

Insegnamento di Progetto di Infrastrutture viarie

Opere in terra

Caratteristiche di un terreno

Compressibilità e costipamento delle terre

Portanza sottofondi e fondazioni stradali

Instabilità del corpo stradale

Gallerie

Sovrastrutture stradali

Materiali e miscele stradali

Sovrastrutture stradali

Cenni di calcolo delle sovrastrutture

Sovrastruttura ferroviaria

Impianti stradali

Aree di sosta

Progetto di Infrastrutture viarie

Sovrastruttura ferroviaria

L'infrastruttura ferroviaria è caratterizzata dalla *sovrastruttura* e dalle *opere civili* (*rilevati, trincee, gallerie, viadotti e ponti, ecc.*), che differiscono da quelle di un'infrastruttura stradale più per gli *standard progettuali* che per gli *aspetti costruttivi*.

In questa sede non tratteremo gli *aspetti piano-altimetrici* di una linea ferroviaria caratterizzata da una successione di rette e curve (circolari e di transizione) sia sul piano orizzontale che su quello verticale. Affronteremo invece alcune questioni che riguardano solo la sovrastruttura ferroviaria: *geometria del binario, armamento ferroviario, apparecchi del binario, dimensionamento della sovrastruttura*, ma non la *progettazione del binario, la termica del binario ed il rumore e le vibrazioni*.

La geometria interna del binario, che individua la posizione reciproca dei suoi elementi, è rappresentata dallo *scartamento* e dallo *sghembo*. E' altresì importante la posizione del binario nei confronti del piano su cui si appoggia il tracciato.

Tale assetto e l'utilizzo di curve di transizione, tra rettifili e curve circolari, conferisce sicurezza e confort alla circolazione ferroviaria e permette di mantenere l'assetto geometrico di progetto sia del binario che del corpo stradale, riducendo i costosi e frequenti interventi manutentivi.

⁽¹⁾ G. Bono - C. Focacci - S. Lettieri - P. Lanni, "La sovrastruttura ferroviaria", CIFI, ROMA, 1997.

Progetto di Infrastrutture viarie

Geometria del binario

Prima di trattare le singole caratteristiche geometriche del binario, occorre ricordare che le misure che le caratterizzano sono soggette a *tolleranze* (coppia di valori in più o meno), che ne definiscono gli scostamenti accettabili (in eccesso ed in difetto).

Presso le reti ferroviarie si parla di tolleranze:

- di *costruzione* scostamenti dal valore teorico accettabili nella posa a nuovo,
- di *manutenzione* scostamenti dal valore teorico accettabili a seguito di un intervento manutentivo,
- di *esercizio* scostamenti che mantengono livelli di qualità della circolazione,
- di *sicurezza* scostamenti superati i quali si entra nel campo della pericolosità.

Le tolleranze di manutenzione sono quindi meno restrittive di quelle di costruzione (per tener conto dell'inevitabile usura dei componenti del binario sottoposti alle azioni dell'esercizio).

Le differenze tra tolleranze di costruzione e tolleranze d'esercizio rappresentano le modifiche che possono subire le caratteristiche geometriche (per effetto delle azioni indotte dall'esercizio prima che sia necessario un intervento manutentivo).

Si ricorda che, essendo il binario è una struttura complessa, occorre prestare molta attenzione a che le tolleranze di fabbricazione, come quelle di montaggio, siano economicamente equilibrate fra di loro al fine di evitare interventi grossolani che pregiudichino lavorazioni fini e viceversa.

I margini di sicurezza sono ampi e si riducono solo in presenza di forte degrado sia del binario che del veicolo.

In particolare parleremo di: *scartamento*, *livello trasversale*, *sopraelevazione*, *velocità*, *sghembo*, *livello longitudinale* ed *allineamento*, *curve di transizione*, *policentriche*, *intervia* ed *interasse*.

Scartamento

Lo *scartamento* è definito come la distanza fra fianchi interni dei funghi delle due rotaie costituenti il binario, misurata normalmente all'asse del binario, alla quota di 14 mm al di sotto del piano di rotolamento. Si ricorda che la funzione di guida che il binario esercita sul veicolo, si realizza appunto tramite il contatto fra bordino della ruota ed il fianco interno del fungo della rotaia. Il valore che contraddistingue lo scartamento "normale" (ormai universalmente adottato) è di 1435 mm; esistono anche scartamenti diversi: inferiori di 597 mm, di 1,067 mm (metrico) e superiori di 1,668 mm.

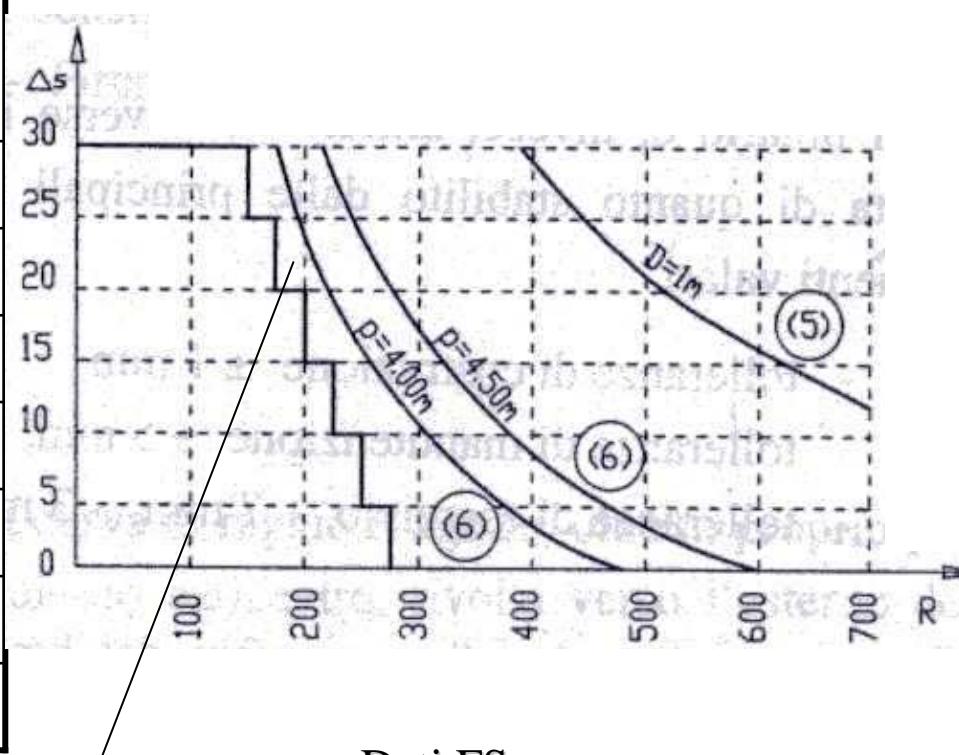
In Italia lo scartamento adottato, quello di 1,435 mm (normale), subisce in curva un allargamento nelle curva di raggio inferiore ai 275 m; in figura 1 si riporta l'allargamento dello scartamento in curva sia per FS che secondo H. Deyl.

Presso le FS allo scartamento teorico sono attribuite *tolleranze di costruzione* -1 mm, +2 mm (per linee AV/AC -2 mm, +7 mm) e *tolleranze di esercizio* -2 mm, +7 mm (per tratti a scartamento di 1,465 mm -2 mm, +5 mm). Tra una traversa e la successiva non vi deve essere una differenza di scartamento non maggiore di 1 mm. L'allargamento va ottenuto modificando la posizione planimetrica della rotaia interna di 1 mm/m e va localizzato lungo il raccordo parabolico (se è presente la curva di transizione) o a cavallo tra rettilineo e curva circolare (se non è presente la curva di transizione).

Progetto di Infrastrutture viarie

Allargamento dello scartamento in curva

Raggio della curva		Scartamento
da metri	a metri	mm
al di spora di 275		1435
< 275	250	1440
< 250	225	1445
< 225	200	1450
< 200	175	1455
al di sotto di 150		1465



Progetto di Infrastrutture viarie

Livello trasversale

Si definisce *livello trasversale* la pendenza trasversale del binario espressa come differenza di quota tra le due rotaie misurata normalmente al binario (pertanto tale livello è nullo in rettilineo e diverso da zero in curva). Le rispettive tolleranze per linee con velocità inferiore a 200 Km/h: di costruzione di 3 mm e di esercizio di 5 mm (per linee AV/AC si consiglia di ridurre tali tolleranze di 1 mm).

Progetto di Infrastrutture viarie

Sopraelevazione

Su un veicolo che percorre una curva di raggio R agisce, oltre al peso proprio, una forza orizzontale, detta *forza centrifuga*, applicata al suo baricentro, rivolta verso l'esterno della curva di valore:

$$F_c = P / g \times V^2 / R$$

Trascurando l'effetto ribaltante (per curva di 250 m di raggio, occorrerebbe che un veicolo normale, con baricentro alto 1,20 m, viaggiasse a 148 Km/h !), tale forza centrifuga può provocare lo svio (per superamento della rotaia esterna da parte del bordino), sollecita trasversalmente il binario (può provocare lo slineamento del binario), è causa del consumo del fianco del fungo e limita il confort di viaggio. A tale forza pertanto deve essere assegnato un tetto fissando un limite a_c all'accelerazione che, per le FS, vale: 0,6 m/s² per treni pesanti (rango A), 0,8 m/s², per treni viaggiatori formati da materiale leggero, tipo elettro/auto motrici (rango B), 1 m/s² per treni viaggiatori composti da materiale con elevata stabilità e bassa aggressività sul binario (rango C), 1,8 m/s² per treni viaggiatori composti da materiale con elevata stabilità e bassa aggressività sul binario, tipo Pendolino (P). Nella linea del Tokaido (J) si è scelto un valore di 0,4 m/s².

Porre un tetto ad a_c equivale a limitare la velocità: $V = 3,6 (a_c \times R)^{1/2}$ [Km/h] ovvero ad aumentare il raggio irrigidendo il tracciato. In figura 2 si danno i valori di velocità massima in assenza di sopraelevazione. Occorre pertanto assegnare al binario (rotaia esterna) una *sopraelevazione* $h = (s / g) (V^2 / R) = 11,8 V^2 / R$ [mm]. In figura 3 si riporta tale soprelevazione in curva. Se poi si accetta che sul veicolo continui ad agire una componente orizzontale di *accelerazione non compensata* a_{nc} si ha: $h = 11,8 V^2 / R - j$ [mm], dove j rappresenta il *difetto di sopraelevazione* e vale $(s / g) a_{nc}$. In figura 4 sono riportati i difetti di sopraelevazione in funzione dell'accelerazione centrifuga non compensata. In realtà non esiste un solo valore di velocità, ma più valori (V_{max} e V_{min}). La massima sopraelevazione per le FS è di 160 mm.

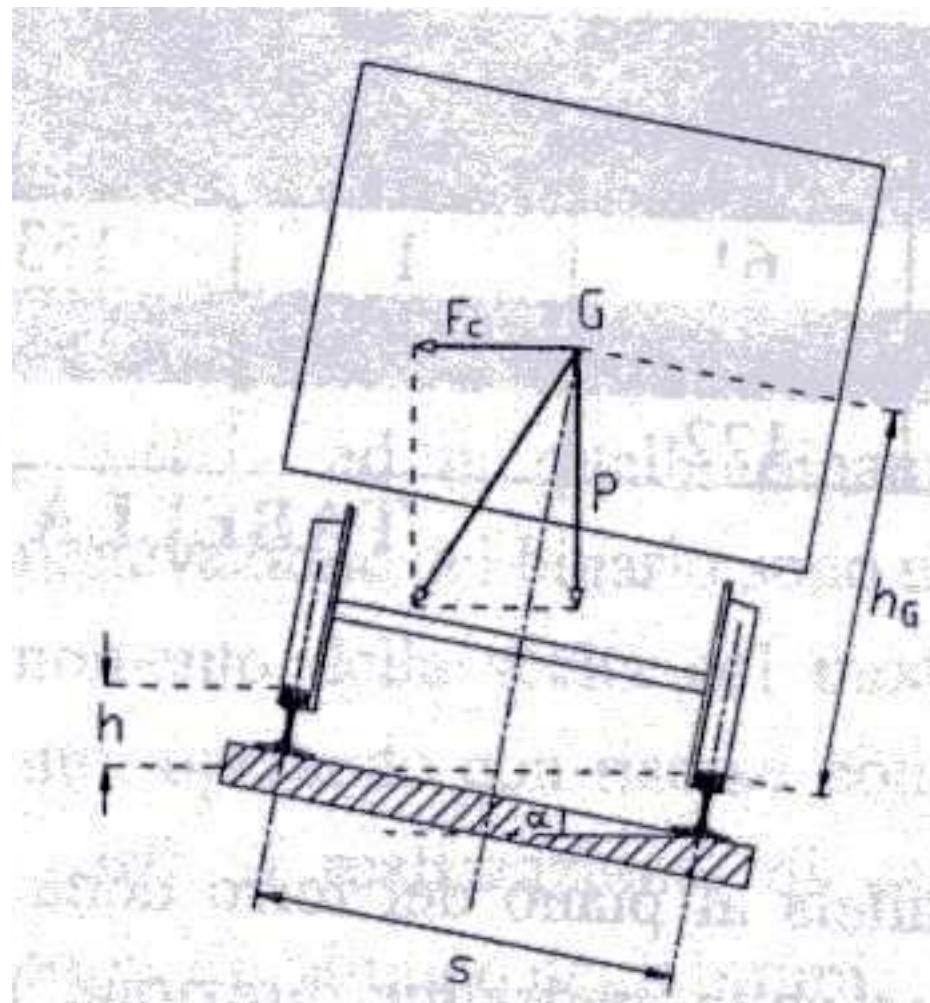
Progetto di Infrastrutture viarie

**Valori di velocità massima
in assenza di sopraelevazione**

a_c [m/s ²]	V [Km/h]
0,4	2,27 √ R
0,6	2,77 √ R
0,8	3,22 √ R
1	3,60 √ R
2	4,83 √ R

Progetto di Infrastrutture viarie

Soprelevazione in curva



Progetto di Infrastrutture viarie

**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

Progetto di Infrastrutture viarie

Differenti concetti di velocità 1

Presso le FS sono in uso differenti concetti di velocità:

- *limite* è la velocità alla quale viene percorsa una curva di raggio R , dotata della massima sopraelevazione, che determina un'accelerazione non compensata a_{nc} ; vale $4,62 R^{1/2}$.
- di *tracciato*, relativa ad un tratto di linea (per le FS non inferiore a 2000 m) dove coesistono rettilini e curve di raggio diverso, è la velocità limite della curva di raggio più piccolo (R_{min}) e vale $4,62 R_{min}^{1/2}$. Tale curva sarà dotata della massima sopraelevazione (160 mm) e su di essa si manifesterà l'accelerazione non compensata massima ($0,6 \text{ m/s}^2$); per soprelevazioni inferiori l' $a_{nc} = 0,6 (h / 160) [\text{m/s}^2]$.
- di *rango* sono velocità riferite ai valori di a_{nc} rispettivamente di $0,6 \text{ m/s}^2$ (A), $0,8 \text{ m/s}^2$ (B), 1 m/s^2 (C), $1,8 \text{ m/s}^2$ (P) i cui valori valgono rispettivamente:

$$V_A = 4,62 R_{min}^{1/2}; V_B = 4,89 R_{min}^{1/2}; V_C = 5,15 R_{min}^{1/2}; V_P = 6,07 R_{min}^{1/2}.$$

Le prime tre velocità di rango così calcolate sono pari a: $V_A = 160 \text{ Km/h}$, $V_B = 170 \text{ Km/h}$, $V_C = 180 \text{ Km/h}$, non risultano in armonia con quelle fissate dalle FS rispettivamente: $V_A \leq 140 \text{ Km/h}$, $V_B \leq 160 \text{ Km/h}$, $V_C \leq 200 \text{ Km/h}$. In effetti tali valori sono stati fissati, non in base a considerazioni sulla cinematica di marcia derivante dalla geometria del binario, ma in base alle caratteristiche del materiale rotabile.

(segue)

Differenti concetti di velocità 2

(seguito)

- di *fiancata* è la massima velocità con la quale un treno può percorrere un tratto di linea di determinate caratteristiche costruttive e stato di manutenzione. In particolare per le FS, tale dipendenza è dovuta: al tipo ed alle condizioni dell'armamento (l'armamento UNI 50 limita la V_C a 160 Km/h), allo stato del corpo stradale, all'idoneità delle opere d'arte, alle caratteristiche degli impianti di trazione elettrica, al tipo di segnalamento, alla presenza di ostacoli ineliminabili, alle caratteristiche della circolazione.
- di *orario* è la velocità alla quale viene impostata la marcia dei treni e risulta inferiore o uguale alla velocità di fiancata.

Progetto di Infrastrutture viarie

Sghembo

Quando il binario non giace su di un piano o su una superficie troncoconica, le rotaie assumono una configurazione di due rette sghembe. In questo caso, si definisce *sghembo* la variazione lungo l'asse del binario della pendenza trasversale come differenza di livello trasversale misurata su di una distanza prefissata (base di misurazione), cioè $y = (h_1 - h_2) / l$ [%]. La configurazione a rette sghembe del binario è voluta quando esso non si trova né in rettilineo, né in curva circolare: in questo caso lo *sghembo di costruzione* è una caratteristica geometrica del binario. Negli altri casi è causato da un'alterazione del progetto e costituisce un difetto del binario. Un valore dello sghembo quindi è determinato se si fissa la base di misurazione.

Lo sghembo pertanto è la grandezza più delicata ai fini della stabilità dell'accoppiamento veicolo-binario e per questa ragione in passato le FS fissano un suo valore assoluto 3 mm/m su una base di 1 m a binario scarico (non veniva indicata tolleranza d'esercizio⁽¹⁾). Recentemente le FS hanno graduato tale limite collegandolo alla base sulla quale lo sghembo viene misurato, indicando i seguenti valori a binario carico: base di 3 m 6,5 %, base di 6 m 5,5 %, base di 9 m 4,5 %, base di 15 m 3,7 %, base di 20 m 3,4 % (per il calcolo dello sghembo su basi diverse si interpola linearmente). Contemporaneamente sono stati fissati:

- limiti d'accettazione del livellamento⁽²⁾: su base di 1 m e per binario scarico il 3 % (comprensivo dello sghembo di costruzione) e per binario carico e su base di 3 m $1 + \gamma_c$ % o $5/3 + \gamma_c$ % se senza/con svalutazione del lavoro (γ_c rappresenta lo sghembo di costruzione).
- limiti per binari in lavorazione (sui quali è stato istituito un rallentamento: sono misurati a binario scarico e valgono 5 % su base di 3 m e su base 6 m il 3 % (per $\gamma_c \leq 2$ %) e il 4 % ($\gamma_c > 2$ %)).

⁽¹⁾ Altre reti ferroviarie fissano per lo sghembo la tolleranza di costruzione del 1 % e quella d'esercizio nel 2 %.

⁽²⁾ Il livellamento è l'operazione di manutenzione del binario volta a ripristinare una corretta geometria e una sua capacità portante.

Livello longitudinale ed allineamento

Si definisce *livello longitudinale* la posizione altimetrica del binario individuata dalla generatrice di rotolamento. (per linee a semplice binario coincide con l'andamento altimetrico dell'asse della linea). Si esprime misurando la freccia rilevata su di una determinata base.

Si definisce *allineamento* la posizione planimetrica del binario ed è individuato, in rettilineo, dalle generatrici di guida di ambedue le rotaie, mentre in curva dalla generatrice di guida della rotaia esterna. Si esprime misurando la freccia rilevata su di una determinata base.

Progetto di Infrastrutture viarie

Curve di transizione

Al fine di ottenere un accettabile confort di viaggio, viene introdotto: su un piano verticale un *raccordo di sopraelevazione* (per collegare i due tratti di binario con e senza sopraelevazione) e su un piano orizzontale una *curva di raggio variabile* (dal valore infinito del rettilineo a quello finito della curva circolare).

Per il dimensionamento del raccordo di sopraelevazione si prendono in considerazioni le grandezze: *contraccolpo* e *velocità di rollio*.

Per *contraccolpo* ψ s'intende la variazione della forza centrifuga non compensata a_{nc} nell'unità di tempo, cioè $\psi = V \times a_{nc} / 3,6 \times l$ [m/s³] dove l è la lunghezza del raccordo in m e V è la velocità costante in Km/h con cui viene percorso il raccordo. Il contraccolpo quindi misura la gradualità con cui entra in azione l'accelerazione centrifuga non compensata, cioè il confort che può ritenersi: *molto buono* per $\psi = 0,3$ m/s³, *buono* per $\psi = 0,45$ m/s³, *accettabile* per $\psi = 0,7$ m/s³ e eccezionalmente accettabile per $\psi = 0,85$ m/s³.

Si definisce *velocità di rollio* ω la velocità angolare con cui un veicolo, considerato rigido e di lunghezza trascurabile, ruota, attorno al punto di appoggio sulla rotaia bassa, su un piano perpendicolare alla direzione di moto, cioè $\omega = h \times V / 3,6 \times s \times l$ [rad/s] dove: h è la sopraelevazione in mm, V è la velocità costante in Km/h, s è la distanza tra i punti di appoggio delle ruote (1500 mm), l è la lunghezza del raccordo in m.

Si utilizza anche la *velocità di sollevamento* V_s che è la componente verticale della velocità con la quale si muove la ruota esterna percorrendo il raccordo di sopraelevazione, cioè $V_s = h \times V / 3,6 \times l$ [mm/s]. In generale le reti ferroviarie fissano il limite normale tra i 25 e i 60 mm/s; per le FS i limiti di ψ , ω e V_s sono dati in funzione di a_{nc} (per $a_{nc}=0,6$ m/s² : $\psi=0,25$ m/s³, $\omega=0,036$ rad/s e $V_s=54$ mm/s; per $a_{nc}=0,8$ m/s² : $\psi=0,35$ m/s³, $\omega=0,038$ rad/s e $V_s=57$ mm/s; per $a_{nc}=1$ m/s² : $\psi=0,4$ m/s³, $\omega=0,04$ rad/s e $V_s=60$ mm/s).

