo di scartamento si realizza sul tratto di raccordo parabolico immediatamente precedente il punto di tangenza con la curva di raggio minore





Andamento altimetrico del tracciato ferroviario



ANDAMENTO ALTIMETRICO

Nel piano verticale, il tracciato Ferroviario è costituito da **livellette**, definite univocamente tramite la loro lunghezza e pendenza, e da **raccordi circolari**.

In ambito europeo vengono impiegate **pendenze** fino al 35‰ per linee specializzate per soli treni viaggiatori a composizione bloccata e fino al 12,5‰ per linee promiscue di treni viaggiatori e treni merci.

Tuttavia il sistema promiscuo di **alta velocità italiano** accetta **pendenze fino al 18‰** allo scoperto e **15‰** in galleria. In presenza di stazioni ed impianti la pendenza massima ammessa è pari **al 1,2 ‰**, mentre in presenza di fermate è consigliato avere valori inferiori al **10‰**.

Gli sviluppi di ogni singola livelletta, al netto dei raccordi altimetrici, non devono essere inferiori a:

$$L_l = \frac{V}{1,8} \quad [\text{m}]$$

con il minimo di 30 m per assicurare una percorrenza di almeno 2 sec.



ANDAMENTO ALTIMETRICO

I raggi degli archi circolari che raccordano due livellette consecutive vengono dimensionati in maniera da contenere l'accelerazione centrifuga del veicolo nel piano verticale.

Nella rete Ferroviaria Nazionale esistente il raggio verticale normalmente realizzato è pari a **3000 m**, equivalente, per una velocità V di 200km/h, ad un'accelerazione centrifuga di **1.03m/s²**.

Tale valore è oggi incompatibile con un accettabile livello di comfort anche per velocità inferiori ai 200km/h, per cui si impiega un raggio pari a:

$$R_V = \frac{V^2}{2} \quad [\text{m}]$$

che, per velocità di **200 km/h**, produce un'**accelerazione centrifuga** di **0.15m/s²**.





Geometria del binario





GEOMETRIA DEL BINARIO

La geometria del binario è determinata da specifici parametri definiti dalla normativa EN 13848 - 1:2003+A1:2008, "Railway applications / Track geometry quality – Part 1:Characterisation of track geometry".

La qualità della geometria del binario è descritta attraverso un sistema cartesiano di coordinate centrato sul binario e così definito:

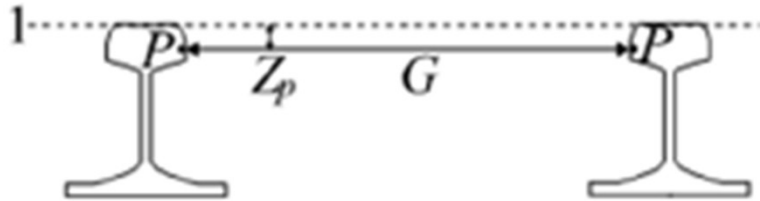
- asse-X: estensione del binario lungo la direzione di marcia;
- asse-Y: asse parallelo alla superficie di rotolamento;
- asse-Z: asse perpendicolare alla direzione di marcia con verso diretto verso il suolo.

I parametri geometrici sono i seguenti:

