



## Velocizzazione rete sarda, interventi infrastrutturali e analisi delle rettifiche di tracciato

### *Speeding up of the Sardinian network, infrastructure projects, analysis of layout corrections*

Dott. Ing. Nicola ARGIENTO <sup>(\*)</sup>

**Sommario** – Nell'articolo viene trattato il tema delle rettifiche di tracciato, indicando un metodo semplificato per il calcolo degli spostamenti massimi del binario dovuti all'incremento delle velocità attuali. Vengono illustrati, inoltre, gli obiettivi di riduzione dei tempi commerciali conseguenti gli investimenti esposti. Tutte le analisi vengono condotte lato infrastruttura, lungo la quale viene retestato il treno per il successivo upgrade al Rango P.

#### 1. Introduzione

Il trasporto regionale in Sardegna è caratterizzato da una forte disomogeneità del servizio sul territorio. In particolare a nord di Oristano abbiamo un servizio a frequenza rarefatta con treni che coprono distanze importanti, in tempi elevati e collegano centri a bassa densità di popolazione [1]. Per migliorare i collegamenti tra le città di Cagliari, Sassari e Olbia, la Regione ha acquistato otto nuovi treni pendolanti del tipo CAF ATR 365 (investimento di 56 mln €). Su 3,6 milioni di tr-km/anno previsti nel contratto di servizio Trenitalia-Regione, saranno circa 1,1 mln tr-km/anno quelli programmati con ATR 365. Il materiale rotabile è stato omologato sull'isola, per circolare in Rango C, con una campagna prove di circa sei mesi, condotta ai sensi della Fiche UIC 518 [8], tra la fine del 2014 e i primi mesi del 2015.

Contestualmente è in corso la valorizzazione dell'attuale Asset di RFI, con l'obiettivo di migliorare l'offerta di mobilità collettiva in termini di riduzione dei tempi commerciali di percorrenza.

Dopo attente analisi benefici-costi sono stati scelti gli opportuni, in termini di costi e benefici, interventi infrastrutturali, che permettessero di sfruttare al massimo le potenzialità di tale tipologia di materiale rotabile (velocità di punta a 180 km/h e assetto variabile):

- Sistema Controllo Marcia Treno lungo l'intera rete, per introduzione del rango P;

**Summary** – The article deals with the topic of layout adjustments, indicating a simplified method for calculating maximum displacements of the track caused by the increase in current speeds. It also explains the goals of reducing the commercial times consequent to the mentioned investments. All analyses are conducted on the infrastructure side, along which the train is retested for subsequent upgrade to Rank P.

#### 1. Introduction

Regional transport in Sardinia is characterised by a strong inhomogeneity of services on the territory. Especially north of Oristano we have a rarefied frequency service with trains covering considerable distances, in long times and connecting low population centres [1]. To improve connections between the cities of Cagliari, Sassari and Olbia, the Region has purchased eight new CAF ATR 365 type commuter trains (an investment of 56 million €). Out of 3.6 million tr-km/year planned in the Trenitalia - Region service contract, about 1.1 million tr-km/year are programmed using ATR 365. The rolling stock was approved on the island, to circulate in Rank C, with a test campaign of about six months, conducted in accordance with UIC Fiche 518 [8], between the end of 2014 and the early months of 2015.

Simultaneously, the enhancement of the current RFI Asset is underway, with the aim of improving the collective mobility offer in terms of the commercial travel time reduction.

After careful cost-benefit analyses the appropriate infrastructure works, in terms of costs and benefits were chosen, that would allow exploiting the full potential of this type of rolling stock (top speed at 180 km/h and tilting technology):

- Train Running Control System (SCMT – Sistema di Controllo Marcia Treno) along the whole network, for the introduction of rank P;

<sup>(\*)</sup> "Asset Management Pianificazione e Controllo" di Direzione Territoriale Produzione Verona – RFI.

<sup>(\*)</sup> "Asset Management Planning and Control" of the Territorial Production Management of Verona – RFI.

- Apparato Centrale Computerizzato Multistazione nel sud Sardegna (a sud di Oristano), con Blocco Automatico a Correnti Fisse ed emulazione del codice in sostituzione dell'attuale blocco conta assi con limitazione della velocità a 150 km/h;
- Rettifica Tracciati nel nord Sardegna, dove le velocità medie sono condizionate dalla tortuosità del tracciato.

L'up-grade da SSC a SCMT permetterà al nuovo materiale rotabile di circolare in Rango P sull'intera rete Sarda (19 minuti sulla relazione Cagliari-Sassari; 18 minuti sulla relazione Cagliari-Olbia; 10 minuti sulla Sassari-Olbia, fig. 1). I lavori sono in corso. L'investimento è stato considerato a carattere prioritario dato l'elevato rapporto benefici/costi.

L'ACCM a sud di Oristano consentirà di sfruttare la massima velocità dell'ATR 365 di 180 km/h (tre minuti sulla relazione Cagliari-Oristano, fig. 1). I lavori inizieranno entro fine 2017. L'investimento è localizzato per due ragioni: limitato traffico e tortuosità della restante linea. Inoltre, anche se non significativamente impattante in termini di riduzione dei tempi di percorrenza, considerati i costi, la manutenibilità e l'affidabilità, l'investimento resta un importante up-grade tecnologico agli attuali sistemi, nell'area a maggior valenza commerciale della regione.

Le rettifiche di tracciato, collocate nelle tratte più tortuose, hanno una valenza di carattere generale, e cioè incrementare le velocità di fiancata e, conseguentemente, i tempi commerciali di percorrenza di tutto il materiale ro-

- Multi-station Central Computerised Device (ACCM - Apparato Centrale Computerizzato Multistazione) in southern Sardinia (south of Oristano), with Fixed Currents Automatic Block (FCAB) and emulation of the code, replacing the current axle counter block with speed limitation to 150 km/h;
- Route Adjustments in northern Sardinia, where average speeds are constrained by the tortuosity of the layout.

The upgrade from SSC to SCMT will allow the new rolling stock to run in Rank P along the entire Sardinian network (19 minutes on the Cagliari-Sassari connection; 18 minutes on the Cagliari-Olbia connection; 10 minutes on the Sassari-Olbia one, fig. 1). Works are underway. The investment was considered a priority due to the high benefit-cost ratio.