Progetto di Infrastrutture viarie

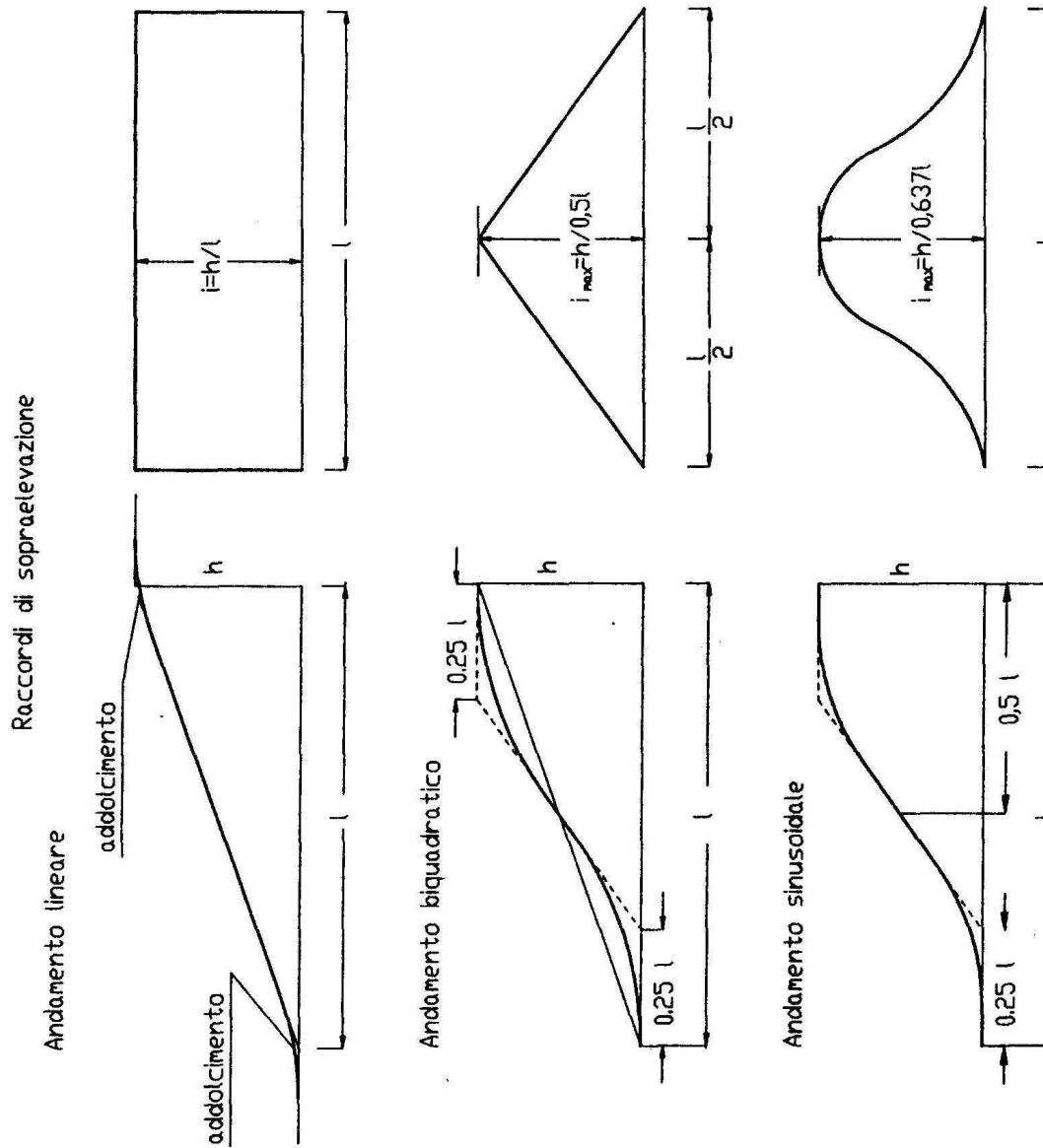
Raccordo di sopraelevazione

In figura 5 sono illustrate tre tipologie di raccordi di sopraelevazione: *lineare*: di pendenza $i = h / l$, per il quale si deve prevedere un addolcimento all'inizio ed alla fine del raccordo; per evitare bruschi cambiamenti di ψ e ω all'ingresso e all'uscita della curva di transizione si possono utilizzare quelli ad andamento: *biquadratico*: di pendenza $i = h / 0,5 l$ o *sinusoidale*: di pendenza $i = h / 0,637 l$, che però presentano un aumento della pendenza massima (a parità di lunghezza del raccordo).

Lungo il raccordo di sopraelevazione quindi la pendenza, il contraccolpo, la velocità di rollio e quella di sollevamento sono costanti ed acquistano i valori limiti prefissati.

Progetto di Infrastrutture viarie

Raccordi di sopraelevazione lineare, biquadratico e sinusoidale



Curva a raggio variabile

La definizione della forma e della lunghezza del raccordo di sopraelevazione rende obbligatoria la definizione della forma e della lunghezza del *raccordo planimetrico*.

Questo ha lo 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. Per questo scopo deve, nello stesso punto del raccordo di sopraelevazione, avere la stessa lunghezza e produrre un andamento lineare dell'accelerazione centrifuga.

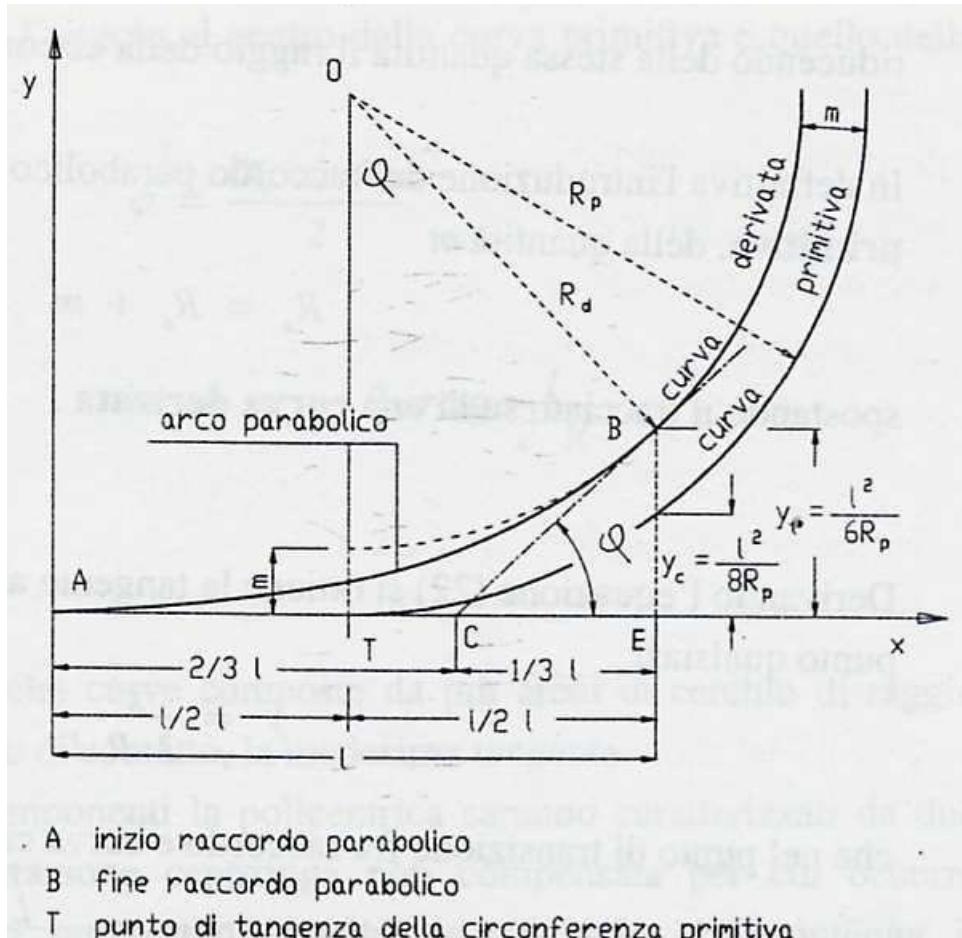
La curva che risponde a tali richieste è la *parabola cubica*⁽¹⁾ la cui equazione è: $y = x^3 / 6 \times R \times l$, dove l è la lunghezza del raccordo di sopraelevazione ed R è il raggio della curva circolare sulla quale il raccordo si attesta.

Tale curva quindi permette all'accelerazione centrifuga di variare in proporzione alla proiezione dell'ascissa curvilinea del raccordo sull'asse delle ascisse, con una semplificazione del tutto ininfluente sugli equilibri dinamici.

In figura 6 si illustrano del raccordo parabolico la curva primitiva e quella derivata.

⁽¹⁾ In realtà la parabola cubica non rispetta geometricamente le tre condizioni; le inesattezze indotte però sono praticamente accettabili.

Raccordo parabolico: curva primitiva e derivata



Il raccordo parabolico deve essere posizionato tra rettilineo e curva circolare, come indicato in figura, in maniera che vi sia contatto tra rettilineo e raccordo, le due curve abbiano la stessa tangente e non si abbiano discontinuità di curvatura nei punti di inizio e fine del raccordo.

Tali condizioni sono rispettate se si posiziona il raccordo parabolico simmetricamente a cavallo del punto di tangenza. In tal modo si riduce il raggio della curva circolare (primitiva) R_p della quantità $m = l^2 / 24 R$. In definitiva l'introduzione del raccordo parabolico modifica il raggio della *curva primitiva* di una quantità m tale che $R_p - m = R_d$, spostando il tracciato su di una *curva derivata*.

Progetto di Infrastrutture viarie

Policentriche

Si definiscono policentriche le curve composte da due archi di cerchio di raggio differente aventi nel punto di contatto la tangente stessa e da un raccordo tra essi.

I due archi di cerchio (d'estremità) saranno caratterizzati da due valori diversi dell'accelerazione centrifuga non compensata, per cui occorre introdurre un raccordo che contenga il contraccolpo e la velocità di rollio e che raccordi geometricamente le due differenti sopraelevazioni.

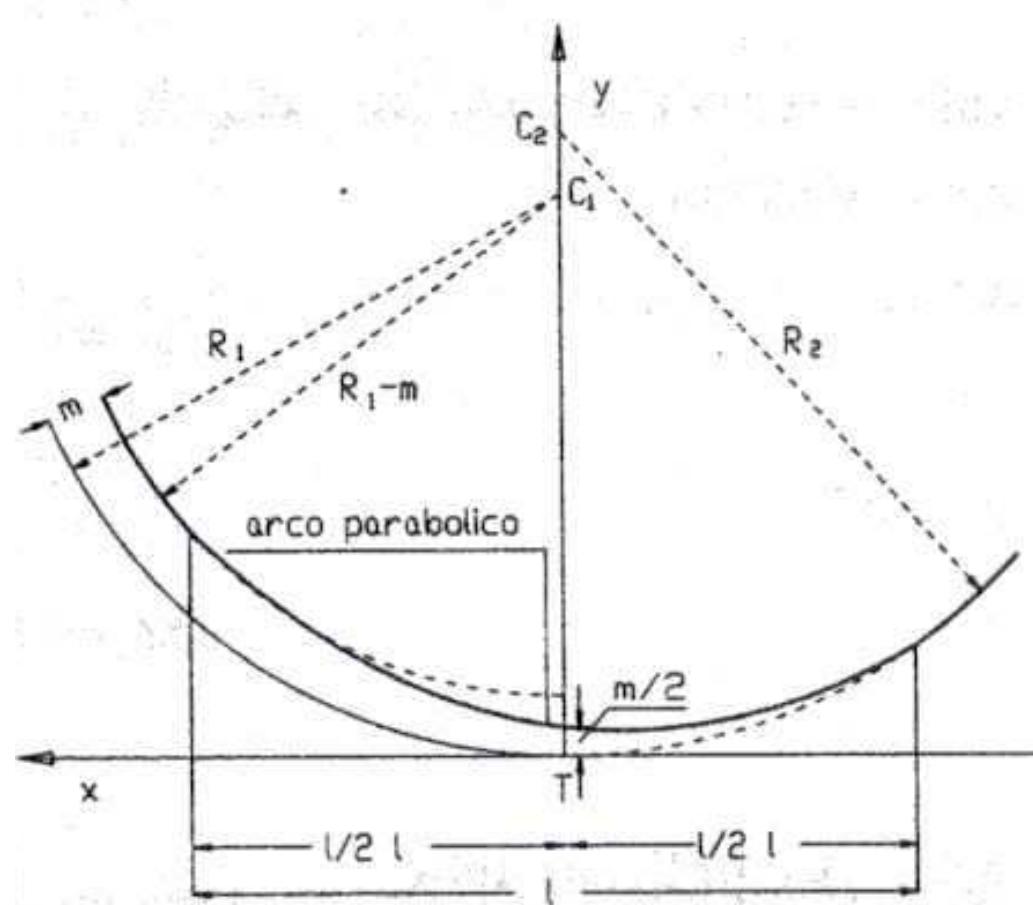
Il dimensionamento del raccordo di sopraelevazione intermedio, applicando gli stessi concetti visti in precedenza, porta a quantificare il contraccolpo $\psi = V \times \Delta a_{nc} / 3,6 \times l [m/s^3]$ e la velocità di rollio $\omega = \Delta h \times V / 3,6 \times s \times l [rad/s]$, dove Δa_{nc} e Δh sono le differenze fra i valori delle accelerazioni non compensate e delle sopraelevazioni relativi alle due curve componenti la policentrica.

Con riferimento alla figura 7 si dimostra che se si impongono al raccordo nel suo punto d'inizio la curvatura della prima curva e nel suo punto di fine la curvatura della seconda curva, il raccordo parabolico stesso si svilupperà a cavallo del punto di tangenza T.

Un raccordo intermedio così pensato, presenta la stessa lunghezza del raccordo di sopraelevazione (come indicato in figura 8a); nel caso in cui ciò non sia possibile, il raccordo di sopraelevazione entrerà nei due tratti di curva circolari (come indicato in figura 8b).

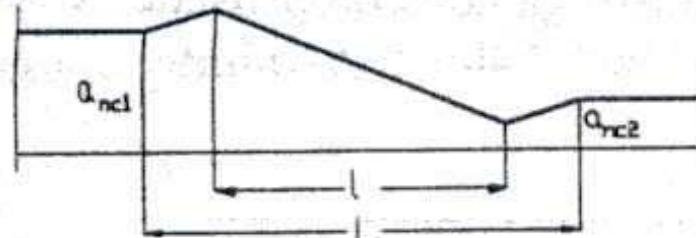
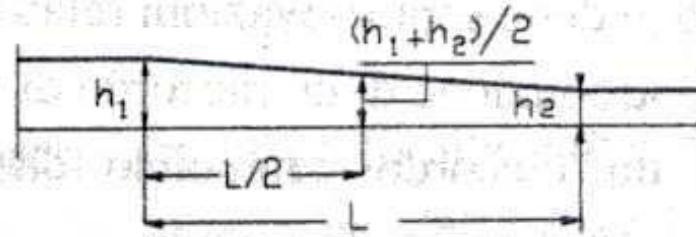
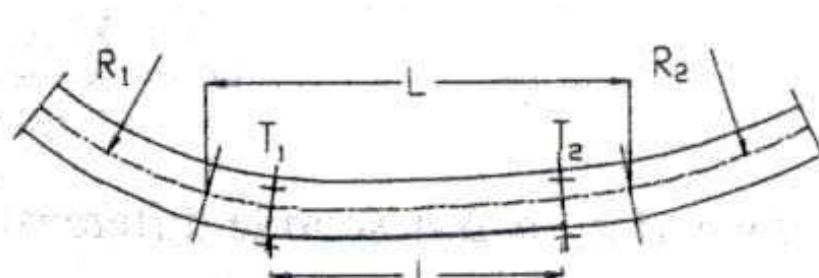
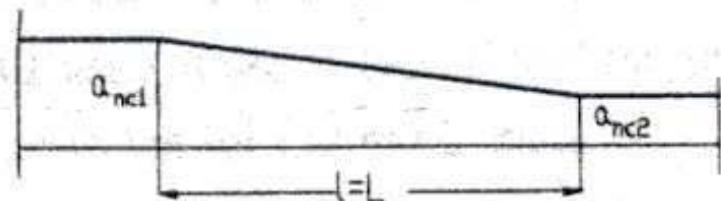
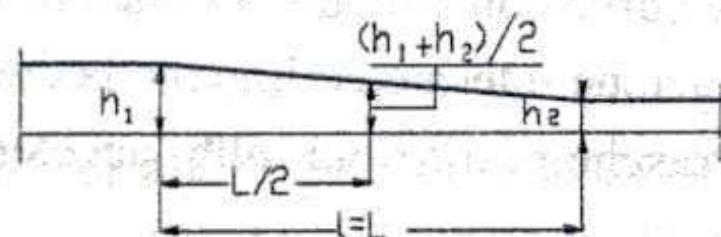
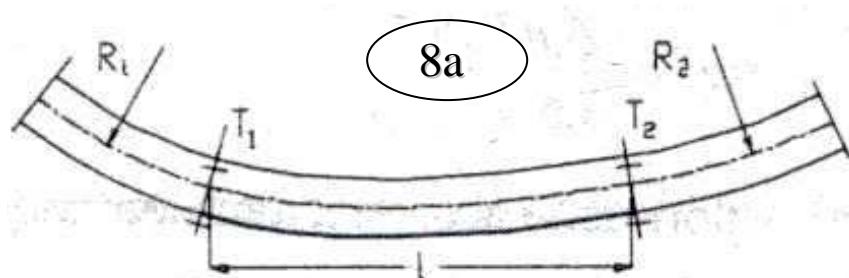
Progetto di Infrastrutture viarie

Curva policentrica



Progetto di Infrastrutture viarie

Raccordo di sopraelevazione intermedio in una policentrica



8b

L =lunghezza del raccordo di sopraelevazione

l =lunghezza del raccordo parabolico

Progetto di Infrastrutture viarie **Intervia e d interasse**

Nelle linee a doppio binario si definisce *intervia* la distanza fra i bordi interni delle due rotaie interne, mentre si definisce *interasse* la distanza tra gli assi dei due binari. Entrambe tali grandezze sono misurate normalmente all'asse del binario.

Il valore attribuito a tali grandezze (che differiscono tra di loro per uno scartamento) è stato dettato dall'esigenza di realizzare franchi di sicurezza tra le sagome di due treni che s'incrociano in linea. In stazione tali valori sono da mettere in relazione con la sicurezza degli addetti alle manovre. Più recentemente, con l'aumento della velocità, si è dovuto tener tenuto conto dei fenomeni aerodinamici che si manifestano soprattutto in galleria fra due convogli.

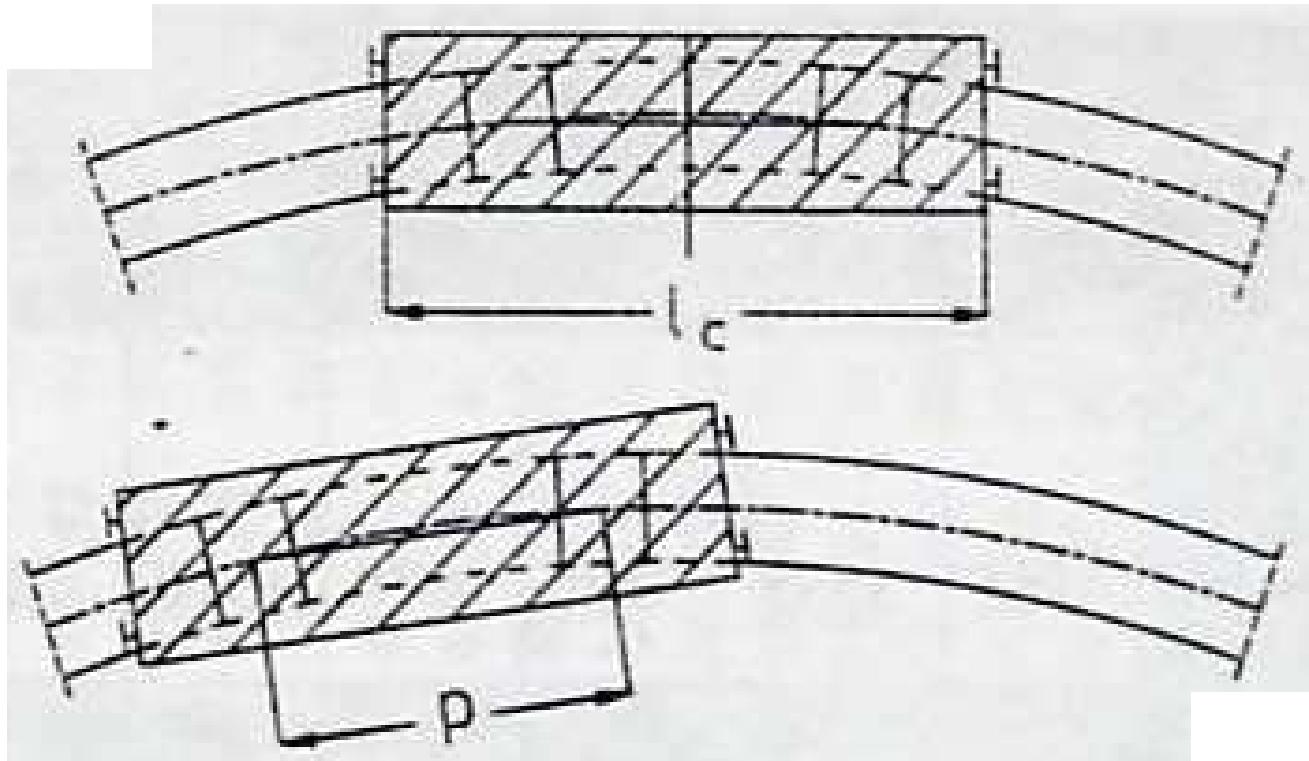
La rete FS prevede un'intervia in rettilineo di 2,12 m (interasse di 3,555 m) con una distanza fra sagome limiti di soli 6 cm; in curva si impone un allargamento dell'intervia per consentire l'incrocio di veicoli lunghi senza interferenze.

In figura 9 si mostra l'occupazione di sagoma in curva in cui l'*allargamento d'intervia* in curva dato da $\delta = I_c^2 / 8R$, dove I_c è la lunghezza del veicolo, p è la distanza tra i perni dei carrelli e R è il raggio della curva. In figura 10 sono riportati gli allargamenti dell'intervia in funzione del raggio della curva con $R < 450$ m e per veicoli con $I_c \leq 30$ m. In stazione l'intervia minima è di 2,50 m (interasse di 3,935 m), per ragioni di sicurezza (presenza di personale di manovra) l'interasse minimo deve essere di 4,60 m.

Nelle linee AV/AC si hanno valori di interasse variabili: 4,20 m (F,J,EU), 4,30 (E), 4,70 (D) e i 5,00 m (I).

Progetto di Infrastrutture viarie

Occupazione di sagoma in curva



Progetto di Infrastrutture viarie

Allargamenti interasse

R (m)	δ (mm)	R (m)	δ (mm)
450<R<400	15	239<R<220	105
399<R<350	23	219<R<200	155
349<R<300	35	199<R<180	215
299<R<240	45	179<R<170	255
249<R<240	65	169<R<150	295
		159<R<150	340

Progetto di Infrastrutture viarie

Progettazione del binario

Nel dimensionare le singole grandezze caratteristiche del binario, è necessario differenziare l'approccio a seconda che si debba progettare: *una linea nuova o ristrutturare una linea esistente*, anche se alcuni principi o considerazioni sono comuni.

Progettazione di una nuova linea. I dati d'ingresso (ricavati dallo studio di fattibilità comprensivo d'analisi benefici/costi) sono la velocità della circolazione lenta V_l e quella della circolazione veloce V_{max} (di rango A in Italia), nonché l'accelerazione centrifuga non compensata a_{nc} e quella centripeta per ipercompensazione a_c' . Rimangono così univocamente determinati il raggio minimo delle curve R_{min} e la soprelevazione massima h_{max} ; noto il difetto di soprelevazione j occorre determinare l'equazione con la quale calcolare la sopraelevazione sulle curve di raggio superiore a R_{min} : $h = k_h V_{max}^2 / R$, dove k_h è funzione di V_{max} , V_l , a_{nc} , e a_c' . Si procede poi con il dimensionare: la sopraelevazione in funzione della corrispondente velocità di fiancata ($\leq V_{max}$) ed il raccordo di sopraelevazione in funzione della sopraelevazione che sarebbe da attribuire al binario se la linea fosse esercita a velocità V_A , quando non convenga invece dimensionarlo sul valore massimo accettabile della sopraelevazione (160 mm nel caso di esercizio a velocità normali).