- SCARTAMENTO
- ALLINEAMENTO
- LIVELLO LONGITUDINALE
- LIVELLO TRASERSALE
- SGHEMBO

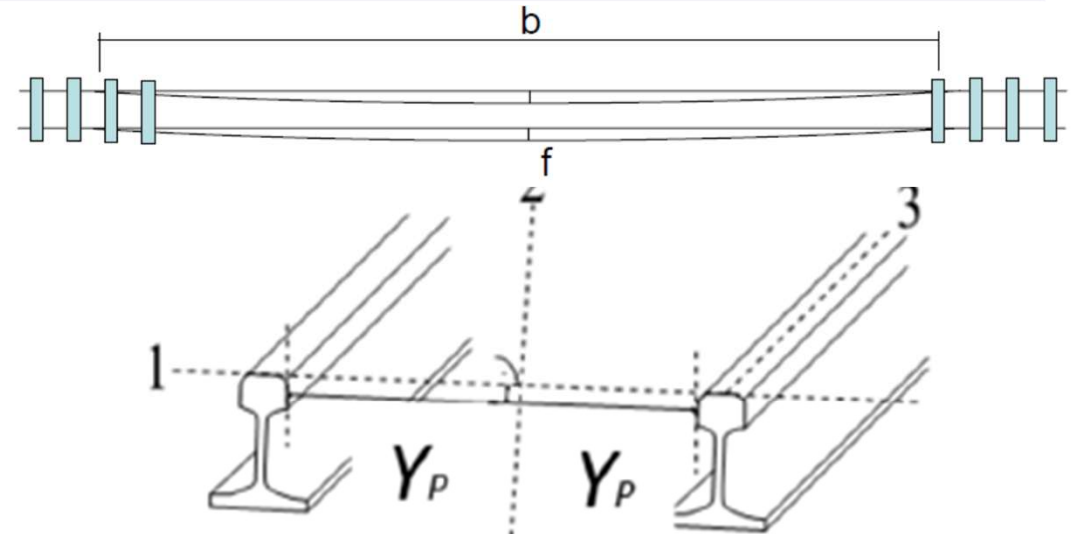


SCARTAMENTO E ALLINEAMENTO



1 - Running surface

- **Scartamento (Gauge)**, distanza tra le due rotaie misurata 14 mm al di sotto del piano di rotolamento



1 - Running surface

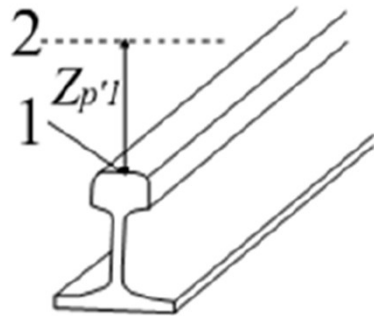
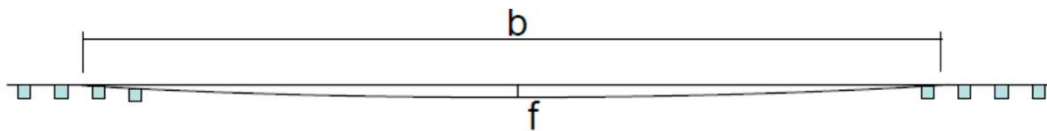
2 - Track centre

3 - Axis of running surface

- **Allineamento (Alignment)**, la geometria della linea centrale del binario proiettata sul piano orizzontale longitudinale

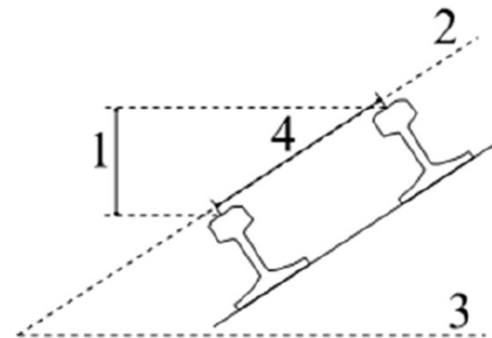
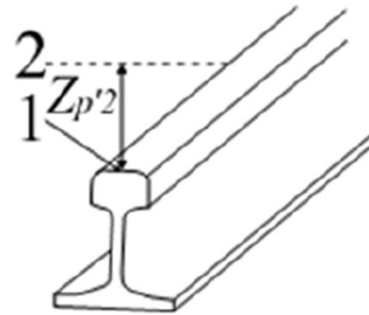


LIVELLO LONGITUDINALE E LIVELLO TRASVERSALE



1 - Track centre

2 - Reference line



1 - Cross level

2 - Running surface

3 - Horizontal reference plane

4 - Axis-to-axis distance

- **Livello longitudinale (Longitudinal level)**, la geometria della linea centrale del binario proiettata sul piano verticale longitudinale

- **Livello trasversale (cross level)**, la differenza di elevazione (altezza) tra la superficie superiore delle due rotaie



LIVELLO TRASVERSALE

Si definisce **livello trasversale** la pendenza trasversale del binario espressa come differenza di quota tra le due rotaie misurata normalmente al binario.