The ACCM south of Oristano will help exploit the maximum speed of the ATR 365 of 180 km/h (three minutes on the Cagliari-Oristano connection, fig. 1). Works will begin by the end of 2017. The investment is localised for two reasons: limited traffic and tortuosity of the remaining line. Also, it is a major technological upgrade to existing systems, in the area with greater commercial value in the region although not significantly impacting in terms of reduced running time, considering costs, maintainability and reliability.

Layout adjustments, located on the most winding sections, have general significance, namely to increase the speed limits and, consequently, commercial running times

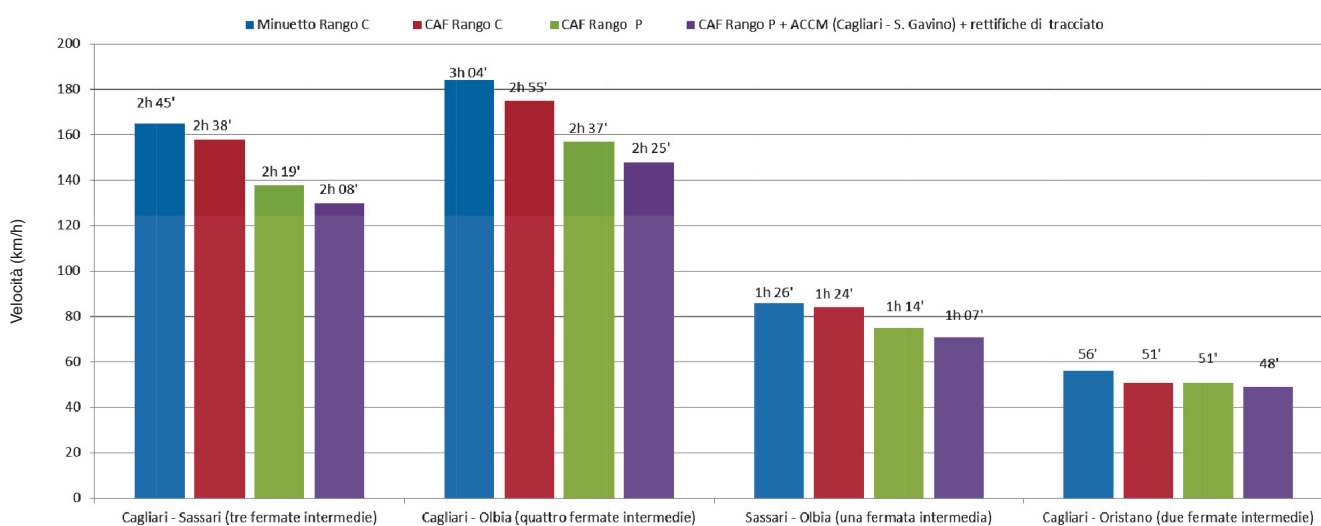


Fig. 1 - Simulazione dei tempi commerciali (compresi fermate e allungamenti) di progetto, lungo le principali relazioni. Il minuetto con una  $V_{max}$  di 130 km/h, non sfrutta interamente le attuali potenzialità di linea. Anche in rango C l'ATR 365 risulta più performante. Introduzione ACCM comporta risparmio di tre minuti sulla relazione Cagliari-Oristano (incremento da 150 a 180 km/h) che si cumulano, sulla Cagliari-Sassari e Cagliari-Olbia, ai risparmi ottenuti con le rettifiche.

Fig. 1 - Simulation of commercial times (including stops and lengthening) of the project, along the main connections. The minuetto with a  $V_{max}$  of 130 km/h, does not fully exploit the existing potential of the line. Even in rank C the ATR 365 has a higher performance. The introduction of the ACCM involves savings of three minutes on the Cagliari-Oristano connection (an increase from 150 to 180 km/h) that add on to the savings obtained with the adjustments, on the Cagliari-Sassari and Cagliari-Olbia connection.

tabile (Rango A,B,C,P, fig. 2). In fig. 1 sono illustrate le relative riduzioni dei tempi in rango P. I lavori sono in corso sulla tratta Chilivani-Sassari, tutto il resto è in fase di progettazione definitiva:

Intervento	Costo (M €)
SCMT	30
ACCM con BACF	22
Rettifiche tracciato	30
Totale	82

2. Rettifiche di tracciato – impostazione

La realizzazione di opere e le relative scelte progettuali sono state indirizzate verso interventi i cui tempi di

of all rolling stock (Rank A, B, C, P, fig. 2). Fig. 1 shows the relative time reductions in rank P. Works are underway on the Chilivani-Sassari route, everything else is at the final design stage:

Intervention	Cost (M €)
SCMT	30
ACCM with FCAB	22
Layout adjustments	30
Total	82

2. Layout adjustments - setting

The implementation of works and related design choices were directed towards interventions whose construction