Interventi su linee in esercizio. Sono finalizzati a migliorare il confort e le prestazioni della linea, introducendo interventi al tracciato che non comportino inaccettabili spostamenti trasversali al binario.

In particolare nella progettazione occorre dimensionare e tracciare (metodi) tutti gli elementi delle *curve circolari, dei raccordi parabolici, dei flessi*, rappresentare le curve tramite il *diagramma delle frecce* funzionale alla correzione delle curve. E' altresì importante effettuare la *picchettazione del binario* finalizzato al *controllo della sua geometria* (specialmente per le linee AV/AC).

Progetto di Infrastrutture viarie **Armamento ferroviario**

Si definisce sovrastruttura ferroviaria l'insieme degli elementi appoggiati sulla superficie confinante il corpo stradale, detto *piano di formazione* o *di regolamento*, che, contemporaneamente, realizza il piano di rotolamento del veicolo ferroviario, detto *piano del ferro*, e gli permette di mantenere la corretta traiettoria assolvendo alla funzione di guida dello stesso. La sovrastruttura ferroviaria può essere: *binario con massicciata* (di tipo classico) o *binario senza massicciata* (di tipo innovativo). In entrambe le tipologie sono presenti: le *rotaie*, gli *organi di giunzione* e gli *organi di attacco* costituiscono con le *traverse* il binario, cioè una *struttura reticolare* (telaio) che, se di tipo classico viene annegato nella massicciata (cuscino di roccia frantumata), se di tipo innovativo appoggia su una fondazione in calcestruzzo⁽¹⁾ e che appoggiano, in entrambi i casi, sopra il corpo stradale.

Il binario quindi è caratterizzato da: *elevato grado di sicurezza ed affidabilità* (coefficiente non inferiore a due), *lunga durata* (cicli di rinnovamento non inferiori a 30 anni), *costi di manutenzione ordinaria contenuti* (l'1 % del costo del rinnovo completo della sovrastruttura), *tempi di ripristino contenuti* (a seguito di incidenti d'esercizio), *costi complessivi contenuti* (costruzione e manutenzione). Deve inoltre essere in grado di consentire un elevato confort di marcia e modeste immissioni di rumore e vibrazione nell'ambiente.

L'armamento è elemento condizionante le prestazioni di una linea ferroviaria; le linee ferroviarie sono classificate in base al peso per asse ed al carico massimo per metro ed in base al carico fittizio. Esso è costituito da: la *rotaia ed i suoi organi di collegamento*, il *binario con massicciata* ed il *binario senza massicciata*.

⁽¹⁾ Nei tratti in viadotto od in galleria tale fondazione in calcestruzzo è, rispettivamente, l'impalcato del viadotto o il riempimento dell'arco rovescio.

Progetto di Infrastrutture viarie
Classificazione delle linee: categorie e gruppi

Le linee ferroviarie sono classificate nelle *categorie* riportate in tabella in base al peso per asse ed al massimo carico per metro⁽¹⁾ ammessi.

Le FS individuano sono presenti linee delle categorie A, B₂, C₃, e D₄ (in alcuni casi con limitazioni alla velocità ammessa).

Le linee ferroviarie vengono altresì classificate, per tronchi di lunghezza minima di 50 Km, in funzione dell'intensità del traffico, misurata dal *carico fittizio* $T = T_v (V/100) + T_m (P/18D)$ [tlr/g], dove: T_v e T_m sono i carichi reali (v/m in tlr/g), V è la velocità d'esercizio dei treni di rango A (assimilando a 80 Km/h tutte le velocità inferiori), D è il diametro in m delle ruote, P è il carico per asse (riferito ai veicoli muniti di ruote di diametro D).

In figura 11 sono riportati i nove *gruppi* individuati in sede europea. Le nuove linee italiane sono dimensionate per carichi fittizi compresi tra le 50.000 e le 80.000 t.

Categorie	Peso per asse [t]	Peso per metro [t/m]
A	16	4,8
B ₁	18	6,0
B ₂	18	6,4
C ₂	20	6,4
C ₃	20	7,2
C ₄	20	8,0
D ₄	22,5	8,0

(1) Rapporto tra il peso totale del veicolo carico e la sua lunghezza presa al filo dei respingenti.

Progetto di Infrastrutture viarie

Classificazione linee in base ai gruppi (carico fittizio)

Gruppo	Carico fittizio [tIr/g]
1	> 102.000
2	70.000 ÷ 102.000
3	40.000 ÷ 70.000
4	25.000 ÷ 40.000
5	12.500 ÷ 25.000
6	6.000 ÷ 12.500
7	3.000 ÷ 6.000
8	1.000 ÷ 3.000
9	≤ 1000

Progetto di Infrastrutture viarie

Rotaia ed i suoi organi di collegamento

Il piano di rotolamento (o piano del ferro) è assicurato da due *rotaie*, posate longitudinalmente alla via alle quali è affidata anche la funzione di guida del veicolo attraverso il contrasto laterale dei bordini delle sue ruote.

Le due rotaie sono ancorate a strutture sottostanti (traverse + massicciata o platea di fondazione) mediante *organi di attacco* che garantiscono il loro assetto verticale ed il corretto scartamento.

Inoltre, quando non si ritenga conveniente saldare le rotaie, il loro collegamento longitudinale è affidato ad *organi di giunzione*.

Progetto di Infrastrutture viarie

Rotaia

La rotaia è un profilato (a caldo) in acciaio tipo Vignole caratterizzato dal suo peso per metro lineare (dai 5 Kg/m delle prime linee ferroviarie si è passati agli attuali 60 Kg/m). Il suo profilo è da porsi in relazione con: il massimo carico per asse e della sua frequenza, la velocità massima ammessa sulla linea, della velocità del traffico merci. Esperienze condotte in Russia hanno dimostrato che esiste una relazione di proporzionalità inversa tra rapporto dei momenti d'inerzia rispetto all'asse verticale e la variazione media subita dal binario armato con due differenti rotaie. In figura 12 sono riportate le caratteristiche geometriche di alcuni tipi di rotaia. Tra queste sola la UIC 71 non è utilizzata per ora in UE e in Italia. Per linee interessate da intensi e pesanti traffici merci devono essere utilizzate rotaie da 70 ÷ 75 Kg/m (locomotive da 23 t e carri da 23 t per asse).

In figura 13 è riportata la sezione della rotaia in posizione di montaggio (inclinata di 1/20 verso l'interno per favorire l'accoppiamento con il profilo del cerchione della ruota).

La lunghezza delle rotaie dipende dalle caratteristiche dell'impianto di produzione: in Italia l'unico impianto che produce rotaie è quello di Piombino con lunghezze di 36 m (portate a 144 m con saldatura elettrica). La testata di una rotaia è la sua parte terminale. Le *rotaie promiscue* sono ottenute per saldatura di due spezzoni di diverso profilo, collegati in modo tale da garantire la continuità della superficie di rotolamento. In figura 14 sono riportate le classi dell'acciaio da rotaia.

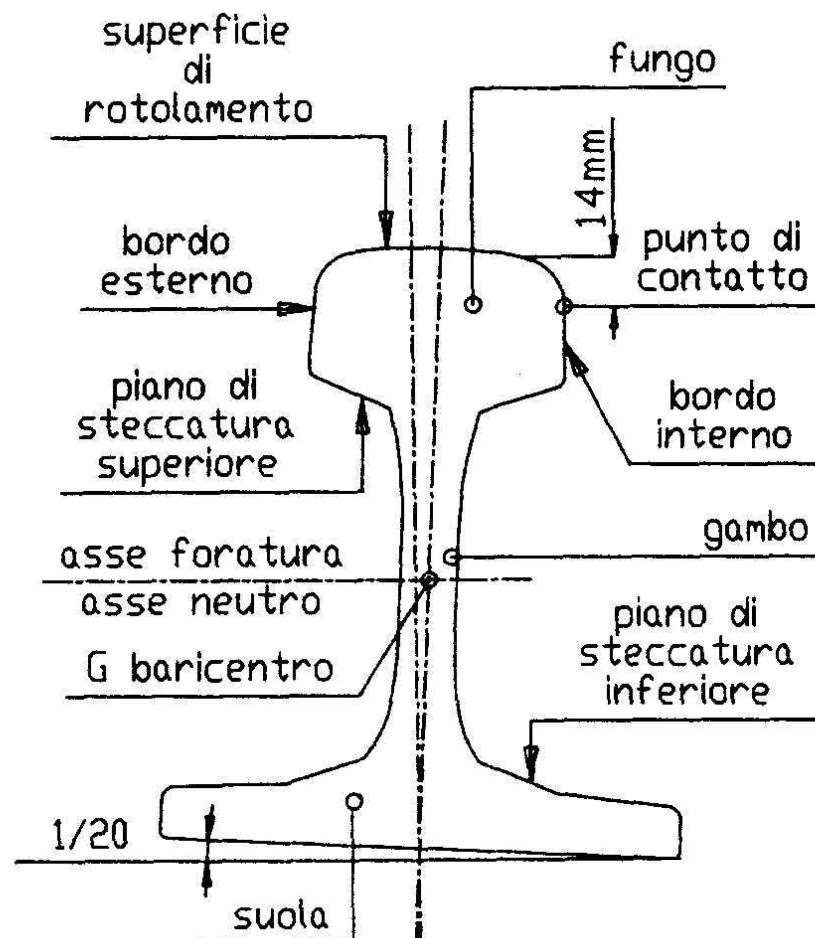
Progetto di Infrastrutture viarie

Caratteristiche geometriche di alcuni tipi di rotaia

Rotaia	Peso [kg]	Altez za [mm]	Larghezza suola [mm]	Area [mm ²]	J _x [mm ⁴]	J _y [mm ⁴]	W _x [mm ³]	W _y [m m ³]	y _c [mm]
FS 46	46,3	145	135	5.926	1.018		217,3		76,52
UIC 50	49,85	148	135	6.350	1.797	362	242	54	76,2
UIC 60	59,458	172	150	7.686	3.055	512,9	335,5	68,4	91,05
UIC 71	71,27	186	160	9,079	4.151,66	735,06	499,73	91,9	83,07

Progetto di Infrastrutture viarie

Sezione della rotaia in posizione di montaggio



Progetto di Infrastrutture viarie

Classi dell'acciaio da rotaia

Tipo	C %	Mn %	Si %	Cr %	P %	S %	Carico rottura [N/mm ²]	Tensione esercizio [N/mm ²]
700	min 0,40 max 0,60	0,8 0,35	0,05 0,35	-	0,05	0,05	680 830	230
900A	min 0,60 max 0,80	0,8 1,3	0,10 0,50	-	0,04	0,04	880 1.030	280
900B	min 0,55 max 0,75	1,3 1,7	0,10 0,50	-	0,04	0,04	880 1.030	280
1.100	min 0,60 max 0,82	0,8 1,3	0,30 0,90	0,8 1,3	0,03	0,03	1.110	330

Progetto di Infrastrutture viarie

Organo di attacco

Si definisce *organo d'attacco* il dispositivo che permette alla rotaia: l'ancoraggio alla traversa (trasferendo a questa gli sforzi verticali), una corretta posizione trasversale e longitudinale (serraggio idoneo ad evitare movimenti relativi tra rotaia e traversa), l'isolamento elettrico (se necessario).

L'organo d'attacco può essere:

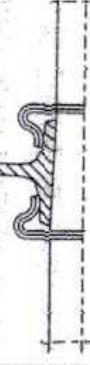
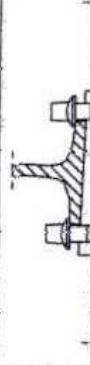
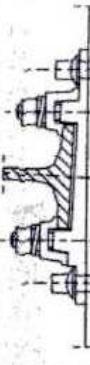
- *diretto*: se l'organo di collegamento fra rotaia e traversa garantisce anche la posizione della rotaia (applicato su traverse in legno ed ormai in disuso)
- *indiretto*: la funzione di collegamento rotaia/traversa è separata da quella di assicurare la posizione della rotaia.

A sua volta la rotaia può essere posata con *posa diretta* (se poggia direttamente sulla traversa) o con *posa indiretta* (se tra rotaia e traversa è interposta una piastra d'acciaio con lo scopo di meglio ripartire i carichi).

In figura 15 è riportato uno schema riassuntivo dei tipi di attacco più utilizzati nei binari con massicciata; in figura 16 invece sono illustrati alcuni tipi di ancoraggi della rotaia alla traversa, con o senza interposizione di piastra, realizzati con: *arpioni*, *caviglie*, *inglobato*. In figura 17 sono rappresentati gli elementi di un tipico *attacco rigido K* sia per traversa in legno che in c.a.p.. In figura 18 sono invece riportati tre tra i più utilizzati *attacchi elastici*: *Nabla*, *Vossloh*, *Pandrol*, *Pescara* e *Ioarv 300*.

Progetto di Infrastrutture viarie

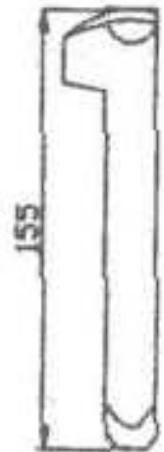
Tipi di attacco più utilizzati nei binari con massicciata

Colleg. rotolai/trav.	Posa	Deformabilità	Traversa	Esempio
Diretta	Rigido	Legno		
	Elastico	Legno		
Indiretta	Rigido	Legno		
	Elastico	Legno		
Diretta	Rigido			
	Elastico	c.a.p.		
Indiretto	Rigido	Legno / c.a.p.		
	Elastico	c.a.p.		

Progetto di Infrastrutture viarie

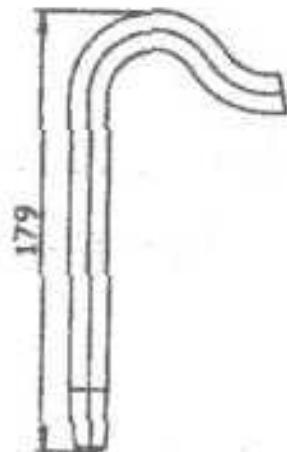
Tipi di ancoraggi della rotaia alla traversa

Arpione



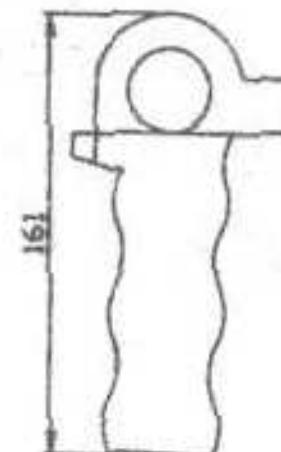
Rigido

Caviglia



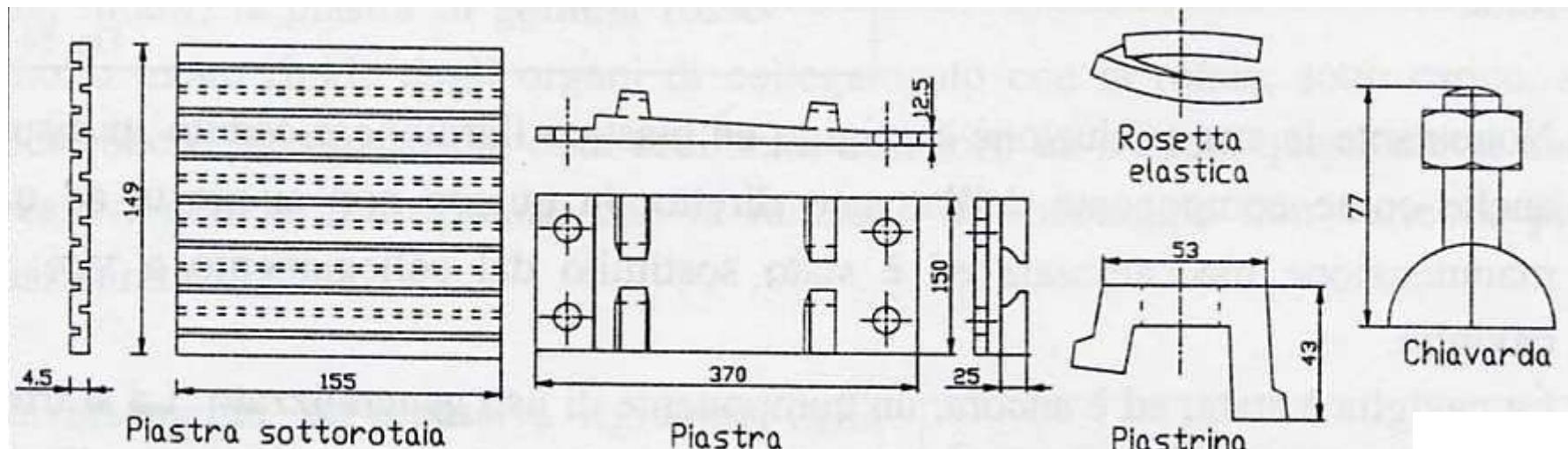
Elastico

Inglobato



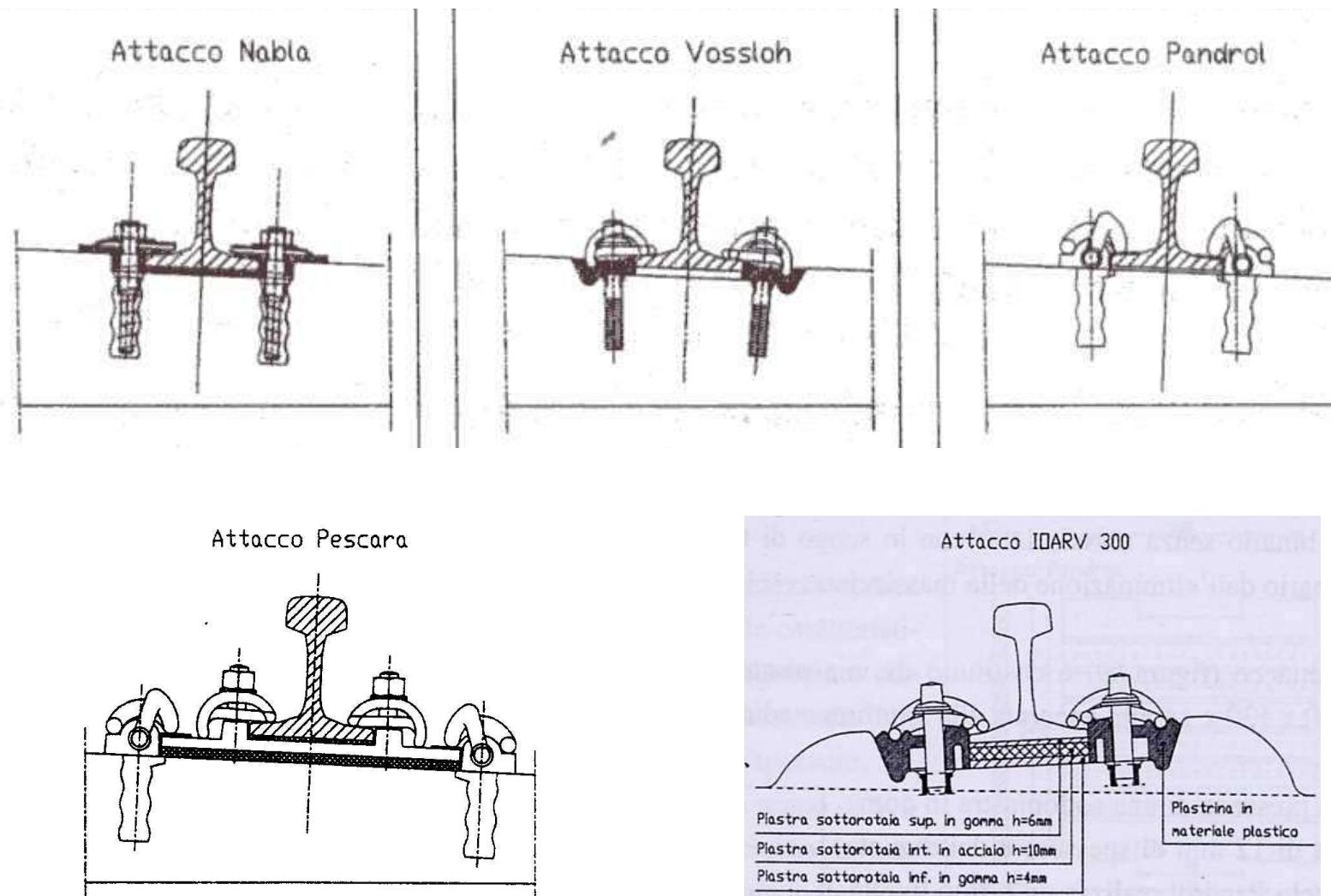
Progetto di Infrastrutture viarie

Elementi di un tipico attacco rigido K



Progetto di Infrastrutture viarie

Attacchi elastici: Nabla, Vossloh, Pandrol, Pescara e Ioarv 300



Progetto di Infrastrutture viarie

Organi di giunzione

Due testate di rotaia, ove non saldate, sono giuntate mediante ganasce in acciaio strette da quattro chiavarde (due per ogni testata). come indicato in figura. Le *ganasse di giunzione* hanno una particolare profili (vedi figura 19) al fine di permettere il contatto rotaia/ganascia ai soli piani di steccatura della rotaia.

Con riferimento alla posizione della giunzione rispetto alla traversa, essa può essere *appoggiata o sospesa*. Nel primo caso essa appoggia su una coppia di traverse (strettamente collegate mediante tre chiavarde). La giunzione sospesa invece è posta al centro dello spartito tra due traverse (con le due testate estreme che si comportano come mensole).