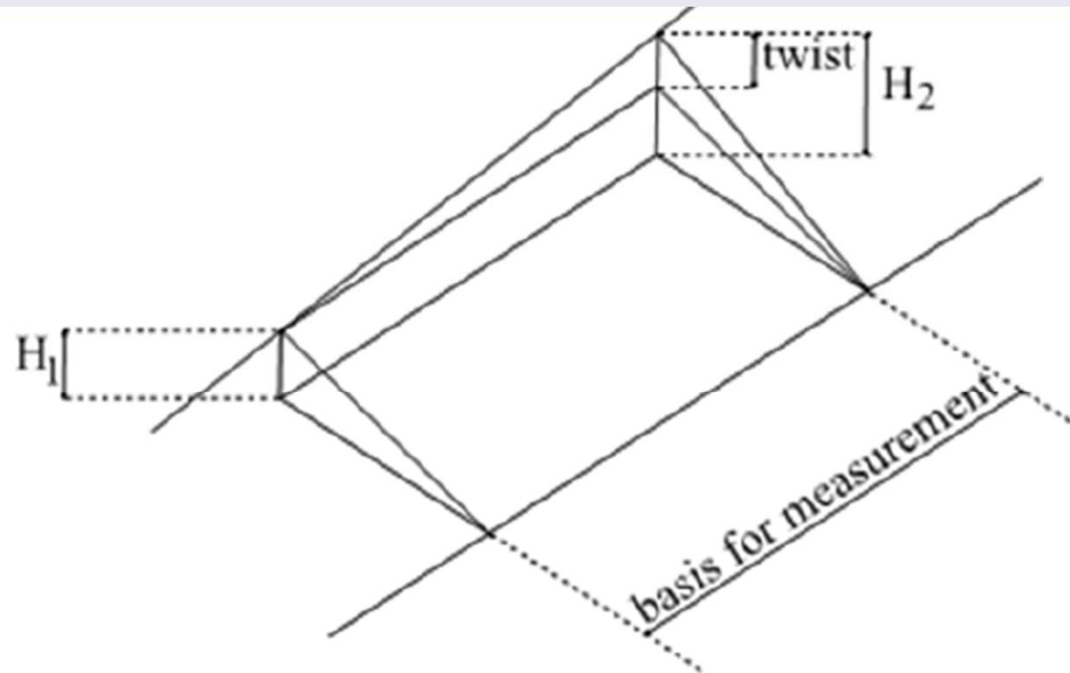
Il livello trasversale è nullo in rettilineo e diverso da zero in curva.

Le tolleranze del livello trasversale per linee con velocità inferiore a 200 Km/h sono:

- 2‰ , pari a 3 mm, tra le rotaie in caso di nuove costruzioni;
- $3,33\text{‰}$, pari a 5 mm, tra le rotaie per linee in esercizio.

Per le linee AV/AC si consiglia di ridurre le tolleranze a $0,66\text{‰}$ (pari a 1mm) per le nuove costruzioni e a $1,33\text{‰}$ (pari a 2 mm) per linee in esercizio.





1- Basis for measurement

- **Sghembo (Twist)**, la differenza di elevazione (altezza) tra la superficie superiore delle due rotaie...

LO SGHEMBO

In rettifilo ed in piena curva circolare le rotaie di un binario giacciono sullo stesso piano o su una superficie troncoconica; in ogni caso possono essere assimilate a due rette parallele.

Fuori da queste due configurazioni le rotaie non giacciono più su uno stesso piano e quindi sono assimilabili a due rette sghembe.

Si definisce **SGHEMBO** la variazione lungo l'asse del binario della pendenza trasversale e si esprime come differenza di livello trasversale misurata su una determinata distanza:

$$\gamma = \frac{h_1 - h_2}{l} \text{ ‰}$$

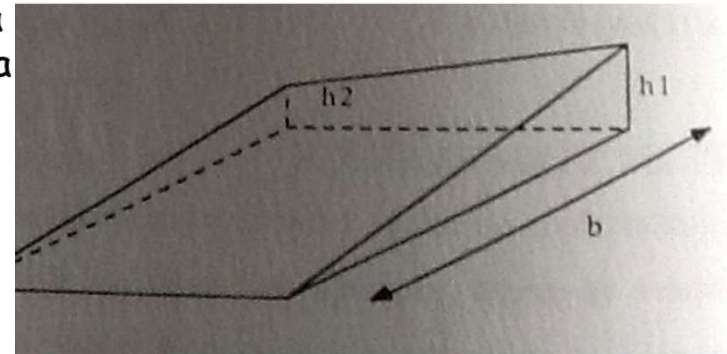
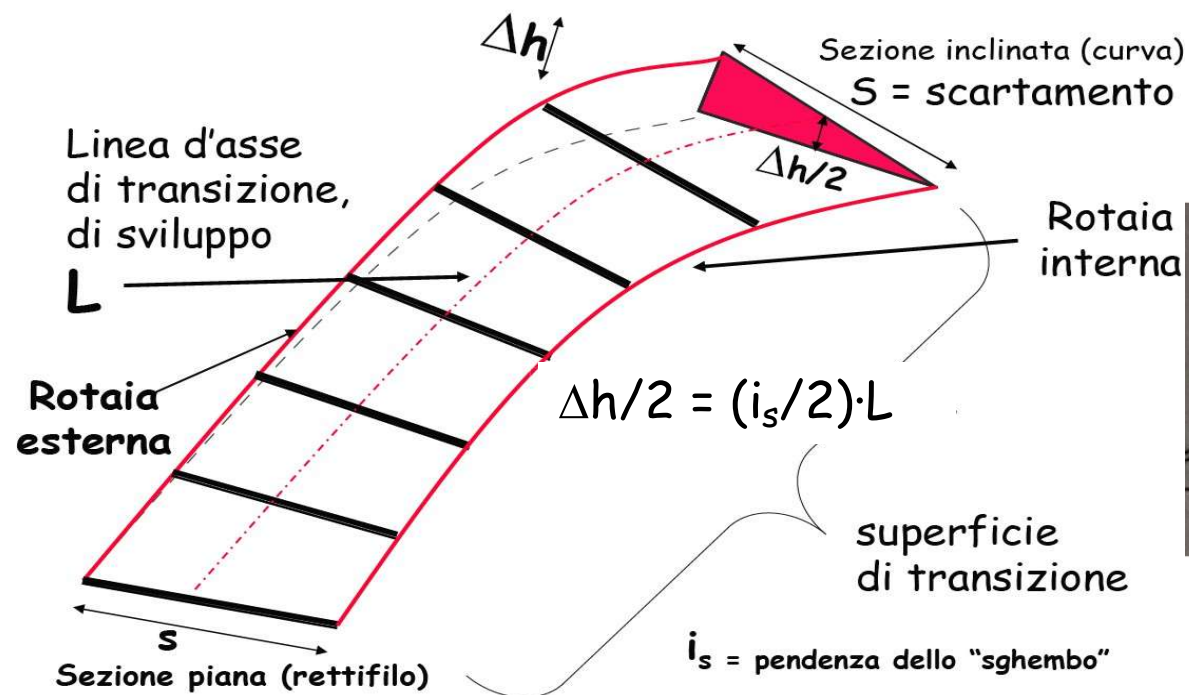
h_1 e h_2 sono i livelli trasversali misurati in corrispondenza dei punti 1 e 2

l è la distanza tra i punti 1 e 2



LO SGHEMBO

Tratto di binario sghembo (schema)





LO SGHEMBO

Per quanto detto la configurazione a rette sghembe dei binari è una configurazione imposta fuori dai tratti a curvatura costante (rettifili e curva circolari) in tal caso si parla di ***sghembo di costruzione***.

Negli altri casi si tratta invece di un ***difetto del binario***.

Lo sghembo è la grandezza più significativa ai fini della sicurezza della circolazione e del vincolo ruota-rotaia.

In presenza di sghembo i quattro punti di contatto ruota-rotaia, di un carrello o di un carro, non coincidono perfettamente: una ruota delle quattro (perché tre punti sono sicuramente su un piano) tende prima a scaricarsi, man mano che lo sghembo aumenta, poi a sollevarsi fino ad innescare il sormonto del bordino rispetto al piano di rotolamento della rotaia per poi arrivare allo svio della ruota e di conseguenza del veicolo.



LO SGHEMBO

In RFI esiste un'unica tolleranza dello sghembo, comprensivo dello sghembo di costruzione, che è del 3 ‰ misurato su una base di 1 [m] e a binario scarico.

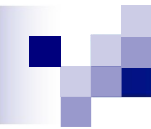
A binari carico, lo sghembo comprensivo della pendenza di rampa è:

Base di riscontro l espressa in [m]	3	6	9	15	20
Valore massimo dello sghembo in ‰	6,50	5,50	4,50	3,70	3,40

Per il calcolo dello sghembo su basi diverse, a binario carico, si interpolano i valori, in tabella, linearmente.

In occasione dei lavori di livellamento (manutenzione del binario) viene mantenuto, a binario scarico, il valore di tolleranze del 3 ‰ sulla base di 1 metro (comprensivo dello sghembo di costruzione).