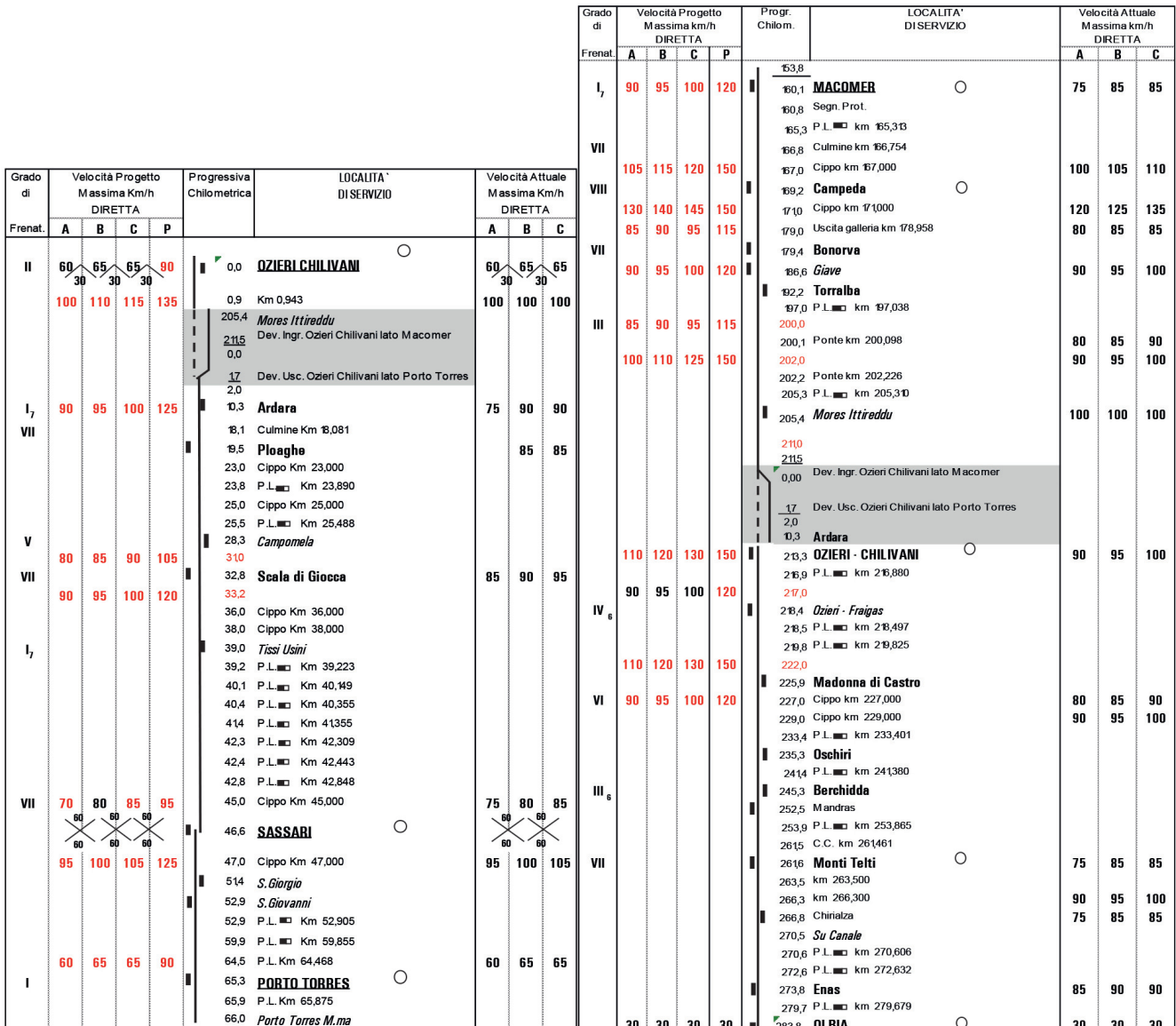


Fig. 2 - Fiancate a confronto: Chilivani-P. Torres; Macomer-Olbia.  
Fig. 2 - Comparison of speeds: Chilivani-P. Torres; Macomer-Olbia.

realizzazione e gli investimenti necessari fossero certi e limitati con benefici indotti, in termini di miglioramento del servizio offerto, concreti. L'obiettivo è stato individuare un metodo che permettesse di ottenere il valore massimo possibile della velocità, su linee lente, con spostamenti minimi del binario e con conseguente ridotto impegno di risorse economiche. Il metodo, senza escluderne l'utilizzo anche in altri contesti, risulta particolarmente efficace su linee a basso traffico, per le quali non sono economicamente giustificati importanti interventi di potenziamento. In tali contesti, che generalmente si sviluppano lungo aree poco urbanizzate, tanti piccoli interventi lungo la linea possono condurre ad un aumento medio della velocità di 10÷15 punti percentuali, con costi significativamente inferiori a quanto necessario per varianti di tracciato puntuali, di pari beneficio.

Lo studio di fattibilità (fig. 3) è un processo iterativo che pone in relazione gli incrementi di velocità, ottenuti a partire dalle modifiche dei parametri geometrici delle curve (Raggio, Raccordo, Sopraelevazione) e i conseguenti spostamenti del binario, con i costi da sostenere. Questo diventa uno strumento decisionale a supporto delle politiche di investimento per il gestore infrastrutturale e per i soggetti/enti che acquistano il servizio di tra-

time and necessary investments were certain and limited and with concrete induced benefits, in terms of improvement of the service offered. The goal was to identify a method that would allow obtaining the maximum possible speed value, on slow lines, with small displacements of the track and resulting in reduced commitment of economic resources. The method, without excluding use also in other contexts, is particularly effective on low traffic lines, for which important upgrade operations are not justified economically. In such contexts, which generally develop along scarcely urbanised areas, many small interventions along the line may lead to an average increase in speed of 10 to 15 percentage points, with significantly lower costs than what is necessary for precise route changes, of equal benefit.

The feasibility study (fig. 3) is an iterative process that relates speed increases, obtained from the changes of the geometric parameters of the curves (Radius, Joint, Cant) and the resulting displacement of the track, with the costs to be incurred. This becomes a decision-making tool for the infrastructure manager and for individuals/entities purchasing the transport service to support investment policies. Establishing trade objectives must be, however, compatible with the costs involved.

Inquadramento Classification	<ul style="list-style-type: none"><li>Raccolta dei parametri geometrici delle curve (raggio, sopraelevazione, lunghezza raccordi) <i>Collection of geometric parameters of the curves (radius, cant, joints length)</i></li><li>Valutazione delle velocità nel rispetto di parametri cinematici <i>Evaluation of the speed in respect of kinematic parameters</i></li></ul>
Studio di fattibilità / Progetto preliminare Feasibility study / Preliminary project	<ul style="list-style-type: none"><li>Individuazione curve critiche e modifica, ai fini di un incremento della velocità, in ordine di priorità: <i>Identification of critical curves and modification, in order to increase the speed, in order of priority, of:</i><ul style="list-style-type: none"><li>1) della sopraelevazione in curva; <i>cant in curves;</i></li><li>2) dei raccordi parabolici; <i>parabolic joints;</i></li><li>3) dei raggi di curvatura. <i>radii of curvature.</i></li></ul></li><li>Verifica delle condizioni di confort e di sicurezza <i>Verification of comfort and safety conditions</i></li><li>Calcolo degli spostamenti massimi <i>Calculation of maximum displacements</i></li><li>Stima di prima approssimazione dei costi di intervento e analisi costi benefici <i>First approximation estimate of the costs of intervention and cost-benefit analysis</i></li></ul>
Progetto definitivo Final project	<ul style="list-style-type: none"><li>Rilievo Sezioni <i>Section survey</i></li><li>Studio del tracciato <i>Layout study</i></li><li>Progettazione Armamento e Opere Civili <i>Permanent Way and Civil Works Design</i></li></ul>

Fig. 3 - Fasi della progettazione.  
Fig. 3 - Design phases.



sporto. Fissare obiettivi commerciali deve essere, comunque, compatibile con i costi da sostenere.