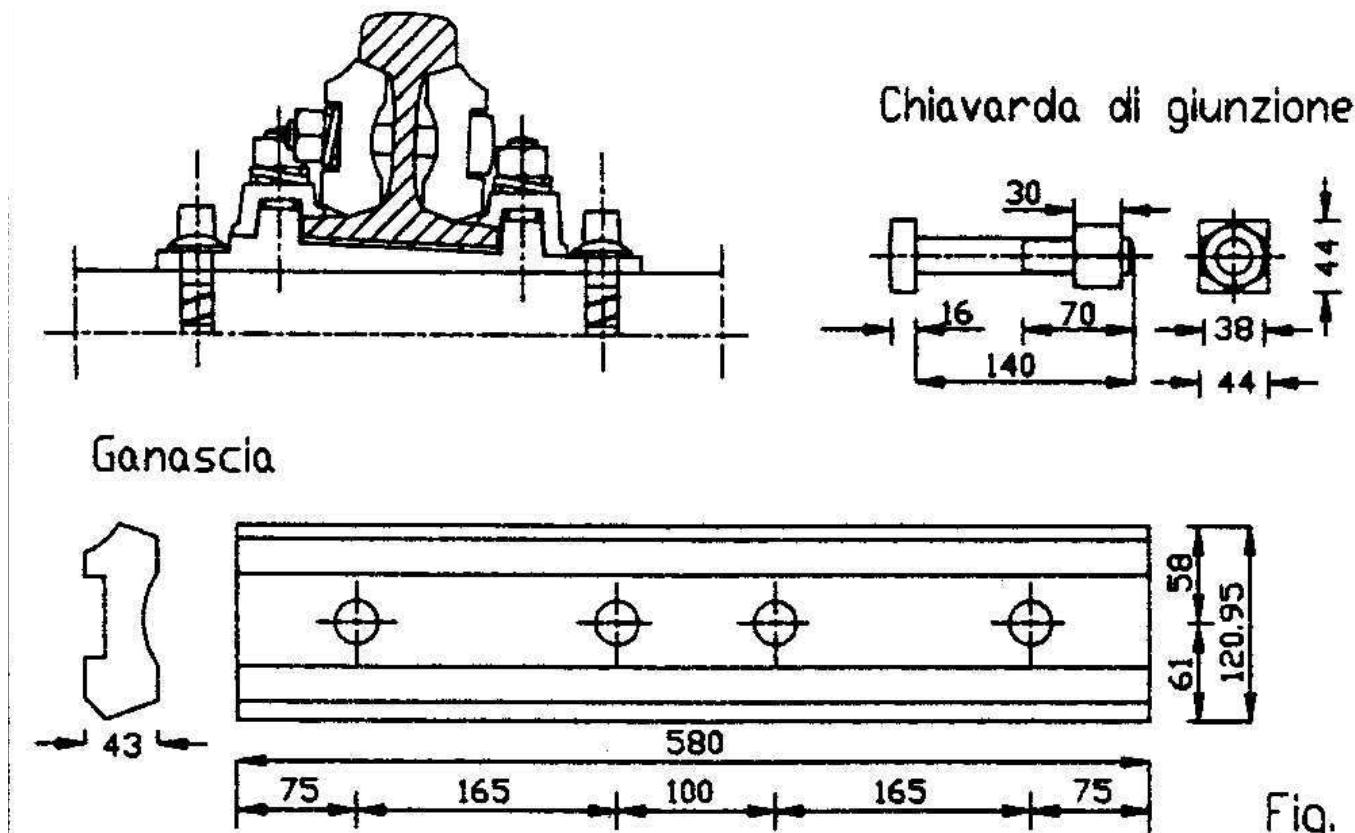
Le ganasce sono strette alle due testate mediante chiavarde di giunzione con l'interposizione di rondelle elastiche per contrastare l'allentamento della forza di serraggio (causata dal movimento della giunzione e dalle vibrazioni indotte dall'esercizio). Normalmente la forza di serraggio è di 100 KN che garantisce una forza di 25 KN (minima soglia) per l'efficacia della giunzione.

In presenza di circuiti di binario, occorre realizzare *giunzioni isolanti* in cui l'isolamento elettrico delle testate può essere realizzato sostituendo l'acciaio della ganascia con legna bakelizzato ed inserendo tra le testate un elemento isolante costituito da una sagoma in nylon (vedi figura 20). In questo caso per rotaie UIC 60 le ganasce di giunzione presentano fori con diametri di 24 mm minori dei diametri dei fori della rotaia di 27 mm, per consentire la dilatazione termica; tali giunzioni sono serrate da chiavarde di 24 mm di diametro.

Quando invece il binario è costituito da lunga rotaia saldata, vengono utilizzate *giunzioni isolanti incollate* (vedi figura 21) che utilizzano ganasce con fori di 32 mm di eguale diametro di quelli praticati nelle rotaie serrate da chiavarde ad alta resistenza di 26 mm di diametro.

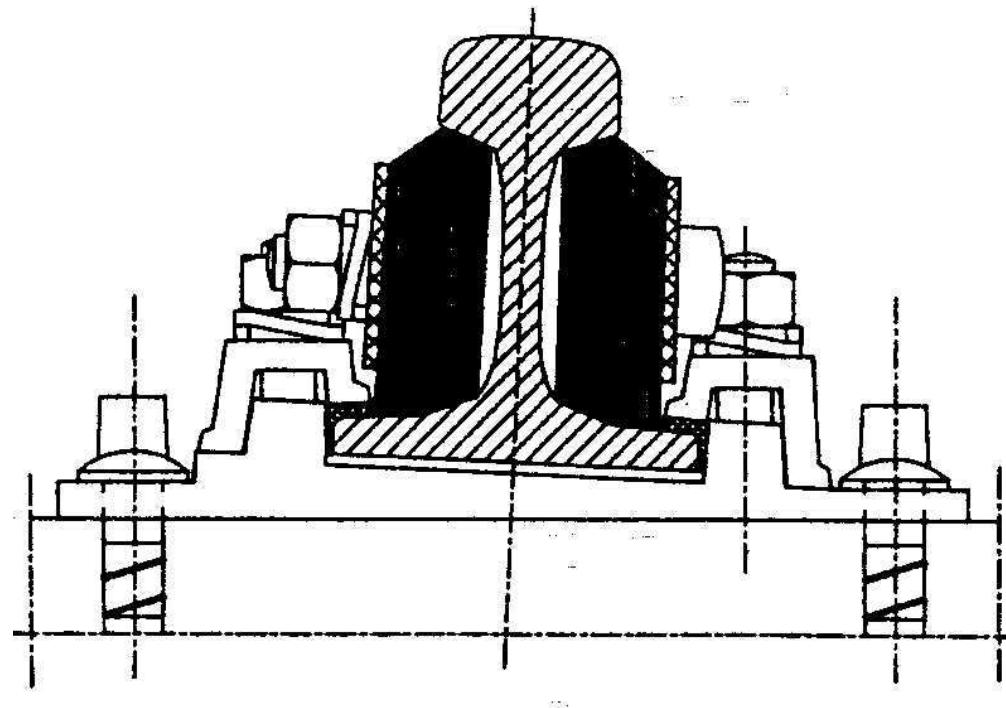
Progetto di Infrastrutture viarie

Profili di ganasce di giunzione



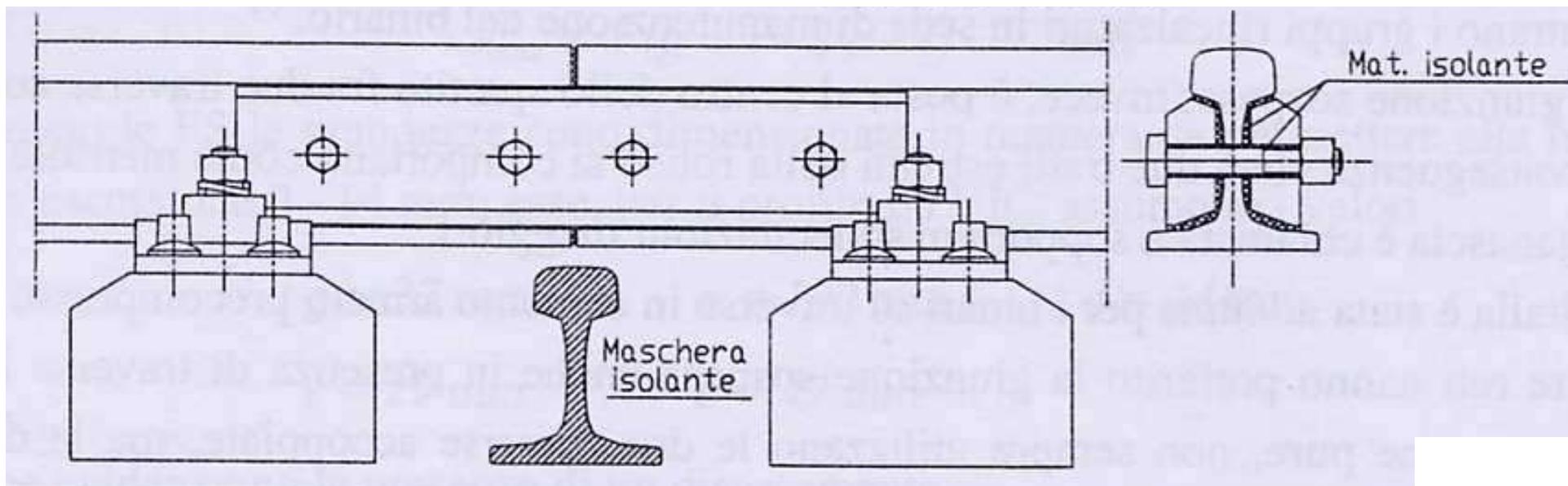
Progetto di Infrastrutture viarie

Giunzioni isolanti



Progetto di Infrastrutture viarie

Giunzioni isolanti incollate



Progetto di Infrastrutture viarie

Binario con massicciata

La classica e storica sovrastruttura ferroviaria è costituita da un *binario* (telaio formato da rotaie e traverse), annegato in una *massicciata* costituita da roccia frantumata.

Il binario è costituito da due rotaie che vengono mantenute alla prescritta distanza (scartamento) da *traverse* che assolvono anche al compito dell'ammorsamento del binario nella massicciata e sono equiparate a travi rovesce a due appoggi.

In corrispondenza di apparecchi del binario (scambi, incroci, ecc.) i *traversoni* anch'essi travi rovesce, ma a tre o più appoggi.

Si ricorda che, anche se esistono sistemi di armamento senza massicciata, tali nuovi sistemi non hanno, per ora, soppiantato il sistema di armamento tradizionale con *massicciata* in quanto è tuttora preferibile per la sua adattabilità in presenza di corpi stradali instabili (scarsa qualità geotecnica del sottofondo).

Progetto di Infrastrutture viarie

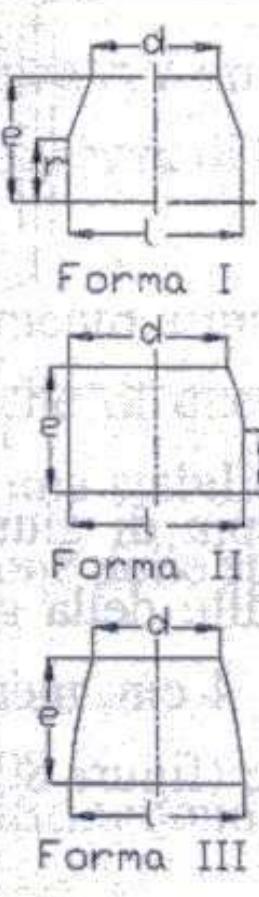
Traverse

Si definisce *traversa* l'elemento prismatico trasversale che collega le due rotaie di un binario. L'interasse delle traverse costituisce il *modulo* o *passo* o *spartito* ℓ_t , e caratterizza il comportamento del telaio del binario condizionando il trasferimento delle forze verticali e quindi i cedimenti; in figura 22 si mette in evidenza il comportamento strutturale unitario del binario. In passato si utilizzavano moduli di 75 cm, oggi la gran parte della rete adotta un modulo di 60 cm sia per linee tradizionali che AV/AC; esistono moduli ridotti (50 cm), ma anche di 66 cm (linee secondarie FS).

Le traverse svolgono la funzione di: ripartire sulla massicciata le sollecitazioni indotte dalla circolazione, di ancoraggio del binario alla massicciata in presenza delle azioni indotte dalle variazioni di temperatura e dalle accelerazioni e decelerazioni dei convogli. Per le lunghe rotaie saldate, l'immobilità del binario, in presenza di elevati gradienti di temperatura, è garantita appunto dall'ammorsamento delle traverse nel pietrisco. In figura 23 sono riportate la classificazione delle traverse. I materiali costituenti le traverse attualmente in uso sono il *legno* ed il *cemento armato precompresso* o *no* (in passato anche l'acciaio). Le *traverse in legno* di rovere e faggio, ma anche in cerro, pino e larice, vengono trattate (impregnate in autoclavi con olii di creosoto) per conservare nel tempo (dai parassiti e funghi), non devono essere larghe più di 30 cm, alte più di 17 cm e lunghe 2,60 m e presentano una *sabotatura* (piano di ferratura) di 50 cm, come riportato in figura 24. Le *traverse di cemento armato* hanno ultimamente sostituito le traverse in legno (laddove non è necessario mantenere il binario giuntato) e sono distinte in *monoblocco* (unico manufatto in conglomerato cementizio precompresso longitudinalmente) e *biblocco* (costituita da due elementi in conglomerato cementizio con armatura lenta disposti sottorotaia e collegati da un tirante in acciaio). In figura 25 sono dati pesi e dimensioni di alcune traverse monoblocco per reti normali e AV/AC e di una traversa biblocco.

Progetto di Infrastrutture viarie

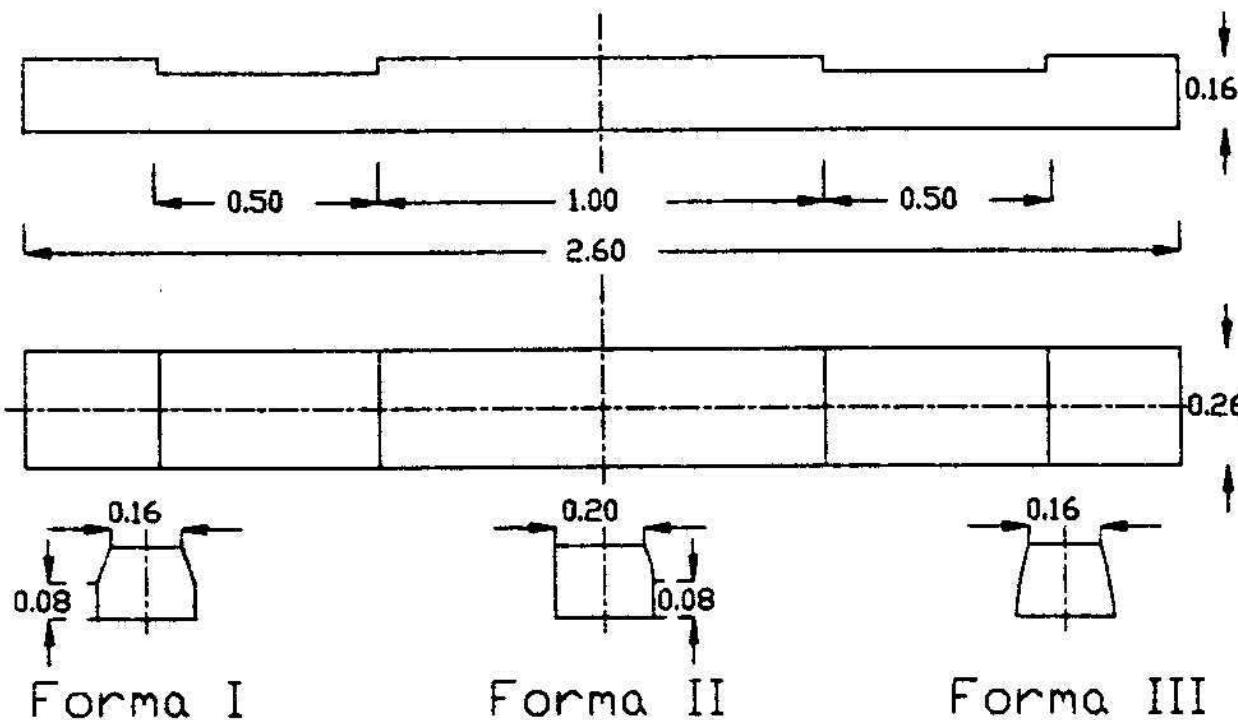
Classificazione delle traverse



Classificazione delle traverse								
gruppo	l	e	d				r	
			I	II	III	I	II	
1	26	16	16	20	16	8	8	
2	26	15	17	20	17	8	8	
3	26	13	13	17	13	6	6	
4	24	15	16	18	16	7	7	
5	24	14	16	18	16	7	7	
6	24	13	13	17	13	6	6	
7	22	13	13	16	13	5	5	

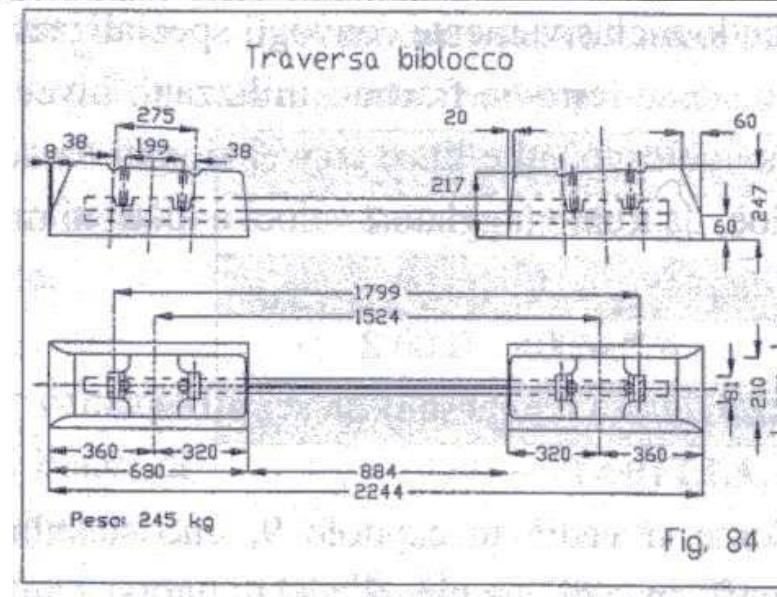
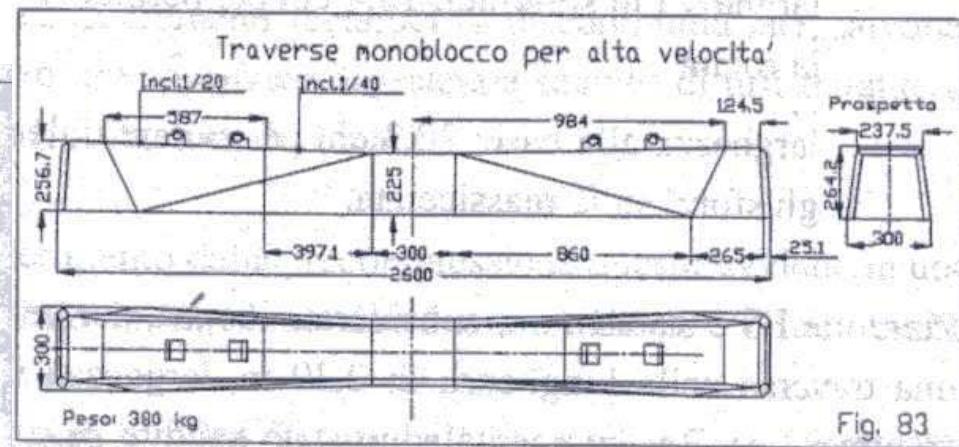
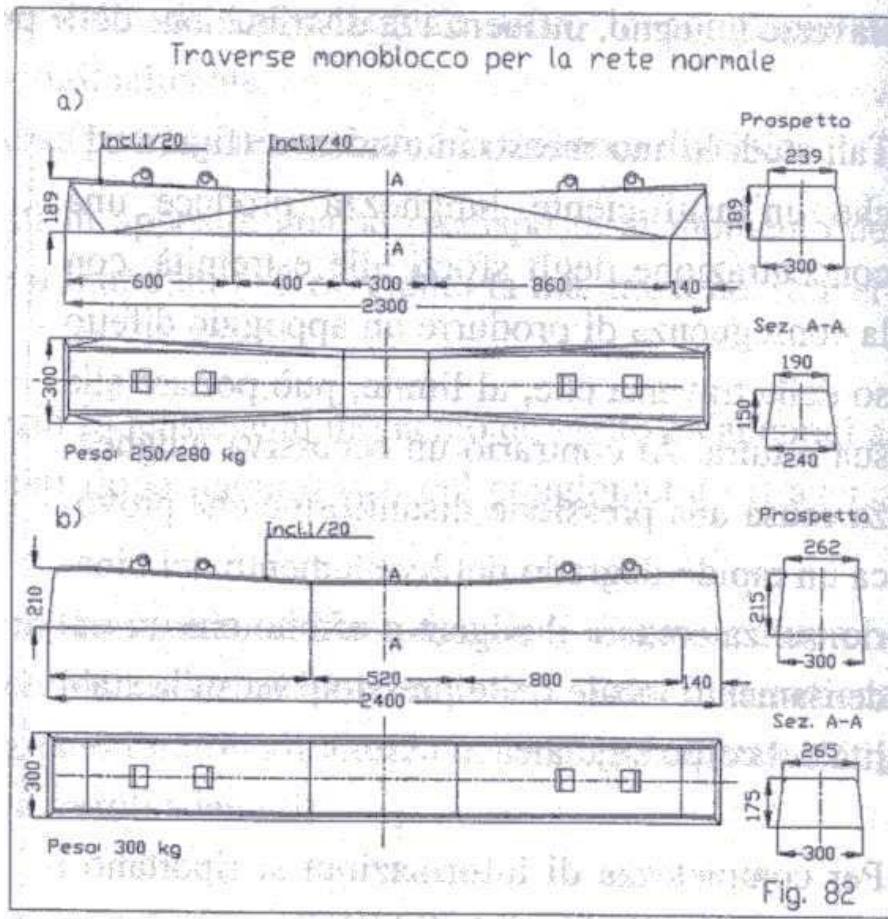
Progetto di Infrastrutture viarie

Piano di ferratura di una traversa in legno



Progetto di Infrastrutture viarie

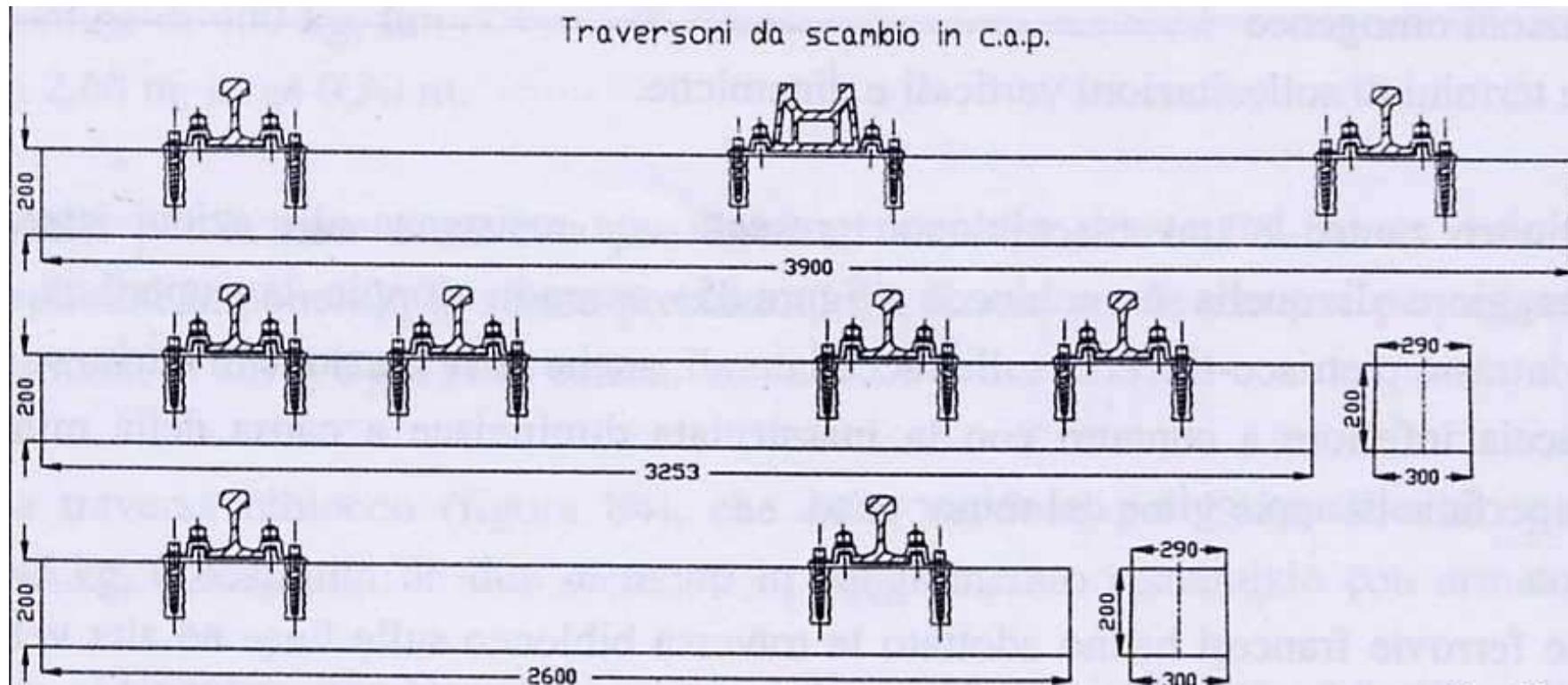
Pesi e dimensioni di alcune traverse



Progetto di Infrastrutture viarie

Traversoni

Si definisce *traversone* l'elemento trasversale utilizzato in corrispondenza di apparecchi di binario (scambi, incroci, ecc.). Se realizzati in legno hanno una sezione di 270 mm x 160 mm ed una lunghezza massima di 4,40 m; se realizzati in cemento armato precompresso presentano le dimensioni riportate in figura.