LO SGHEMBO

A binario carico e sulla base di 3 metri la misurazione dello sghembo, effettuata con convogli rilevatori (tipo Archimede), il limite di accettabilità, è fissato in:

$(1 + \gamma_c) \text{ ‰}$ senza deprezzamento della lavorazione

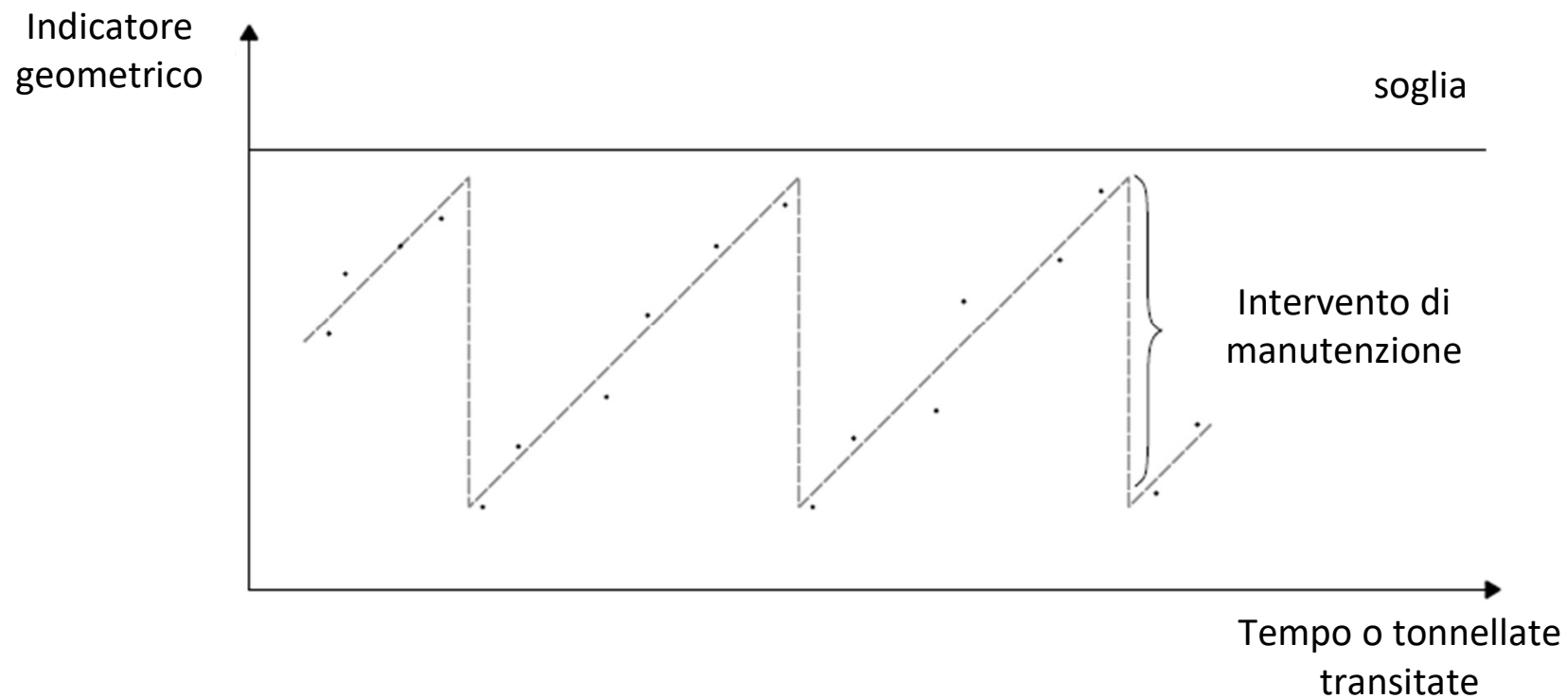
$(5/3 + \gamma_c) \text{ ‰}$ con deprezzamento della lavorazione

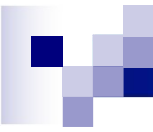
dove:

con γ_c si indica lo sghembo di costruzione.



MANUTENZIONE DEL BINARIO





MANUTENZIONE DEL BINARIO

Sono individuati tre livelli di qualità del binario:

- **Soglia di allerta**, quando questo valore viene superato, si dovrebbe prestare maggiore attenzione al rispettivo difetto, ma non sono richieste misure immediate.
- **Soglia di intervento**, quando questo valore viene superato, è richiesta un'azione di manutenzione a breve termine, ma le operazioni del treno non vengono immediatamente influenzate.
- **Limite di intervento immediato**, quando questo valore viene superato, non è più auspicabile mantenere la velocità di traffico programmata e devono essere intraprese azioni immediate per garantire la sicurezza.