Come si evince dalla fig. 4, oltre un determinato incremento percentuale delle velocità medie di percorrenza, i costi crescono molto rapidamente. Non ha più senso parlare di piccoli interventi diffusi, ma vanno messi in campo investimenti importanti con vere e proprie varianti di tracciato.

## 3. Rettifiche di tracciato – Condizioni per il calcolo delle velocità massime d'orario

Ai fini della sicurezza e del confort di marcia, è necessario che le velocità massime della linea rispettino quattro condizioni, imposte dalla normativa internazionale [9] e recepite in istruzioni tecniche della Rete Ferroviaria Italiana [5], [6].

Utilizzando la seguente simbologia:

- $a_{nc}$  = accelerazione non compensata [ $m/s^2$ ];
- $V$  = velocità di tracciato o di linea [ $m/s$ ];
- $R$  = raggio della curva planimetrica [ $m$ ];
- $g$  = accelerazione di gravità [ $m/s^2$ ];
- $H$  = sopraelevazione in curva [ $m$ ];

As can be seen in fig. 4, besides a given percentage increase in average speed of travel, the costs rise very quickly. It no longer makes sense to speak of widespread small interventions, but major investments with real route changes must be put in place.

## 3. Layout adjustments - Conditions for the calculation of the maximum time speeds

For the purposes of safety and driving comfort, it is necessary that the maximum speeds of the line meet four conditions imposed by international rules [9] and implemented in the technical instructions of the Italian Railway Network [5], [6].

Using the following symbols:

- $a_{nc}$  = uncompensated acceleration [ $m/s^2$ ];
- $V$  = route or line speed [ $m/s$ ];
- $R$  = radius of the planimetric curve [ $m$ ];
- $g$  = gravity acceleration [ $m/s^2$ ];
- $H$  = cant in curves [ $m$ ];

## Stima dei costi per incrementi di velocità pari a circa il 5, 10, 15 e 20 %

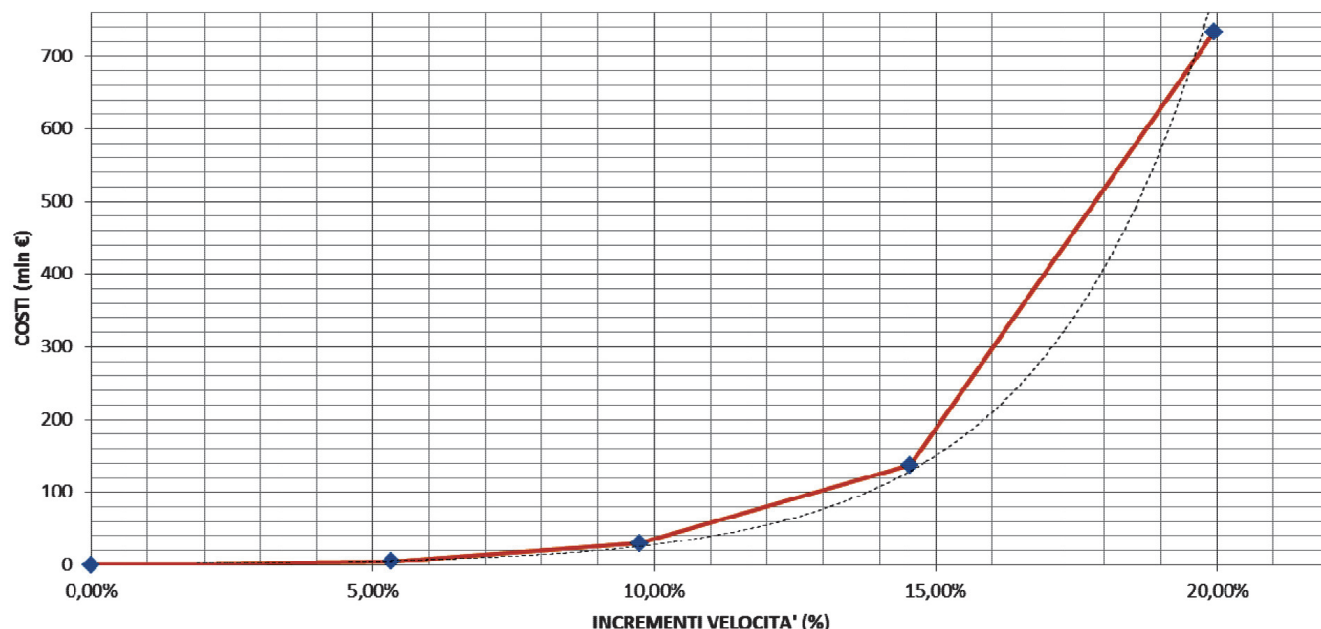


Fig. 4 - Tratta Oristano-Sassari (Nord Sardegna). 10% (rettifiche di tracciato); 15% (variante a maggior rapporto Benefici/costi rispetto alle cinque individuate dal progetto di cui sotto + rettifiche di tracciato); 20% (cinque varianti + rettifiche di tracciato). Gli importi delle varianti sono stati ricavati, attualizzati, dal progetto preliminare di cinque varianti tra Oristano e Sassari, approvato con delibera CIPE 91/2004.

Fig. 4 - Oristano-Sassari Route (Northern Sardinia). 10% (track adjustments); 15% (variant with higher benefits/costs ratio compared to the five identified by the project mentioned below + track adjustments); 20% (five variants + track adjustments). The amounts of the variants have been derived, updated, from the preliminary project for five variations between Oristano and Sassari, approved by CIPE Resolution 91/2004.

$\Delta H$  = variazione della sopraelevazione [m];  
 $L$  = lunghezza raccordo parabolico [m];  
 $s$  = distanza fra le superfici di rotolamento delle ruote di un asse (circa 1,5 m) [m];  
 $\psi = \dot{a}_{nc}$  = Contraccollo, variazione dell'accelerazione centrifuga non compensata nell'unità di tempo [m/s<sup>3</sup>];  
 $\omega$  = Velocità di rotazione [rad/s];  
 Rango = parametro che può assumere quattro valori, espressi dalle lettere "A", "B", "C" e "P". Ciascun rango di velocità è attinente a determinati tipi di circolazione.