Progetto di Infrastrutture viarie **Massicciata 1**

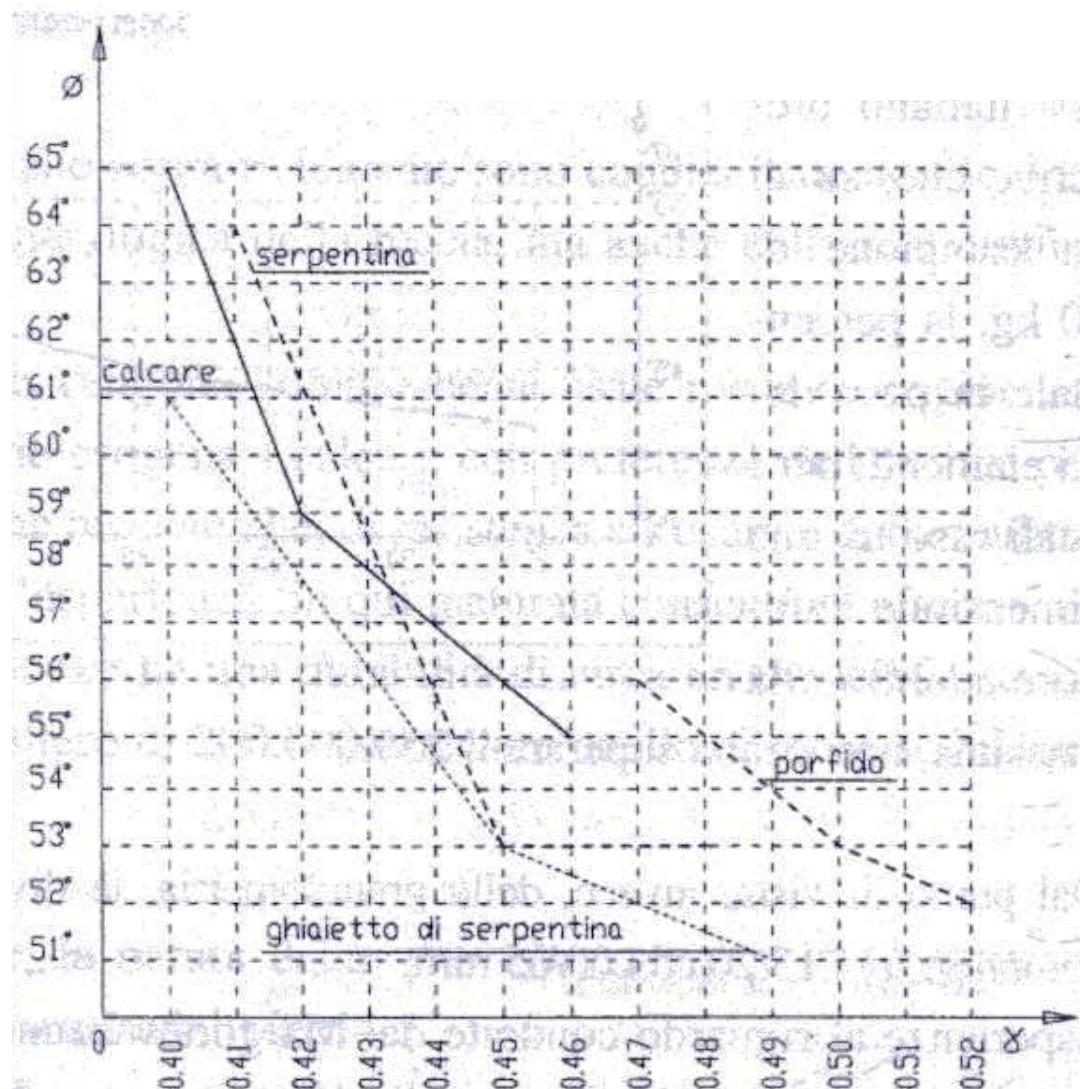
La massicciata è la parte della sovrastruttura costituita da elementi di roccia frantumata che assicura la geometria e la stabilità del binario in essa annegato.

La massicciata: distribuisce i carichi verticali sul piano di regolamento del corpo stradale, assicura al binario le condizioni geometriche di progetto (livelli e allineamenti sia di costruzione che di manutenzione), assorbe gli sforzi indotti nel binario dalla circolazione dei treni (verticali ed orizzontali dovuti alle azioni di guida, ai moti di serpeggio, alle azioni frenanti, alle azioni di martellamento), dalle variazioni di temperatura, costituisce un drenaggio delle acque meteoriche, conferisce elasticità al binario e realizza un filtro fra binario ed ambiente per le vibrazioni.

Una massicciata, per soddisfare a ciò, deve essere: permeabile e costituita da elementi con coefficiente d'attrito interno non inferiore a 45° ed una densità non minore di $1,5 \text{ t/m}^3$. I suoi elementi devono essere a spigoli vivi (le FS impongono indici Los Angeles inferiori a 20-25 per linee normali e non superiore a 16 per linee AV/AC). La pezzatura del pietrisco deve essere compresa per le FS tra 3 e 6 cm. Per massicciate ferroviarie di solito vengono preferite le rocce endogene (silicee) alle rocce esogene (calcari): le caratteristiche chimico-mineralogiche della roccia e la sua struttura influenzano le caratteristiche meccaniche di resistenza all'usura e di durabilità. Un pietrisco di rocce endogene ha una durabilità di un trentennio contro una durabilità di un ventennio di un pietrisco di rocce esogene (se sottoposto ad un traffico giornaliero di 200.000 t). In figura 26 si riportano le variazioni angolo d'attrito interno ϕ in funzione della porosità γ per specifici tipi di roccia.

Progetto di Infrastrutture viarie

Variazioni angolo d'attrito interno ϕ in funzione della porosità γ per specifici tipi di roccia



Progetto di Infrastrutture viarie **Massicciata 2**

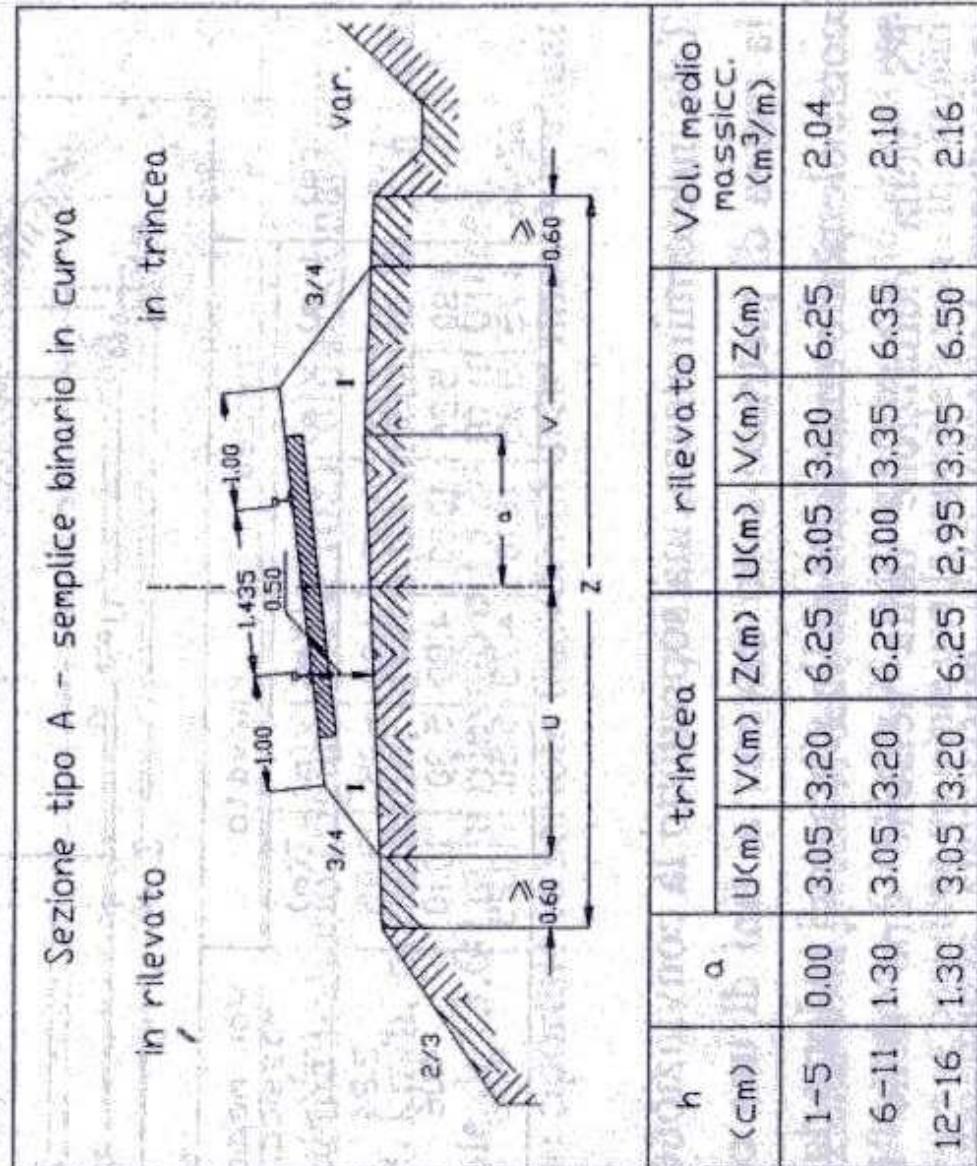
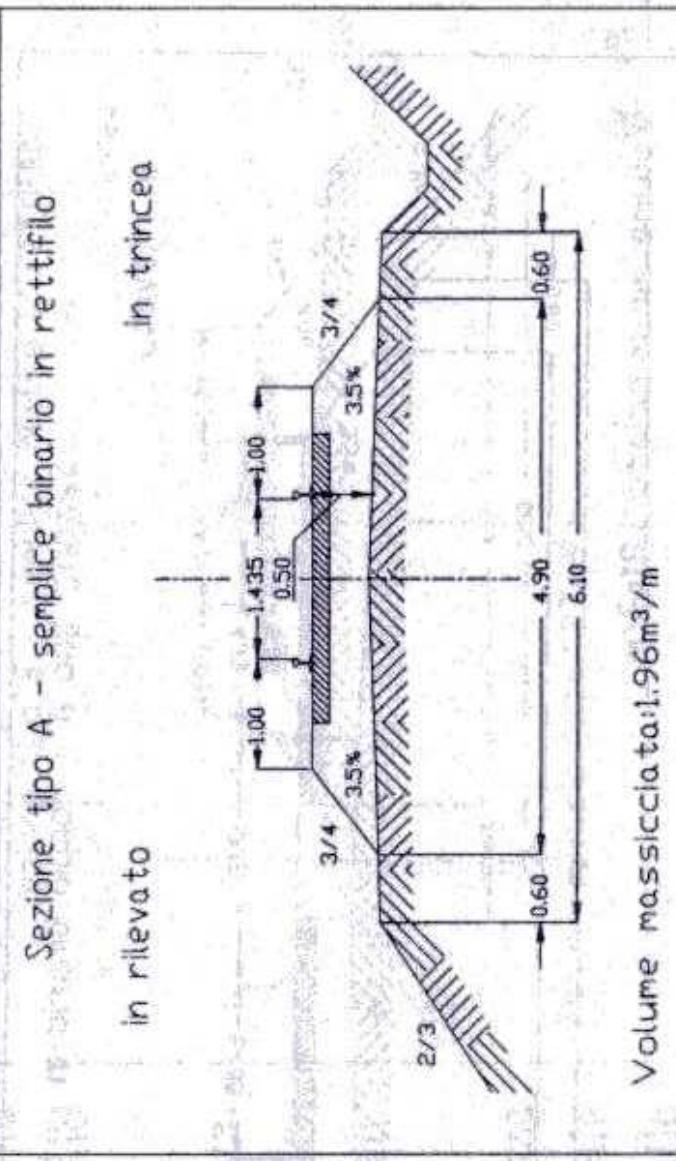
La sezione trasversale di una sovrastruttura ferroviaria di tipo tradizionale è costituita da: *cassonetto* (parte ove sono annegate le traverse), *unghiatura* (sezione triangolare del trapezio), *ciglio dell'unghiatura* (è lo spigolo superiore della massicciata), *piede dell'unghiatura* (è lo spigolo inferiore della massicciata), *sottofondo* (spessore di materiale arido, a volte legato, interposto tra massicciata e piano di formazione) e il *letto di formazione* (parte superiore della piattaforma costituita idonei materiali inerti addensati).

Nelle sezioni tradizionali FS manca il sottofondo ed il letto di formazione che invece sono presenti nelle linee AV/AC. Esistono due tipi di profili FS: di tipo A (vedi figure 27, 28 e 29) che differiscono per la distanza minima tra piano superiore della traversa e piano di formazione (per il tipo A vale 50 cm e per il tipo B 35 cm).

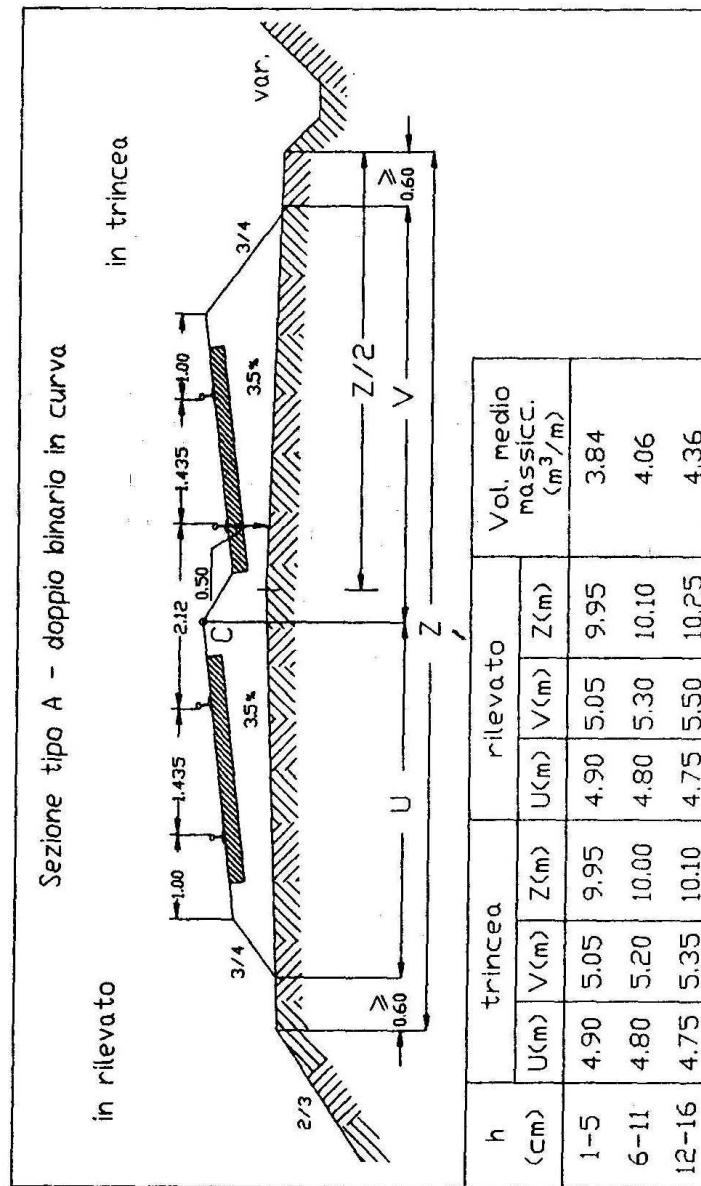
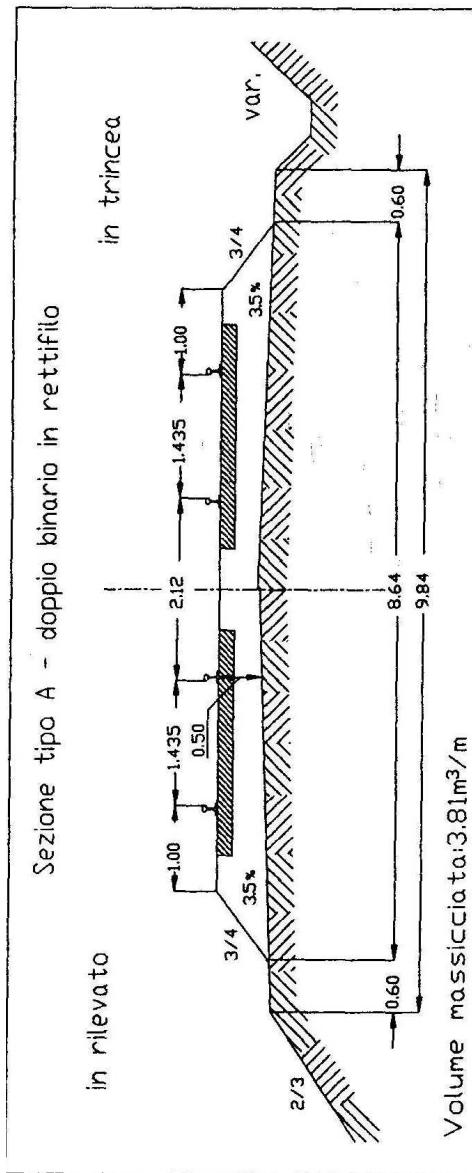
Sulla base dell'esperienza fatta con l'attivazione della DD Roma - Firenze, le FS per le linee di nuova costruzione e per i raddoppi hanno previsto una nuova sezione tipo (come indicato in figura 30) che prevede la posa di traverse in c.a.p. da 2,30 m, l'inserimento di un *sub ballast* (strato bituminoso alto 12 cm posto a chiusura del corpo stradale), l'adozione di un interasse di 4,00 m, di due stradelli, una per lato, da 1,00m.

Le nuove linee AV/AC del sistema italiano (vedi figure 31 e 32 le relative sezioni trasversali in rettifilo ed in curva), dimensionate per velocità di 300 km/h, presentano invece un interasse di 5 metri ed una conseguente larghezza totale di 13,60 m in rilevato e di 13,24 in trincea. Nelle figure 33 e 34 sono riportate le sezioni trasversali in rilevato e in rettifilo delle linee AV giapponesi, francesi, tedesche e spagnole.