Si scrivono le quattro condizioni del moto:

1) Accelerazione non compensata in curva (insufficienza di sopraelevazione)

$$a_{nc} = \frac{v^2}{R} - \frac{g \cdot H}{s} \leq (a_{nc})_{lim}$$

Rango	$(a_{nc})_{lim}$ (m/s <sup>2</sup> )	$I_{lim}$ (mm)
A	0.6	92
B	0.8	122
C	1	153
P	1.8	275

2) Limiti massimi

Rango A	Rango B	Rango C	Rango P
$V_{max} = 140 \text{ km/h}$	$V_{max} = 160 \text{ km/h}$	$V_{max} = 200 \text{ km/h}$	$V_{max} = 200 \text{ km/h}$

3) Contraccollo (variazione di insufficienza di sopraelevazione)

$$\psi = \dot{a}_{nc} = \frac{da_{nc}}{dt} \leq \left( \frac{da_{nc}}{dt} \right)_{lim}$$

Lungo un raccordo parabolico a V costante il contraccollo è costante:

$$\frac{da_{nc}}{dt} = \frac{\Delta a_{nc}}{\Delta t} \text{ con } \Delta t = \frac{L}{V} \quad e \quad \Delta a_{nc} = a_{nc} - 0 = a_{nc}$$

Percorrendo l'intero raccordo alla V massima consentita avremo che

$$\psi = \frac{V_{max}}{L} \cdot a_{nc} \leq \left( \frac{da_{nc}}{dt} \right)_{lim}$$

Rango	$\psi$ (m/s <sup>3</sup> )	$\frac{dl}{dt}$ (mm/s)
A	0,25	38
B	0,35	54
C	0,40	61

$\Delta H$  = cant variation [m];  
 $L$  = length of parabolic joint [m];  
 $s$  = distance between the rolling surfaces of the wheels of an axle (approximately 1.5 m) [m];  
 $\psi = \dot{a}_{nc}$  = Jerk, variation of uncompensated centrifugal acceleration in the time unit [m/s<sup>3</sup>];  
 $\omega$  = Rolling speed [rad/s];  
 Rank = parameter which can take four values, expressed by the letters "A", "B", "C" and "P". Each speed rank is relevant to certain types of traffic.

The four motion conditions are written:

1) Uncompensated cornering acceleration (cant deficiency)

$$a_{nc} = \frac{v^2}{R} - \frac{g \cdot H}{s} \leq (a_{nc})_{lim}$$

Rank	$(a_{nc})_{lim}$ (m/s <sup>2</sup> )	$I_{lim}$ (mm)
A	0.6	92
B	0.8	122
C	1	153
P	1.8	275

2) Maximum limits

Rank A	Rank B	Rank C	Rank P
$V_{max} = 140 \text{ km/h}$	$V_{max} = 160 \text{ km/h}$	$V_{max} = 200 \text{ km/h}$	$V_{max} = 200 \text{ km/h}$

3) Jerk (change of cant deficiency)

$$\psi = \dot{a}_{nc} = \frac{da_{nc}}{dt} \leq \left( \frac{da_{nc}}{dt} \right)_{lim}$$

Along a parabolic joint with constant V the jerk is constant:

$$\frac{da_{nc}}{dt} = \frac{\Delta a_{nc}}{\Delta t} \text{ with } \Delta t = \frac{L}{V} \quad \text{and} \quad \Delta a_{nc} = a_{nc} - 0 = a_{nc}$$

Along the entire connection at the maximum V allowed we have

$$\psi = \frac{V_{max}}{L} \cdot a_{nc} \leq \left( \frac{da_{nc}}{dt} \right)_{lim}$$

Rank	$\psi$ (m/s <sup>3</sup> )	$\frac{dl}{dt}$ (mm/s)
A	0.25	38
B	0.35	54
C	0.40	61

## 4) Velocità di rotazione (Rollio)

$$\frac{dH}{dt} = \frac{V}{L} \cdot \Delta H \leq \left(\frac{dH}{dt}\right)_{\lim}; \left(\omega = \frac{dH}{dt} \cdot \frac{1}{s}\right)$$

Rango	$\omega$ (rad/s)	$\frac{dH}{dt}$ (mm/s <sup>2</sup> )
A	0,036	54
B	0,038	57
C	0,040	60

Per la 1), la 2) e la 4), otteniamo facilmente i valori massimi di velocità. Poniamo, invece, la nostra attenzione sulla funzione contraccollo e cioè sulla condizione 3).

## 4. Rettifiche di tracciato – Contraccollo nei raccordi parabolici

I binari ferroviari sono concepiti in maniera tale che, transitandovi sopra ad una certa velocità nominale, le componenti trasversali della forza di gravità sul piano del fondo della cassa siano in equilibrio con la forza centrifuga. In tale modo si vogliono compensare ovvero ridurre al minimo le accelerazioni avvertite dal passeggero. Nel passaggio dal rettilineo alla curva, la stessa non dovrà essere collegata direttamente al rettilineo ma con una curva di transizione [4]. La curvatura dell'asse del binario aumenta, in maniera graduale da zero fino al raggiungimento del valore 1/R della curva in questione. Pertanto, al fine di ottenere un accettabile confort di viaggio, nei tracciati ferroviari, tra curve e rettilinei, vengono introdotti:

- sul piano verticale un raccordo di sopraelevazione, generalmente per semplicità costruttiva e manutentiva lineare;
- sul piano orizzontale una curva di raggio variabile dal valore infinito della retta a quello della curva circolare.

In sede di progetto, quindi, si prevedono un raccordo di sopraelevazione ed uno planimetrico di transizione, che generalmente è una parabola cubica del tipo:  $y(x) = \frac{x^3}{6LR}$ . Espressione valida in riferimento cartesiano con origine nel punto di tangenza tra rettilineo e raccordo, asse delle ascisse tangente al raccordo nell'origine e orientato positivamente nel verso di sviluppo del raccordo e con asse delle ordinate orientato positivamente verso il centro della curva [2].

Il contraccollo, a velocità costante, lungo un raccordo parabolico è costante:

- per curve con raggi sufficientemente grandi (come nel caso dei tracciati ferroviari) possiamo approssimare l' $x$  con l'ascissa curvilinea:  $x = 0 \rightarrow$  inizio raccordo  $x = L \rightarrow$  fine raccordo;
- il bilancio dell'accelerazione trasversale lungo il raccordo parabolico è tale che:  $a_{nc} = \frac{v^2}{r(x)} - \frac{g \cdot h(x)}{S}$ ,

## 4) Rotation speed (Rolling)

$$\frac{dH}{dt} = \frac{V}{L} \cdot \Delta H \leq \left(\frac{dH}{dt}\right)_{\lim}; \left(\omega = \frac{dH}{dt} \cdot \frac{1}{s}\right)$$

Rank	$\omega$ (rad/s)	$\frac{dH}{dt}$ (mm/s <sup>2</sup> )
A	0.036	54
B	0.038	57
C	0.040	60

For 1), 2) and 4), we easily obtain the maximum values of speed. Let us instead focus on the jerk function, namely the condition 3).

## 4. Layout adjustments – Jerk of parabolic joints

Railway tracks are designed in such a way that, traveling on them at a certain rated speed, the transverse components of the force of gravity on the bottom surface of the body are in balance with the centrifugal force. In this way one wants to compensate i.e. minimise the accelerations felt by the passenger. In the transition from straight line to curve, the same must not be connected directly to the straight stretch but with a transition curve [4]. The track axis curvature increases, in a gradual manner from zero up to the 1/R value of the curve in question. Therefore, in order to obtain an acceptable travelling comfort, in rail tracks, between curves and straight lines, the following are introduced:

- a cant joint on the vertical plane, generally for construction simplicity and maintenance of the line;
- a variable radius curve on the horizontal plane from the infinite value of the line to that of the circular curve.

During the design, therefore, a cant and a planimetric transition joint is planned, which is generally a cubic type parabola:  $y(x) = \frac{x^3}{6LR}$ . A valid expression in the Cartesian reference with origin at the point of tangency between the straight line and the joint, the abscissa axis tangent to the joint in the origin and positively oriented in the direction of development of the joint and with the ordinate axis positively oriented towards the centre of the curve [2].

The jerk, at constant speed, along a parabolic joint is constant:

- for curves with sufficiently large radius (as in the case of railway layouts) we can approximate  $x$  with the curvilinear abscissa:  $x = 0 \rightarrow$  joint start  $x = L \rightarrow$  joint end;
- the transversal acceleration balance along the parabolic joint is such that:  $a_{nc} = \frac{v^2}{r(x)} - \frac{g \cdot h(x)}{S}$ ,

$$\frac{1}{r(x)} \approx y''(x) = \frac{d^2 y}{dx^2},$$

- derivando rispetto al tempo si ottiene

$$\psi = \frac{da_{nc}}{dt} = \dot{a}_{nc} = V^2 y'''(x) \dot{x} - \frac{g}{s} h'(x) \dot{x};$$

- $\dot{x} = V$ ;  $y'''(x) = \frac{1}{LR}$ ;  $h'(x) = \frac{\Delta H}{L}$  raccordo di sopraelevazione lineare;

$$\psi = \dot{a}_{nc} = \frac{V}{L} \cdot (a_{nc})_{curva} = \frac{V^3}{LR} - \frac{g\Delta H}{SL} V$$

Abbiamo ottenuto una parabola cubica in funzione della Velocità, composta da due termini. Il primo dovuto al raccordo planimetrico, il secondo a quello altimetrico.

Per la soluzione esplicita della terza condizione di cui al § 3 ed approfondimenti sul fenomeno del contraccollo vedasi Appendice.

## 5. Rettifiche di tracciato – Sopraelevazione, raccordi, raggi

Le modifiche alle velocità di tracciato sono state effettuate prendendo in considerazione le variazioni di sopraelevazione (a multipli di cinque), della lunghezza dei raccordi parabolici e del raggio di curvatura. In prima battuta si è verificata la possibilità di velocizzare variando la sola sopraelevazione, poi il raccordo ed infine il raggio. In molti casi si è intervenuti contemporaneamente su tutti e tre. Un aumento della sola sopraelevazione può dare un contributo in termini di riduzione dell'accelerazione non compensata e del contraccollo, ma contemporaneamente comporta un aumento della velocità di rollo. Un aumento della lunghezza di raccordo migliora il contraccollo e il rollo ma non incide sull'accelerazione non compensata. L'aumento del raggio migliora le condizioni di accelerazione non compensata e di contraccollo ma non incide sul rollo. Pertanto in relazione ai valori di  $a_{nc}$ , di  $\psi$  e di  $\omega$ , ai fini della velocizzazione, nelle curve critiche, si è valutata la combinazione di  $\Delta H$ ,  $\Delta L$  ed  $\Delta R$  che rendesse minimi gli spostamenti del binario. In ogni singola tratta è stata individuata la curva con il valore minimo di velocità ed arrotondato al multiplo di cinque più prossimo. Sono state rimodulate le tratte nel rispetto del limite di lunghezza di 2000 m e della variazione massima di velocità (inferiore a 60 km/h su tratte contigue).

In fase di progetto definitivo, nel definire il valore ultimo delle velocità di fiancata, sono stati verificati tutti i valori di comfort e sicurezza, rispettate le lunghezze minime degli elementi di tracciato e progettato l'andamento altimetrico secondo le istruzioni tecniche RFI [5], [6]. Infine per le curve di angolo piccolo è stata prescritta una lunghezza minima di 30 m del tratto circolare atto a far riacquistare al veicolo la regolarità di marcia turbata dal raccordo e quindi ad evitare fenomeni di raddoppio dell'insufficienza di sopraelevazione. Per le curve contigue e contrapposte sono stati prescritti rettilinei non inferiori a 30

$$\frac{1}{r(x)} \approx y''(x) = \frac{d^2 y}{dx^2},$$

- deriving with respect to time we obtain

$$\psi = \frac{da_{nc}}{dt} = \dot{a}_{nc} = V^2 y'''(x) \dot{x} - \frac{g}{s} h'(x) \dot{x};$$

- $\dot{x} = V$ ;  $y'''(x) = \frac{1}{LR}$ ;  $h'(x) = \frac{\Delta H}{L}$  linear cant joint;

$$\psi = \dot{a}_{nc} = \frac{V}{L} \cdot (a_{nc})_{curva} = \frac{V^3}{LR} - \frac{g\Delta H}{SL} V$$

A cubic parabola was obtained as a function of Speed, composed by two terms. The first due to the planimetric joint, the second to the elevation one.