Progetto di Infrastrutture viarie
Sezione tipo A: semplice binario

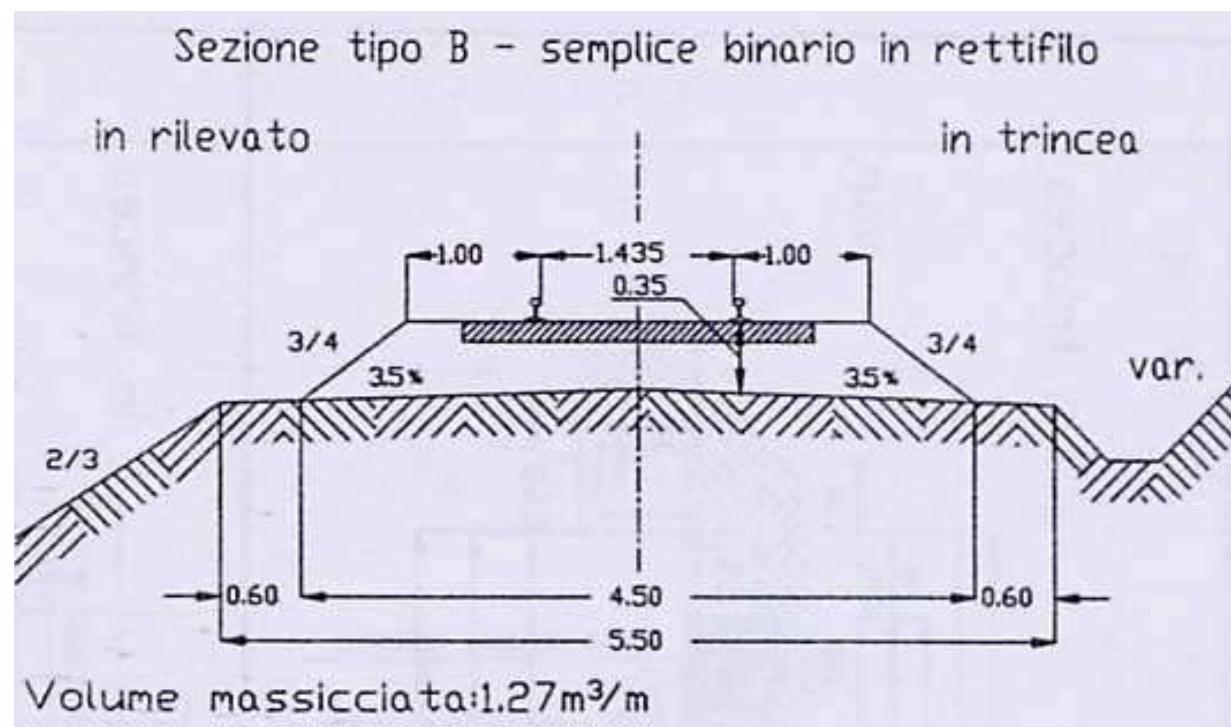


Progetto di Infrastrutture viarie
Sezione tipo A: doppio binario



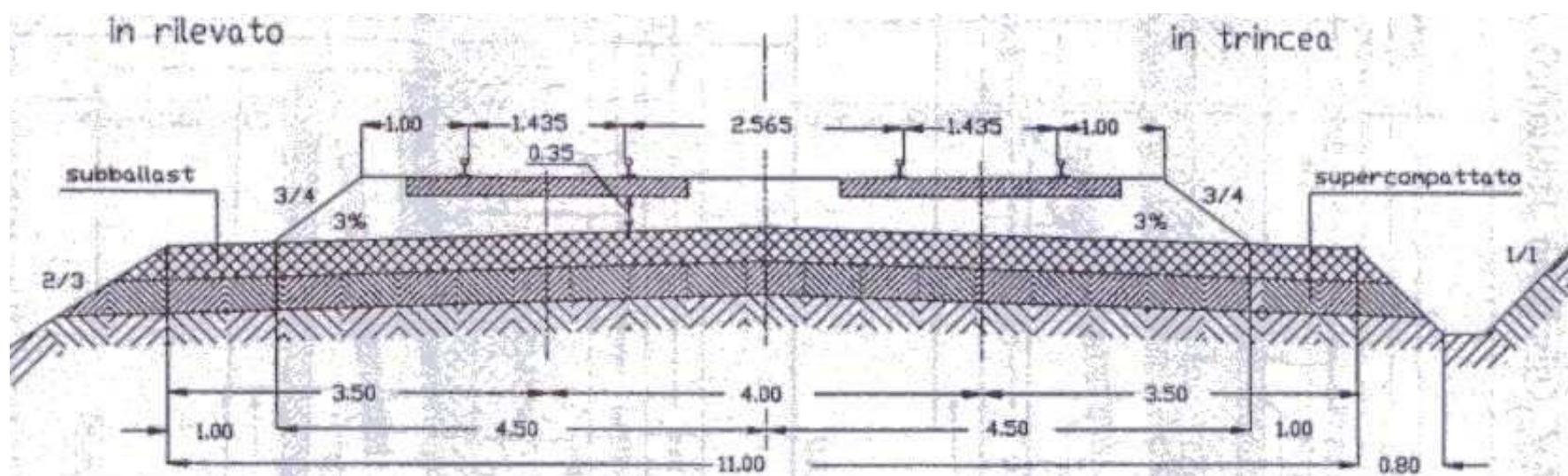
Progetto di Infrastrutture viarie

Sezione tipo B: semplice binario



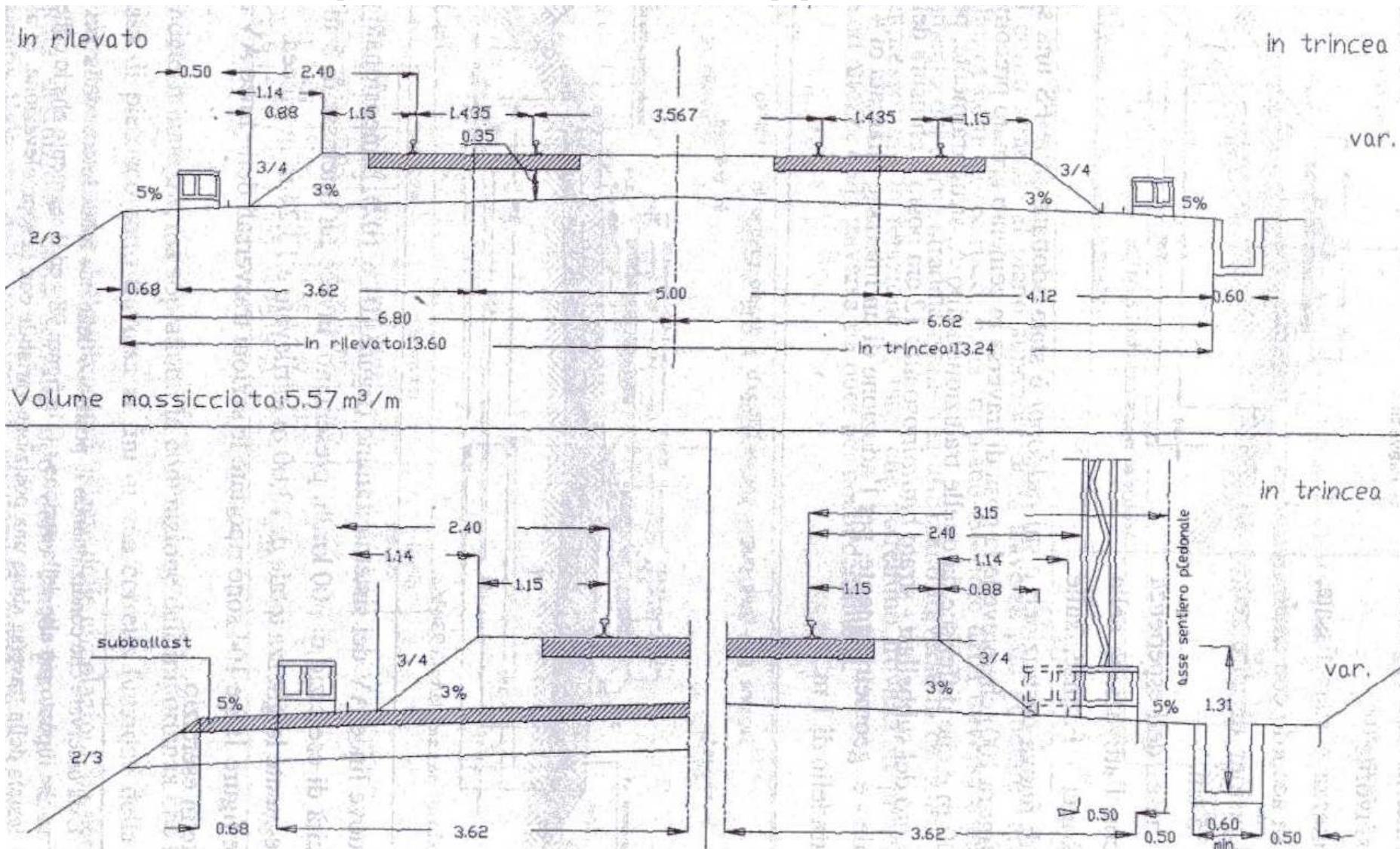
Progetto di Infrastrutture viarie

Sezione per linee di nuova costruzione e per raddoppi

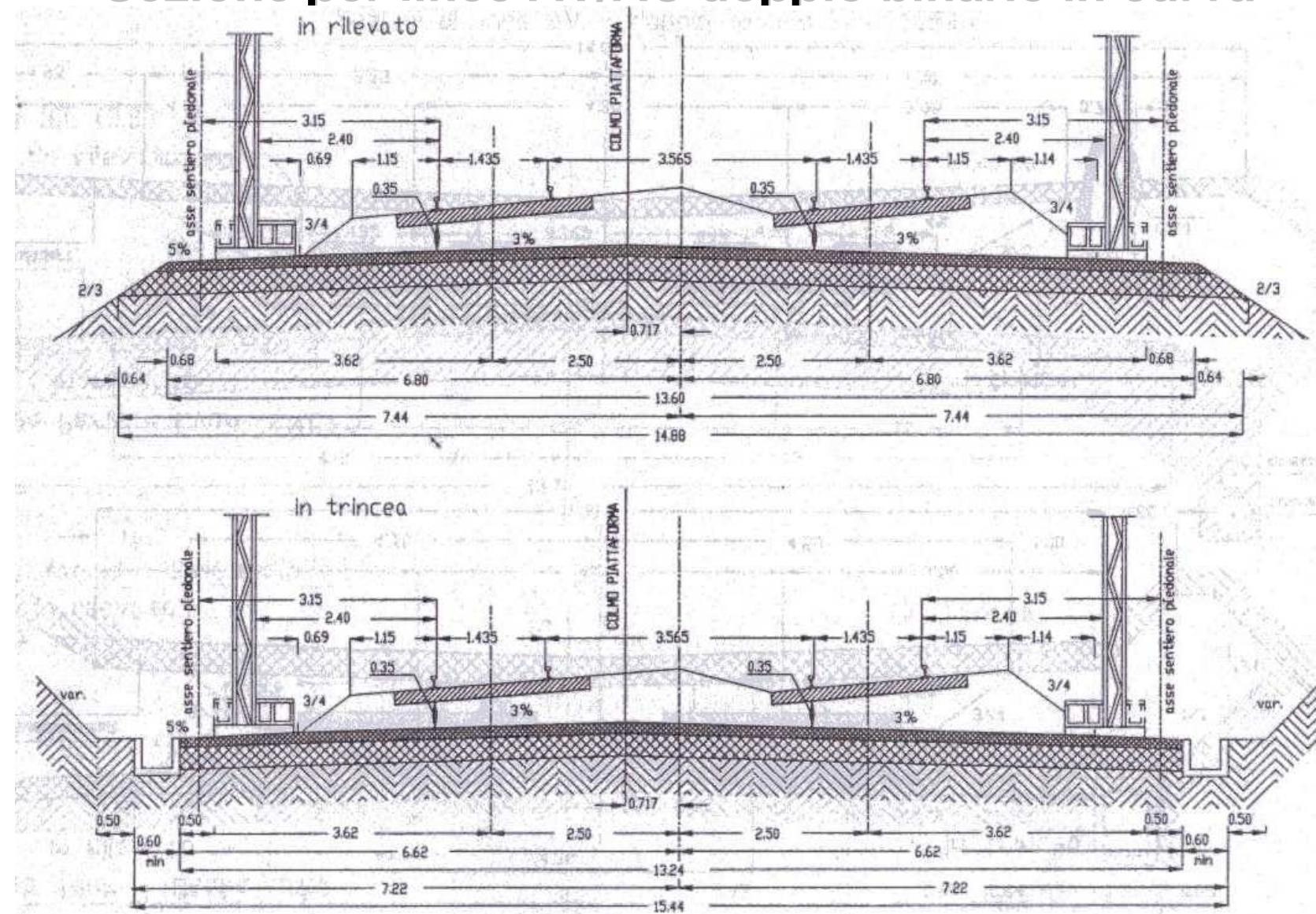


Progetto di Infrastrutture viarie

Sezione per linee AV/AC doppio binario in rettilineo



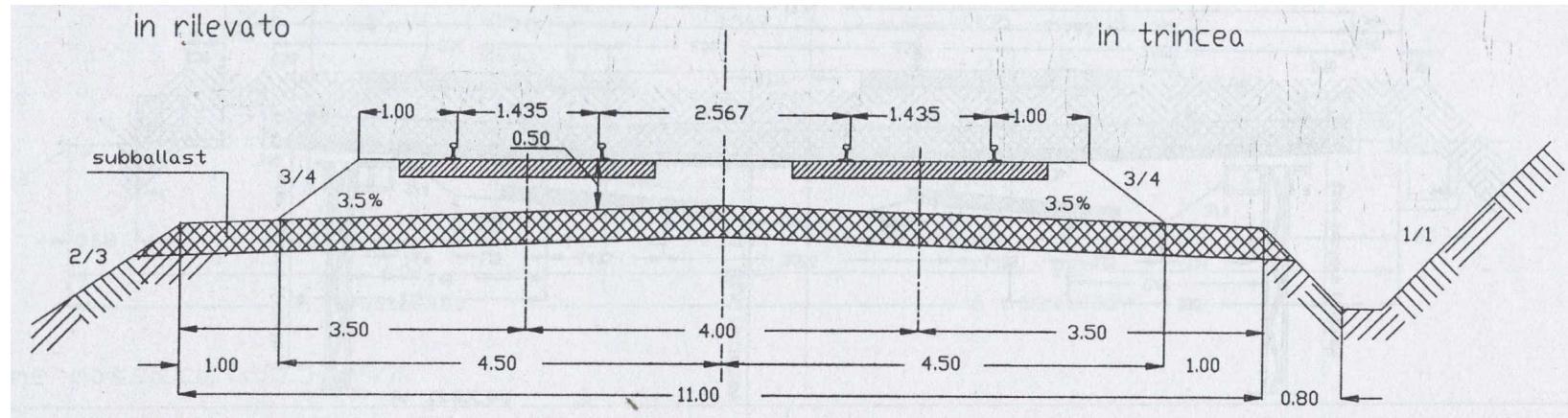
Progetto di Infrastrutture viarie
Sezione per linee AV/AC doppio binario in curva



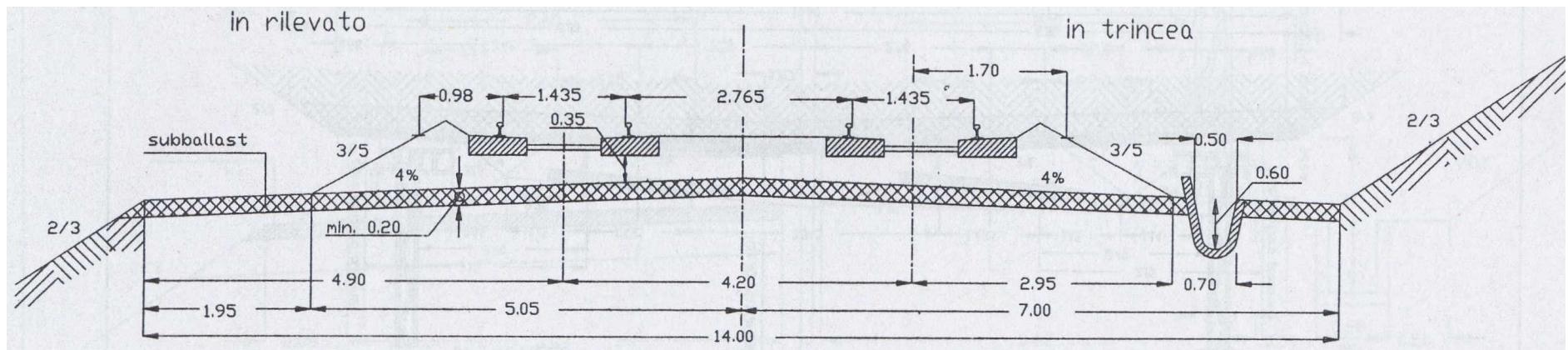
Progetto di Infrastrutture viarie

Sezione per linee AV a doppio binario in rettifilo (Giapponese e Francese)

Giapponese

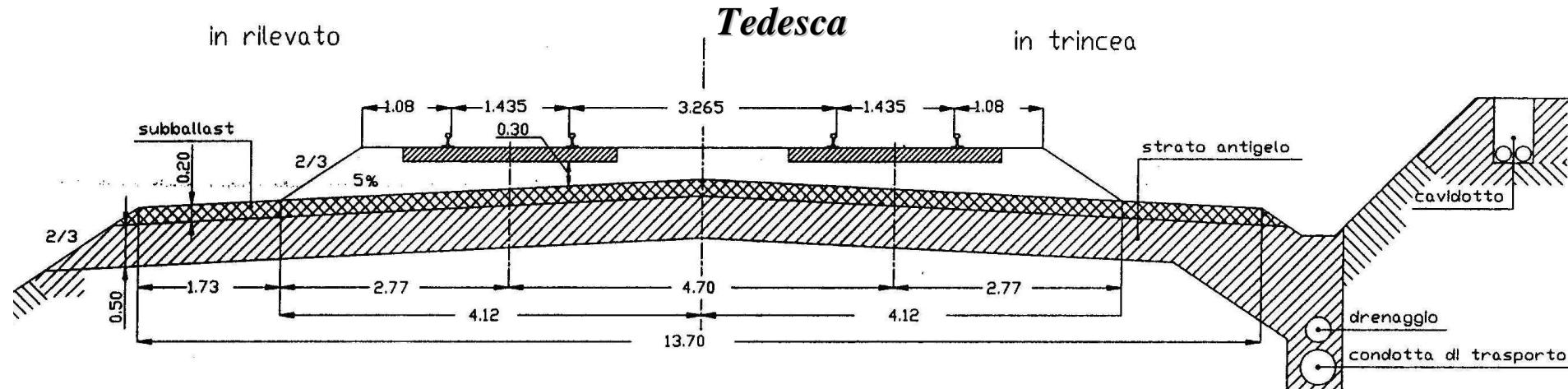


Francese



Progetto di Infrastrutture viarie

Sezione per linee AV a doppio binario in rettifilo (Tedesca e Spagnola)



Spagnola

Progetto di Infrastrutture viarie

Sottofondo

Il *subballast* (sottofondo), laddove previsto può essere realizzato o in misto cementato o in misto bitumato di cui in figura 35 si riportano le caratteristiche granulometriche, il contenuto legante, la resistenza a trazione, il modulo elastico e lo spessore. Le due soluzioni messe a confronto (come indicato in figura 36) hanno evidenziato comportamenti diversi (a parità di carico per asse di 22 t/asse).

Nelle linee di nuova costruzione è ormai accettato di inserire tra la massicciata ed il corpo stradale uno strato (*subballast* o sottofondo) con la funzione di: ripartire i carichi dinamici sul piano di piattaforma (per contenerli nei limiti di rottura, valutati mediamente in $0,1 \text{ N/mm}^2$), impedire che l'umidità del corpo stradale possa modificarsi, impedire che vi sia risalita nel ballast/massicciata di materiale fino ed ottenere un'insensibilità alle escursioni termiche stagionali. Per ottenere tali obiettivi, il sottofondo può essere costituito da uno strato di materiale arido con una percentuale di sabbia fine ($0,2 > \phi > 0,06 \text{ mm}$) non inferiore al 20 % soluzione delle ferrovie tedesche, inglesi e svizzere), o da due strati: uno superiore (30-80 % sabbia) ed uno inferiore (ghiaia frantumata) soluzione praticata dalle ferrovie francesi. Le FS inizialmente adottavano un sottofondo in conglomerato cementizio dello spessore di 20 cm, successivamente un sottofondo in conglomerato bituminoso spesso 12 cm. Nei viadotti ed in galleria si adotta un materassino elastico interposto tra ballast ed impalcato dello spessore di 25 mm se in gomma naturale o di 45 mm se in elastomeri polimerici. Al di sotto del subballast si posizionano teli di tessuto non tessuto.

Progetto di Infrastrutture viarie

Tipi di subballast

	[u.m.]	Misto cementato	Conglomerato bituminoso
Granulometria	[mm]	0 - 40	0 - 20
Contenuto legante	[%]	3	4,4
Resistenza trazione	[bar]	10,4	23
Modulo elastico E	[bar]	3.000	40.000 a 30° 90.000 a 20°
Spessore	[cm]		12

Andamento delle pressioni sul piano di formazione

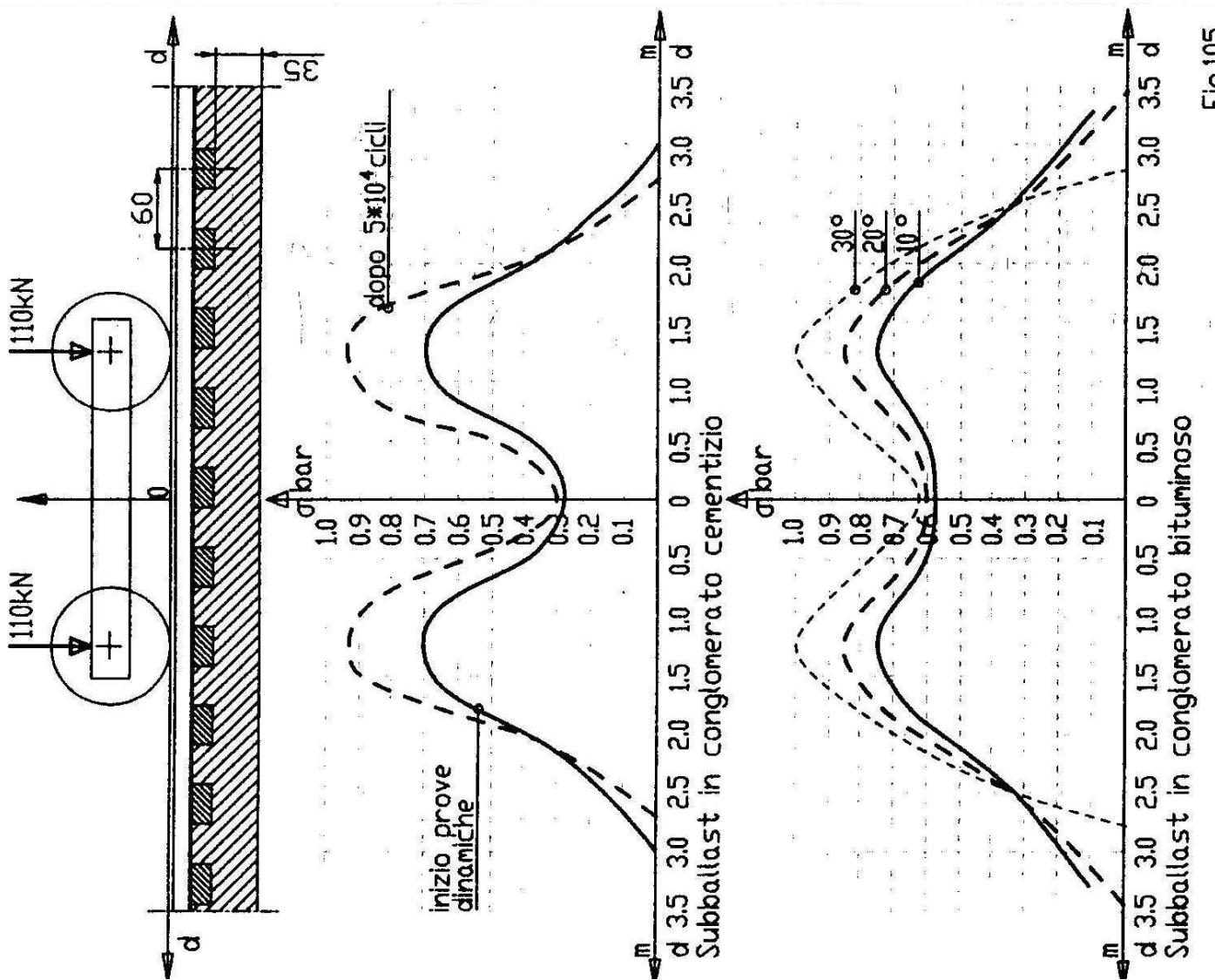


Fig.105

Progetto di Infrastrutture viarie

Binario senza massicciata

A partire dagli anni '60 sono databili i primi studi per realizzare una sovrastruttura ferroviaria in grado di contrastare le sempre più elevate azioni che l'aumento delle d'esercizio e dei pesi per asse velocità produce e di ridurre gli'interventi di manutenzione. Questa anche per cercare di eliminare, dopo l'avvento della traversa in c.a.p., l'elemento più debole: la massicciata.

Tra le prime esperienze vanno menzionate quelle giapponesi per le linee AV del Tokaido (ben 2400 km di binario senza massicciata!). Più recentemente le ferrovie tedesche, constatato il rapido degrado della massicciata della line AV Amburgo-Colonia, hanno deciso di armare la nuova linea AV Colonia-Francoforte con binario senza massicciata.