For the explicit solution to the third condition referred to in § 3 and insights on the jerk phenomenon see the Appendix.

## 5. Layout adjustments - Cant, joints, radii

Changes to the layout speed were carried out taking into account the cant (in multiples of five), the length of the parabolic joints and the radius of curvature variations. In the first instance the possibility of speeding up varying the cant alone was verified, then the joint and finally the radius. In many cases intervention was on all three simultaneously. An increase of the cant alone can contribute in terms of non-compensated acceleration and jerk reduction, but it simultaneously leads to an increase of the rolling rate. Increased connection length improves the jerk and rolling but does not affect uncompensated acceleration. The increase in radius improves uncompensated acceleration conditions and jerk but does not affect rolling. Therefore in relation to the values of  $a_{nc}$ , of  $\psi$  and of  $\omega$ , for the purposes of speeding up, in critical curves, the combination of  $\Delta H$ ,  $\Delta L$  and  $\Delta R$  was evaluated that would make track displacements minimal. The curve with the minimum speed value and rounded to the nearest multiple of five was identified in each section. Routes were remodelled in accordance with the length limit of 2000 m and the maximum change in speed (less than 60 km/h on contiguous routes).

During the final project, all the values of comfort and safety were verified, in defining the ultimate value of the speed limits, the minimum lengths of the layout elements have been observed and the altimetric trend was designed according to RFI technical instructions [5], [6]. Finally for small angle curves a minimum length of 30 m of the circular section was provided suitable to allow the vehicle to regain regular running troubled by the joint and hence to avoid cant deficiency doubling phenomena. For adjacent and opposing curves straight lines were provided of not less than 30 m and, on opposite curves, the preferred solution to the inclusion of straight lines insufficient to dampen the disturbance of travel of the vehicle was that to put in contact the transition joints, resulting in continuous rotation and variation of constant cant deficiency [3].



m e, su curve contrapposte, la soluzione preferita all'inserimento di rettifili insufficienti a smorzare il turbamento della marcia del veicolo è stata di porre a contatto i raccordi di transizione, con conseguente rotazione continua e variazione di insufficienza di sopraelevazione costante [3].

## 5.1. Variazione raccordi parabolici e relativi spostamenti massimi

L'inserimento di un raccordo parabolico tra curva e rettilineo riduce il raggio di un valore  $m = \frac{L^2}{24R}$ .

Pertanto, se passiamo dalla condizione  $L_1$  a  $L_2$ , otteniamo una curva in posizione finale con il tratto circolare traslato di

$$\Delta m = m_2 - m_1 = \frac{L_2^2 - L_1^2}{24R} \cdot R = \text{Raggio Primitiva} \cong R_1 \cong R_2.$$

Arretramento inizio del raccordo parabolico:  $\Delta x = \frac{\Delta L}{2}$ .

Il raccordo incide sulla velocità in termini di contraccolpo e rollio (3° e 4° condizione). L'allungamento dei raccordi comporta spostamenti molto piccoli del binario. Otteniamo così, con oneri modesti, incrementi significativi di velocità (tabella 1).

Nell'esempio di cui sopra, la condizione limitante era la 4° (rollio). Con l'aumento della lunghezza di raccordo di 15 metri è venuto meno il suddetto vincolo, ma con 140 mm di sopraelevazione la 1ª condizione (accelerazione non compensata) imponeva un valore massimo di circa 110 km/h. L'aumento di 20 mm ha consentito un ulteriore incremento di circa 4 km/h sulle tre curve. Gli spostamenti massimi a centro curva, indicati in tabella, sono inferiori ai 20 cm. Si è passati da una situazione con  $V_c=105$  km/h a  $V_c=115$  km/h.

Infine portando le curve 6 e 7 (v. ancora tabella 1) a 495 m di raggio, con uno spostamento complessivo massimo, a centro curva, rispettivamente di 40 e 30 cm, (vedi prossimo paragrafo), la  $V_p$  massima diventa di 135 km/h.

## 5.2. Variazione raggi e relativi spostamenti massimi

La condizione 1° del paragrafo 3, pone la velocità in funzione del raggio di curva e della sopraelevazione. Una volta raggiunti i limiti della sopraelevazione fissati a 160

## 5.1. Change in parabolic joints and related maximum displacements

The insertion of a parabolic connection between the curve and the straight line reduces the radius of a value  $m = \frac{L^2}{24R}$ . Therefore, if we pass from condition  $L_1$  to  $L_2$ , we get a curve in the final position with the circular path shifted by:

$$\Delta m = m_2 - m_1 = \frac{L_2^2 - L_1^2}{24R} \cdot R = \text{Primitive Radius} \cong R_1 \cong R_2.$$

Backing at the beginning of the parabolic joint  $\Delta x = \frac{\Delta L}{2}$ .

The joint has an impact on speed in terms of jerk and rolling (3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> condition). The elongation of the fittings involves very small displacements of the track. Thus significant speed increases (table 1) are obtained, with modest expenses.

In the above example, the limiting condition was number 4° (rolling). With increasing joint length of 15 metres the fulfilment of this obligation failed, but with 140 mm cant condition 1° (uncompensated acceleration) imposed a maximum value of approximately 110 km/h. The increase of 20 mm allowed a further increase of about 4 km/h on the three curves. The maximum displacements in the middle of the curve, indicated in the table, are less than 20 cm. We have passed from a situation where  $V_c = 105$  km/h to  $V_c = 115$  km/h.

Finally bringing curves 6 and 7 (see table 1) to a radius of 495 m, with maximum total displacement, at the centre of the curve, of 40 and 30 cm respectively, (see next paragraph), the maximum  $V_p$  becomes 135 km/h.

## 5.2. Change of radii and related maximum displacements

Condition 1° of paragraph 3, puts the speed as a function of the curve radius and cant. Once the cant limits set at 160 mm are reached, the only way to speed up is the increase of the radius.