Allo stato attuale (recenti soluzioni) un binario senza massicciata: garantisce buona stabilità di marcia (a velocità di 250 Km/h ed oltre), permette una sopraelevazione massima sino a 180 mm, non interferisce con la frenatura elettrica (a correnti di *Foucault*), per diminuita esigenza d'interventi manutentivi è possibile diradare le comunicazioni tra binari, permette di ridurre altezza e peso della sovrastruttura (minori costi), maggior contenimento dell'emissione del rumore.

Per contro il binario senza massicciata esige un piano d'appoggio affidabile (oggi più facilmente ottenibile anche in trincea e su rilevati), un'estrema cura realizzativa (personale specializzato), non brevi quindi tempi di posa

Le diverse soluzioni di binario senza massicciata adottate sono: *PACT - PAved Concret Track* (inglese), *STEDEF* (francese), Rheda e Zublin (tedeschi), Sonneville (Eurotunnel), Soluzione giapponese e Soluzione italiana.

Apparecchi del binario

Con il nome *apparecchi del binario* si definiscono quei dispositivi che, posizionati alla confluenza di due o più binari, consentono il loro collegamento o permettono l'attraversamento di un binario intersecante.

In generale vengono utilizzati nelle stazioni viaggiatori e negli scali merci, ma possono essere presenti anche in piena linea (bivi, trivi, quadrivi) laddove si abbiano diramazioni o per collegare le due vie di corsa di una linea a doppio binario (posti di comunicazione) per consentire circolazioni illegali (banalizzate cioè nel senso opposto a quello normale di marcia).

A seconda della funzione svolta, gli apparecchi del binario possono classificarsi in:

- *scambi (o deviatoi) semplici* quando consentono il collegamento di un binario con altri due (vedi figura),
- *scambi (o deviatoi) multipli* quando consentono il collegamento di un binario con altri due (vedi figura),
- *intersezioni* quando consentono il semplice attraversamento di due binari intersecanti (vedi figura),
- *scambi intersezione semplici o doppi* quando consentono il semplice attraversamento di due binari intersecanti e contemporaneamente il loro collegamento da un solo lato o da entrambi i lati (vedi figura).

Progetto di Infrastrutture viarie

Scambi semplici

Il *deviatoio semplice* è costituito da un *ramo principale* (corretto tracciato) e da un *ramo deviato*. In figura 37 sono illustrati due deviatoi semplici (destro e sinistro), i modi di impegnare uno scambio ed il suo tallonamento. Il deviatoio si dice *destro* quando, guardando lo scambio di punta, il ramo deviato volge verso destra; si dice *sinistro* quando, guardando lo scambio di punta, il ramo deviato volge verso sinistra.

In figura 38 è illustrata la nomenclatura di uno scambio e per le FS il deviatoio è classificato tramite una sigla che contiene tutte le caratteristiche geometriche. Ad esempio una sigla: **S 60/250/0,12 d o s** indica che trattasi si scambio semplice (**S**), costruito con rotaie UIC 60 (**60**), con raggio del ramo deviato di 250 m (**250**), avente un angolo d'uscita la cui tangente ha il valore naturale di 0,12 (**0,12**) e che è destro (**d**) o sinistro (**s**). In figura 39 si mostra come si misura la tangente di uno scambio.

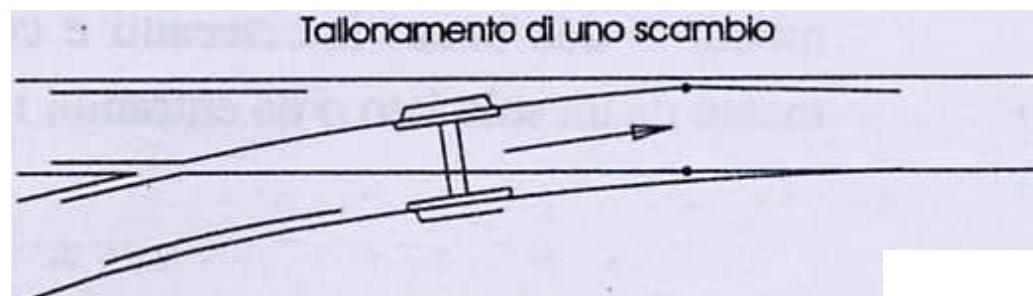
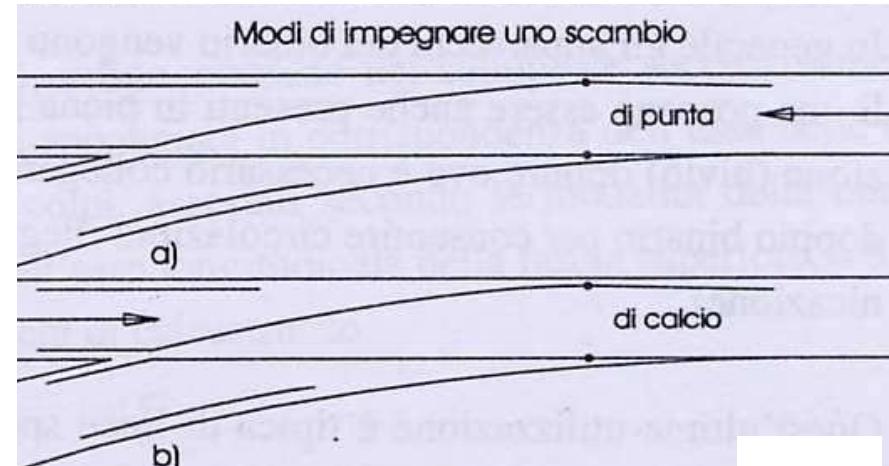
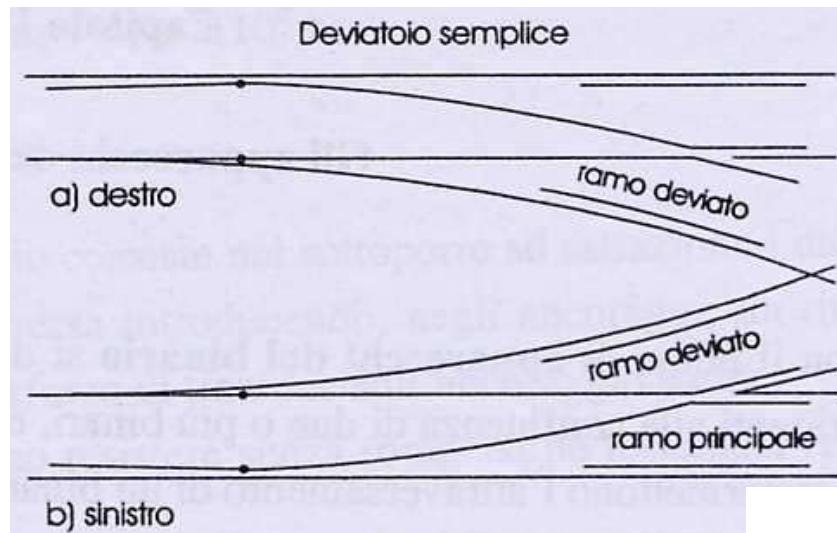
Lungo il ramo deviato di uno scambio sussistono delle limitazioni di velocità che dipende dal suo raggio di curvatura (lungo il ramo di corretto tracciato non sussistono invece limitazioni), come indicato in figura 40. Non potendoci essere soprelevazione occorre limitare l'intera accelerazione laterale al valore di 0,65 m/s² per cui il valore massimo V vale $2,91 \sqrt{R}$. Gli aghi degli scambi presentando in punta uno spessore minimo (diverso da zero) pari a 5,5 mm, presentano una punta reale diversa dalla punta matematica, come mostrati in figura 41.

In figura 42 invece sono i valori del contraccolpo, in funzione del tempo di percorrenza del passo e della velocità in deviata.

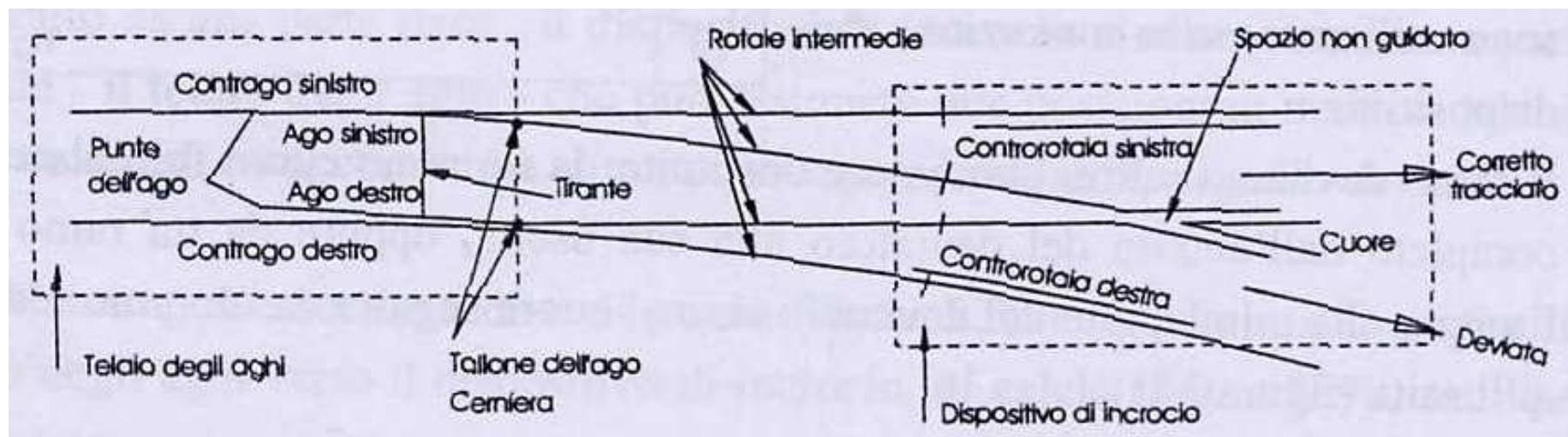
Esiste inoltre la necessità, in alcuni casi, di utilizzare scambi semplici in curva o verso l'interno o verso l'esterno, come indicato in figura 43. Le possibili combinazioni sono illustrate nelle figure 44.

Progetto di Infrastrutture viarie

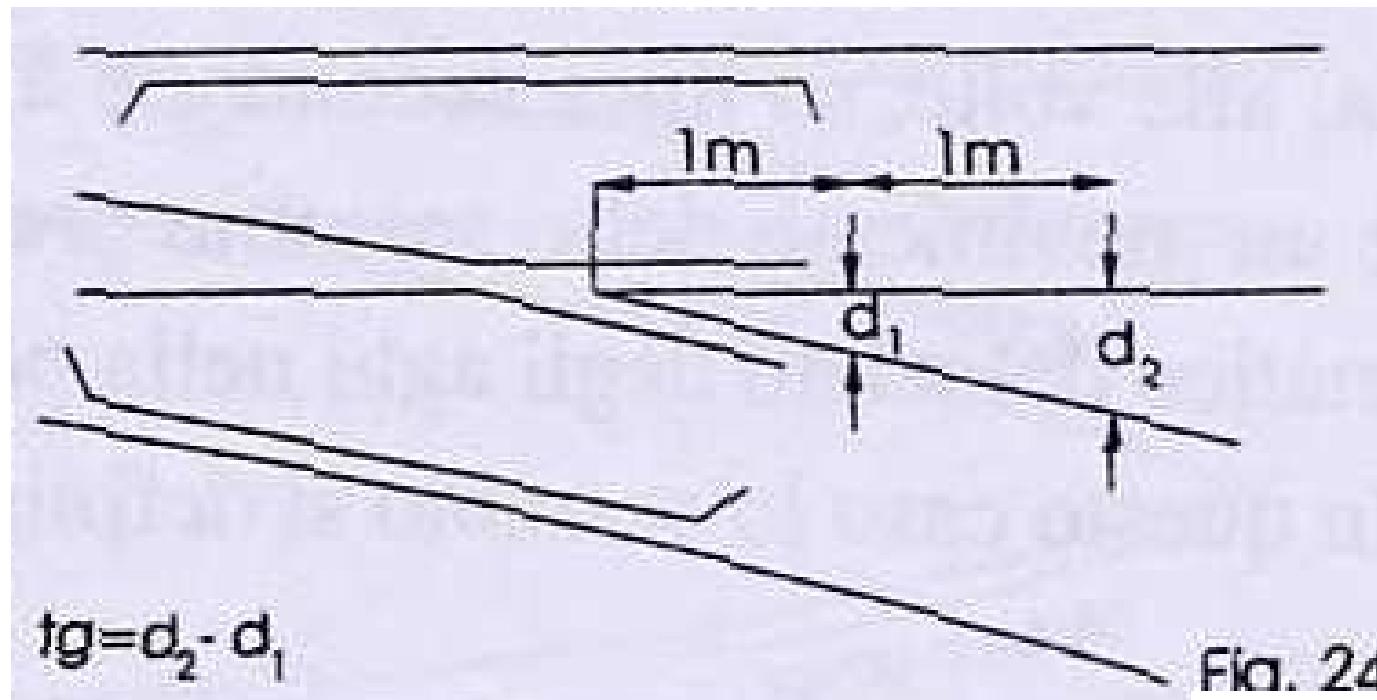
Deviatoi destri e sinistri, modi di impegnarlo e suo tallonamento



Nomenclatura di uno scambio



Misura della tangente di uno scambio

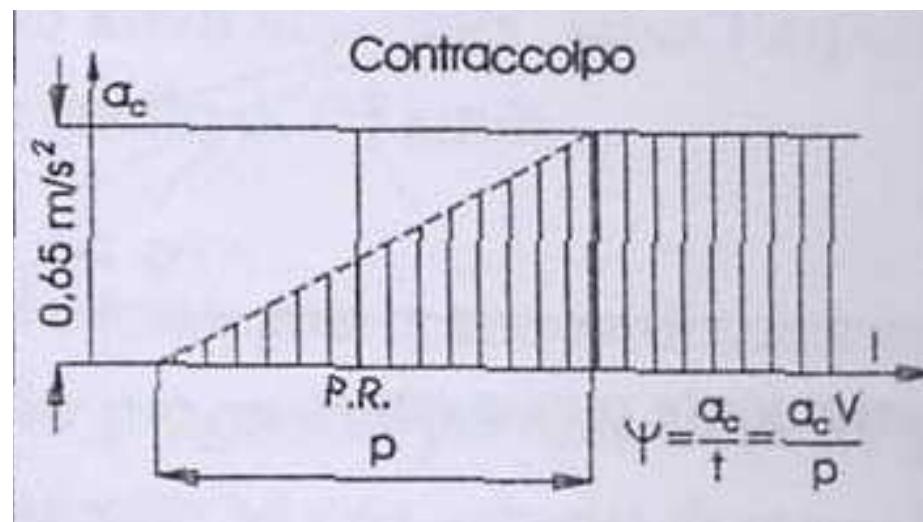
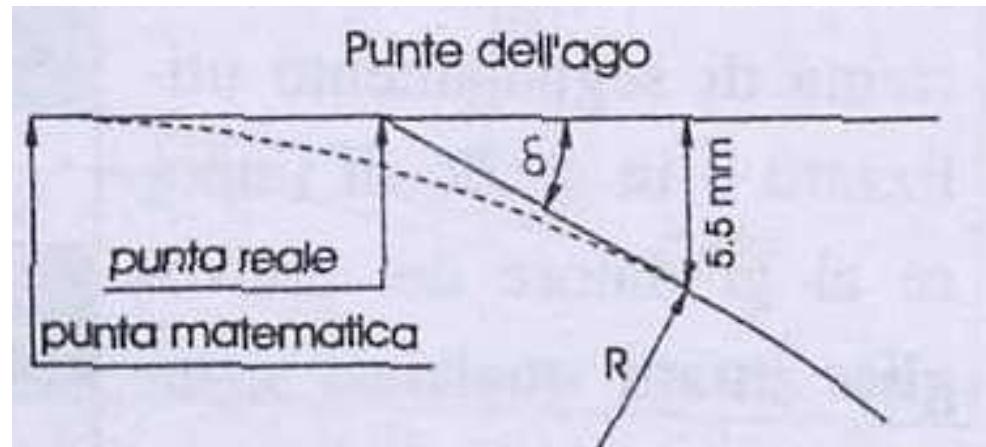


Progetto di Infrastrutture viarie

Limitazioni di velocità sui rami deviati di alcuni scambi

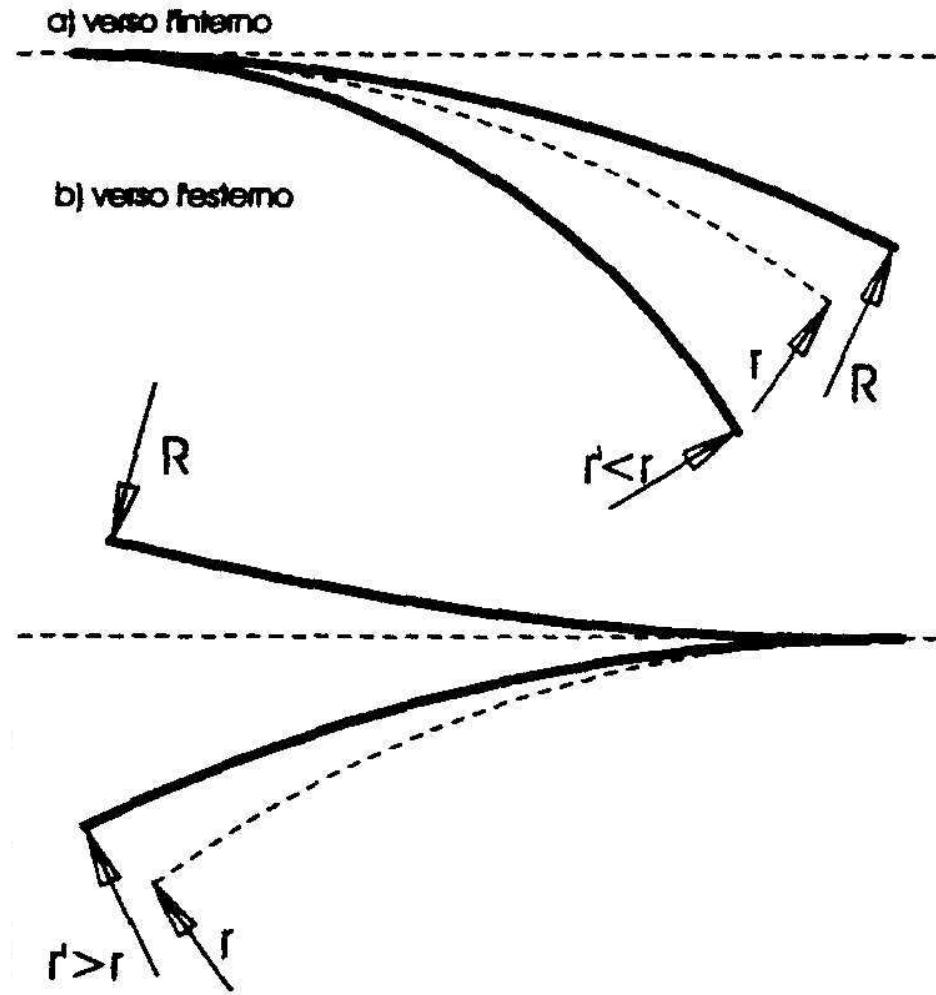
Sigla	V [km/h]	Cuore	Angolo di uscita
S 60/170/0,12	30	retto	6°50' 34''
S 60/250/0,092	30	retto	5°15' 30''
S 60/250/0,12	30	curvo	6°50' 34''
S 60/400/0,12	60	retto	4°13' 46''
S 60/170/0,074	60	curvo	5°21' 55''
S 60/1200/0,04	100	retto	2°17' 26''
S 60/3000/0,022	160	retto	1°15' 23''
S 60/6000/0,015	220	retto	0°51' 26''

Punte dell'ago: matematica e reale e contraccolpo



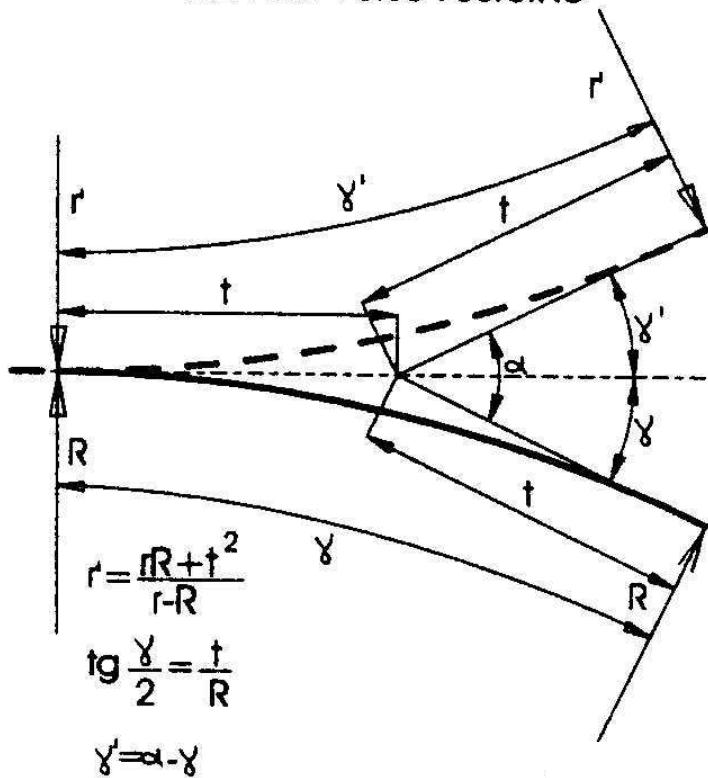
Progetto di Infrastrutture viarie

Scambio curvato

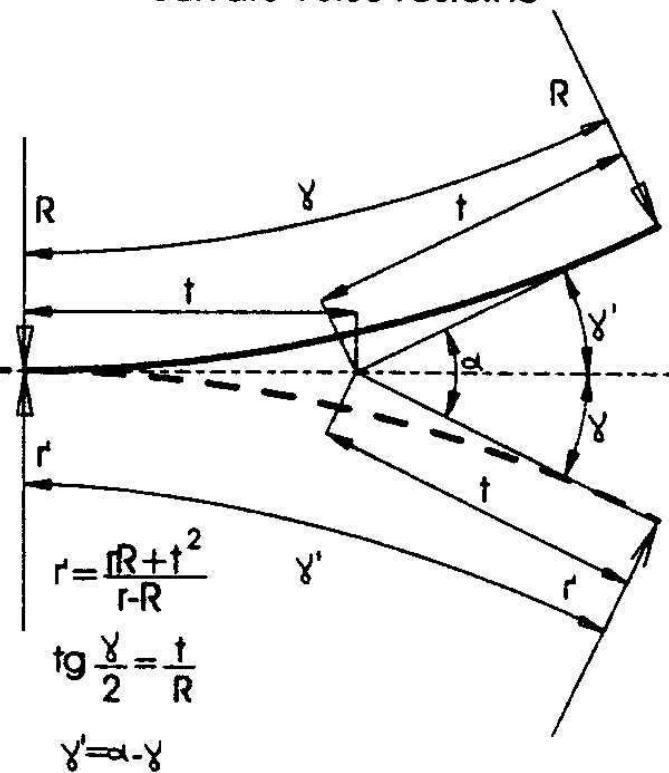


Scambio destro e sinistro curvato verso l'esterno

Scambio destro
curvato verso l'esterno

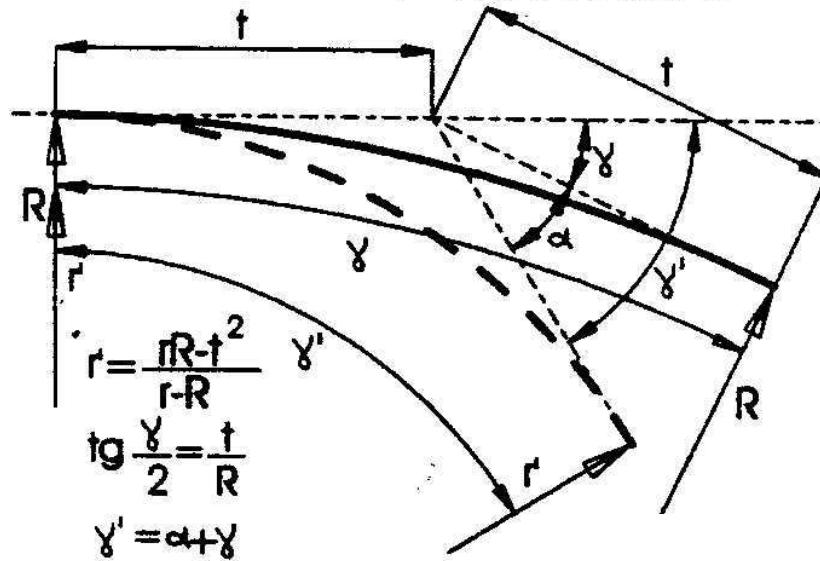


Scambio sinistro
curvato verso l'esterno

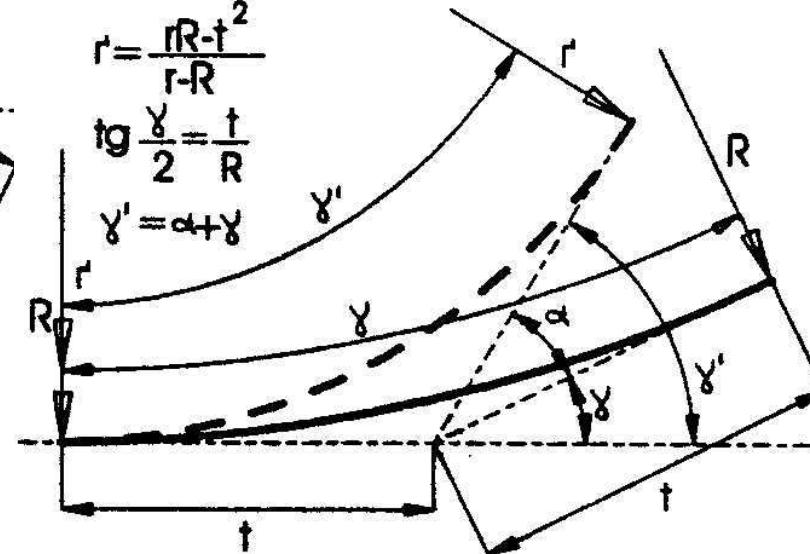


Scambio destro e sinistro curvato verso interno con deviazione interna

Scambio destro curvato verso l'interno con deviazione interna

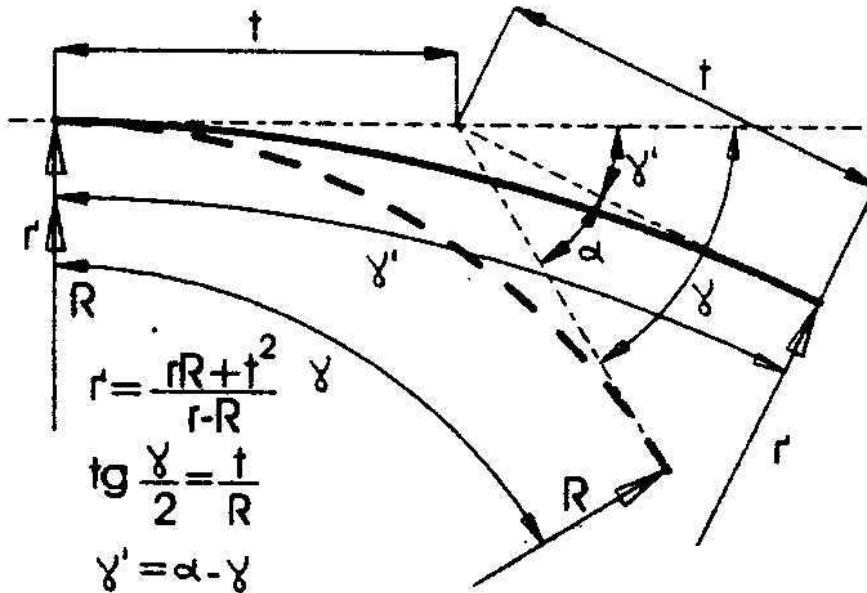


Scambio sinistro curvato verso l'interno con deviazione interna

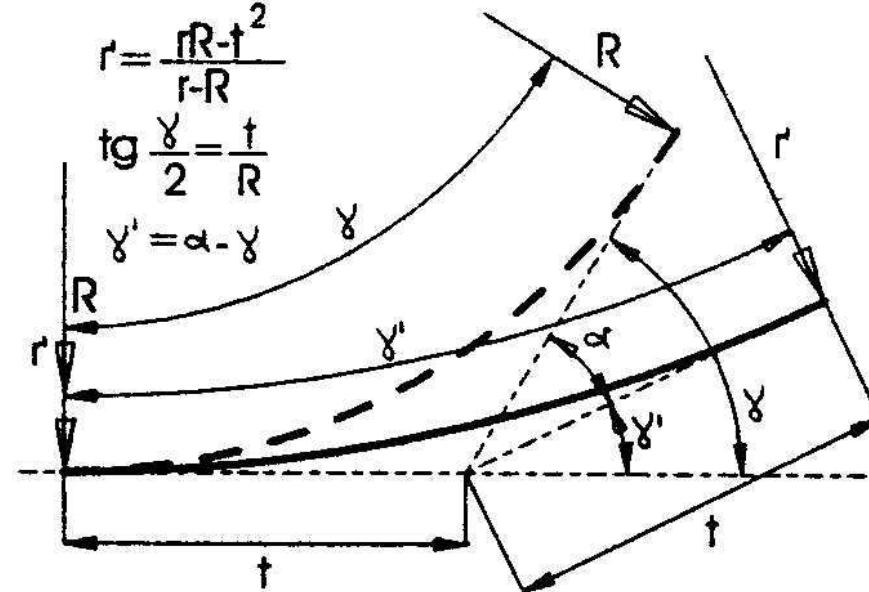


Scambio destro e sinistro curvato verso interno con deviazione esterna

Scambio destro curvato verso l'interno con deviazione esterna

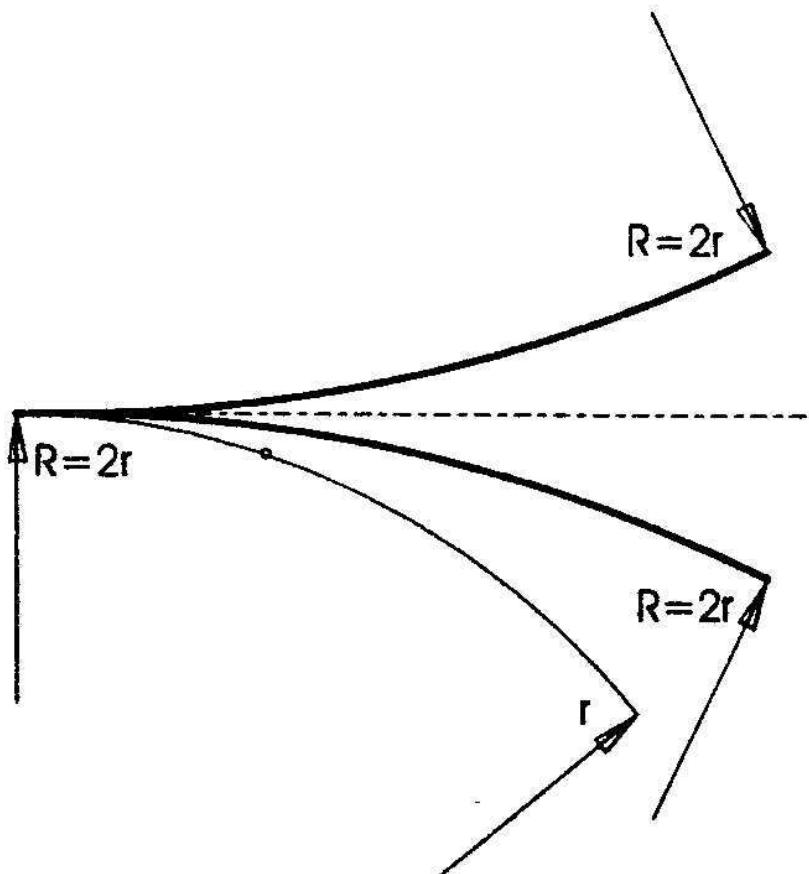


Scambio sinistro curvato verso l'interno con deviazione esterna



Progetto di Infrastrutture viarie

Scambio simmetrico



Progetto di Infrastrutture viarie

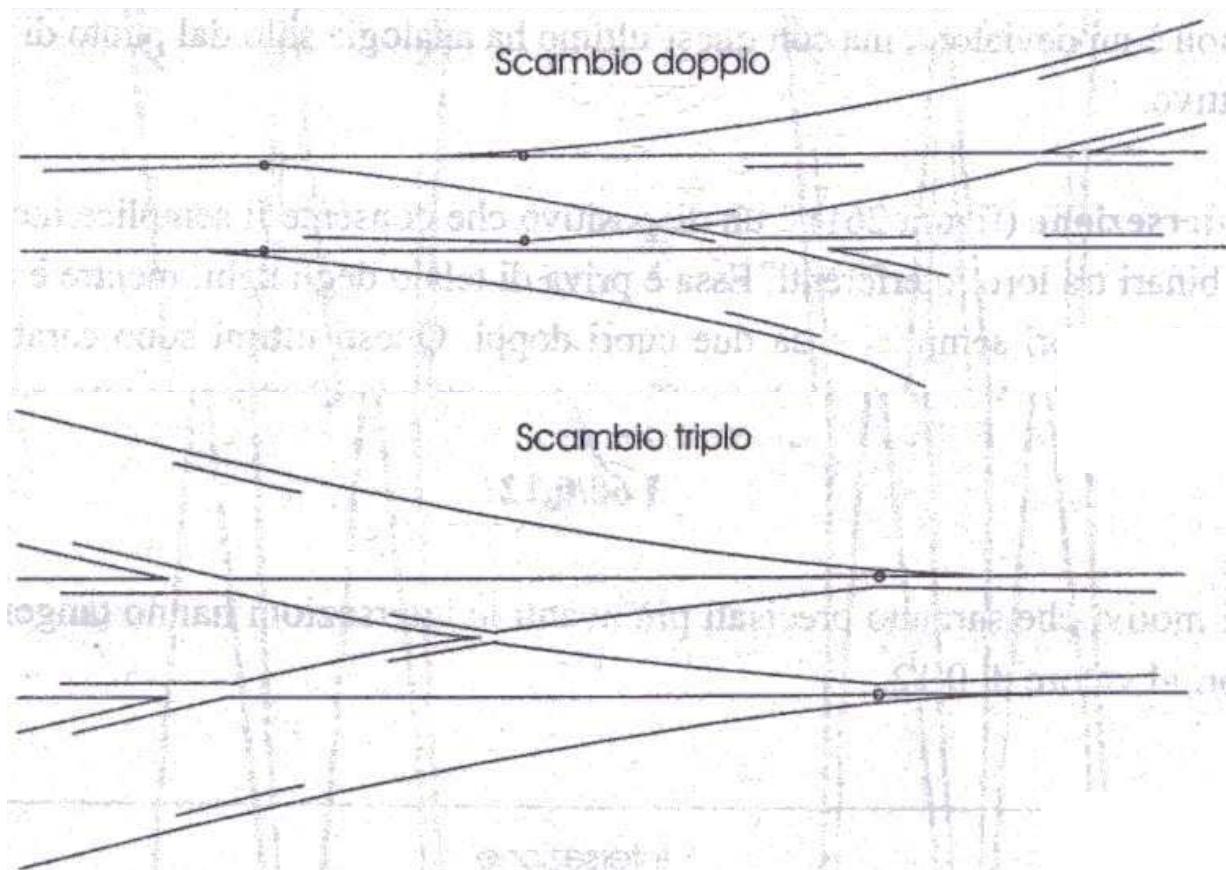
Valori del contraccolpo

Velocità in deviata [km/h]	Tempi di percorrenza [s]		Contraccolpo [m/s ³]	
	assi	carrelli	assi	carrelli
30	2,40	3,00	0,17	0,14
60	1,20	1,50	0,58	0,46
100	0,72	0,90	0,89	0,71
160	0,45	0,56	1,46	1,71
220	0,33	0,41	1,89	1,51

Progetto di Infrastrutture viarie

Scambi multipli

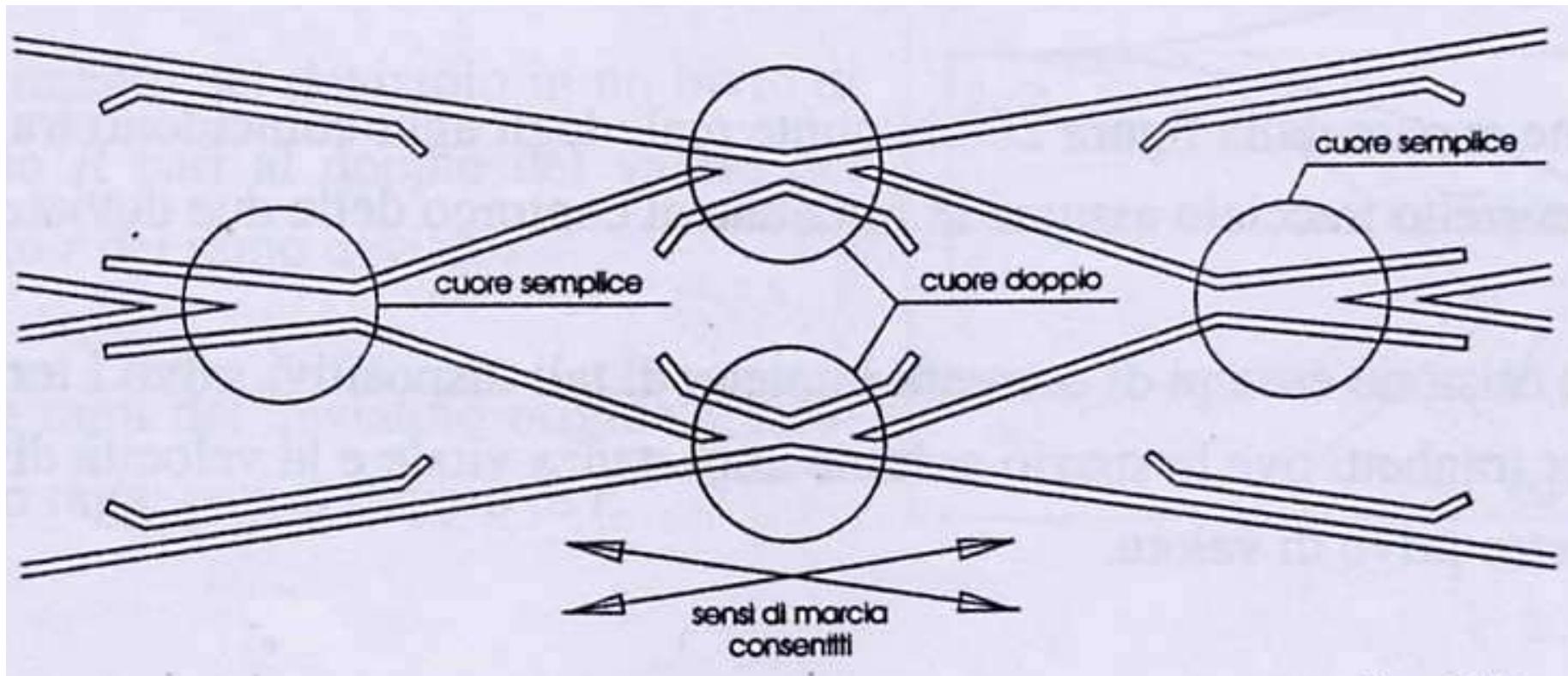
Lo scambio *doppio* è costituito da due dispositivi semplici che si susseguono con parziale penetrazione e ha un insieme di tre cuori che si compenetrano sino a potersi considerare un unico dispositivo di incrocio a tre punte; esistono anche *scambi tripli*, come riportato in figura.



Progetto di Infrastrutture viarie

Intersezioni

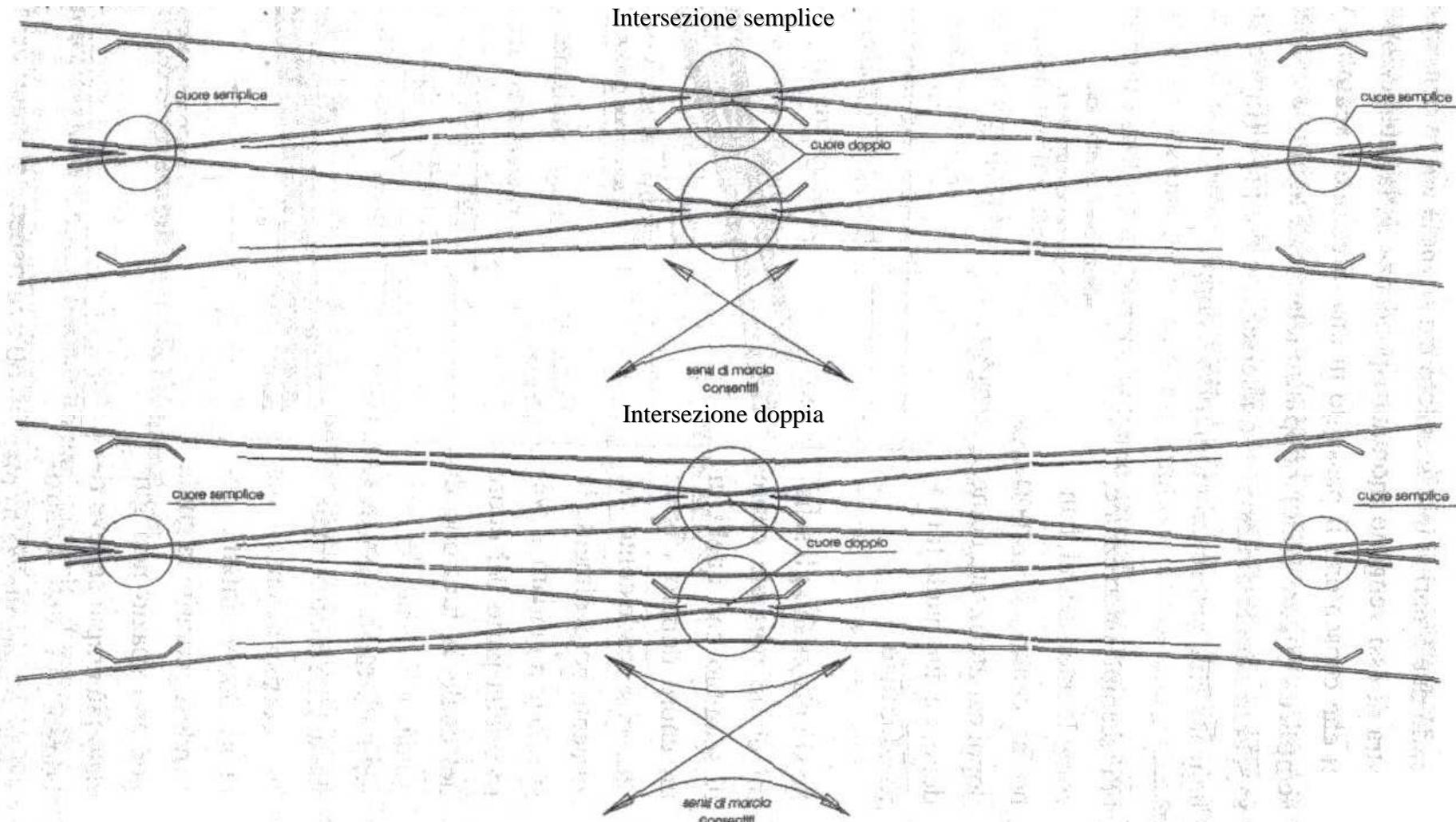
L'intersezione è un dispositivo che consente il semplice incrocio di due binari tra loro interferenti; esse sono classificate in base solo al tipo di rotaia e dell'angolo formato dall'asse dei due binari che si incrociano (per la sigla I 60/012: rotaie UIC 60 con angolo di $6^{\circ} 50' 34''$). In figura è illustrato lo schema di un'intersezione.



Progetto di Infrastrutture viarie

Scambi intersezione semplici o doppi

Quando, per due binari che s'incrociano, si vuole anche consentire il passaggio tra di essi si ha lo scambio *intersezione* che può essere *semplice* o *doppio* come indicati in figura.



Progetto di Infrastrutture viarie

Dimensionamento della sovrastruttura

Un possibile modello matematico (il più possibile aderente alla realtà fisica) che tenga conto dei sottosistemi coinvolti (veicolo e sovrastruttura ferroviaria e corpo stradale) deve fare riferimento ad un sistema chiuso. Tale sistema sarà pertanto:

- definito dalle caratteristiche geometrico-meccaniche dei componenti e da quelle reologiche dei legami che li uniscono,
- soggetto alle azioni esterne (masse ed accelerazioni dei veicoli e caratteristiche del sottofondo del corpo stradale).

Con riferimento quindi al solo veicolo ed al binario in figura è schematizzato un modello integrato veicolo/binario. Tali modelli adottati nella progettazione e verifica del binario richiedono, per valutarne la correttezza, una validazione sperimentale.

L'approccio classico in ogni caso prende in considerazione le *caratteristiche elastiche del binario* (generalmente nella schematizzazione del *Bussinesq*), per poi affrontare la *deformabilità della sovrastruttura* (con riferimento alla compatibilità dell'accoppiamento ruota-rotaia, agli oneri di manutenzione e di esercizio, al contenimento delle immissioni di vibrazioni e rumore nell'ambiente, al miglioramento dell'indice di confort del passeggero), tenendo altresì conto dell'*incremento dinamico* dovuto carichi mobili applicati alla sovrastruttura che producono sollecitazioni complesse (sollecitazioni statica, quasi-statica e dinamica) da analizzarsi in base alla frequenza che le caratterizzano. In particolare si affronta il *dimensionamento*: della *rotaia*, della *traversa*, degli *organi di attacco*, della *piattaforma in c.a.p.* (binario senza massicciata), *della massicciata* (binario con massicciata), del *sottofondo*.