Increasing the radius means accepting considerable displacements. We pass from the order of magnitude of centimetres, required for parabolic fittings, to the order of metres. In our case, this solution was adopted with maximum planimetric displacements of the track, of the order of one

TABELLA 1 – TABLE 1

Variazione dei raccordi parabolici nelle curve 5, 6 e 7 della tratta Chilivani-Ardara, Linea Chilivani-P. Torres  
Variation of parabolic joints in curves 5, 6 and 7 of the Chilivani-Ardara route, Chilivani-P. Torres Line

Curva Curve	R <sub>1</sub> (m)	L <sub>1</sub> (m)	H <sub>1</sub> (mm)	R <sub>2</sub> (m)	L <sub>2</sub> (m)	H <sub>2</sub> (mm)	Δm(m)	Δx(m)	V <sub>1</sub> rango C (km/h)	V <sub>2</sub> rango C (km/h)	V <sub>1</sub> rango P (km/h)	V <sub>2</sub> rango P (km/h)
n°5	495,0	70,00	140	495,0	85,00	160	0,19571	5,00	108,00	114,58	131,99	135,13
n°6	490,0	70,00	140	490,0	85,00	160	0,19770	5,00	108,00	114,00	131,32	134,45
n°7	490,0	70,00	140	490,0	85,00	160	0,19770	5,00	108,00	114,00	131,32	134,45

millimetri, l'unico modo per velocizzare è l'incremento del raggio.

Aumentare il raggio significa accettare spostamenti considerevoli. Passiamo dall'ordine di grandezza dei centimetri, previsti per i raccordi parabolici, all'ordine dei metri. Nel nostro caso, questa soluzione è stata adottata con spostamenti planimetrici del binario massimi, dell'ordine del metro. Tranne un caso particolare, riportato in tabella 1, in cui l'attuale tracciato va traslato di circa 40 metri. Nella fig. 5 illustriamo come sono stati valutati gli spostamenti massimi.

Considerato che lo sviluppo di una curva (S) e il relativo raccordo parabolico (L) sono parametri noti dai prospetti riassuntivi delle curve (fig. 6) ricaviamo facilmente l'arco di circonferenza di raggio R approssimabile a S - L.

Posto che:

$$\frac{S-L}{R} = 2\alpha = \text{angolo al centro};$$

$$m = \frac{L^2}{24 R};$$

$$R + m \approx R;$$

$$d = \text{distanza tra i centri.}$$

Nel passaggio da  $R_1$  a  $R_2$  otteniamo un arretramento di inizio curva pari a:

$$\Delta x \approx (R_2 + m_2) \cdot \tan \alpha - (R_1 + m_1) \cdot \tan \alpha \approx (R_2 - R_1) \tan \alpha;$$

se modifichiamo anche il raccordo parabolico:

$$\Delta x \approx (R_2 - R_1) \tan \alpha + \frac{L_2}{2} - \frac{L_1}{2}.$$

Lo spostamento massimo in corrispondenza del centro curva pari a  $M_{\max}$  è tale che:

$$M_{\max} + (R_2 - m_2) = (R_1 - m_1) + d \Rightarrow M_{\max} + R_2 = R_1 + d$$

$$d = \frac{(R_2 + m_2)}{\cos \alpha} - \frac{(R_1 + m_1)}{\cos \alpha} \approx \frac{R_2 - R_1}{\cos \alpha}$$

$$M_{\max} = R_1 - R_2 + \frac{R_2}{\cos \alpha} - \frac{R_1}{\cos \alpha} = R_1 \left(1 - \frac{1}{\cos \alpha}\right) + \dots$$

$$\dots - R_2 \left(1 - \frac{1}{\cos \alpha}\right) = \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1\right) (R_2 - R_1)$$

Con tali modifiche (tabella 2) la velocità massima raggiungibile passa da 90 a 100 km/h e da 105 a 120 km/h rispettivamente per il rango C ed il rango P.

## 6. Rettifiche di tracciato: velocizzazione Nord Sardegna

Il metodo di calcolo sviluppato è stato applicato alla velocizzazione delle tratte di linea relativamente tortuose, in Sardegna, a nord di Oristano, nell'ambito della Direzione Territoriale Produzione di Cagliari (fig. 7).

Sulla base di quanto su esposto è stato definito un obiettivo di elevazione della velocità media di fiancata a

metre. Except for one particular case, shown in table 1, where the current route must be translated for about 40 metres. Fig. 5 illustrate how maximum displacements were evaluated.

Considering that the development of a curve (S) and its parabolic joint (L) are parameters known by summary statements of the curves (fig. 6) we easily obtain the circumference arc of radius R approximable to S - L.

Given that:

$$\frac{S-L}{R} = 2\alpha = \text{centre angle};$$

$$m = \frac{L^2}{24 R};$$

$$R + m \approx R;$$

$$d = \text{distance between the centres.}$$

In the transition from  $R_1$  to  $R_2$  we get a backing of the curve start of:

$$\Delta x \approx (R_2 + m_2) \cdot \tan \alpha - (R_1 + m_1) \cdot \tan \alpha \approx (R_2 - R_1) \tan \alpha;$$

if we modify also the parabolic joint:

$$\Delta x \approx (R_2 - R_1) \tan \alpha + \frac{L_2}{2} - \frac{L_1}{2}.$$

The maximum displacement at the centre of the curve equal to  $M_{\max}$  is such that:

$$M_{\max} + (R_2 - m_2) = (R_1 - m_1) + d \Rightarrow M_{\max} + R_2 = R_1 + d$$

$$d = \frac{(R_2 + m_2)}{\cos \alpha} - \frac{(R_1 + m_1)}{\cos \alpha} \approx \frac{R_2 - R_1}{\cos \alpha}$$

$$M_{\max} = R_1 - R_2 + \frac{R_2}{\cos \alpha} - \frac{R_1}{\cos \alpha} = R_1 \left(1 - \frac{1}{\cos \alpha}\right) + \dots$$

$$\dots - R_2 \left(1 - \frac{1}{\cos \alpha}\right) = \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1\right) (R_2 - R_1)$$

With these changes (table 2) the attainable top speed goes from 90 to 100 km/h and from 105 to 120 km/h respectively for rank C and rank P.

## 6. Layout adjustments: North Sardinia speeding up

The calculation method developed was applied to the speeding up of the relatively tortuous scheduled routes, in Sardinia, North of Oristano, in the context of Territorial Production Management of Cagliari (fig. 7).

On the basis of the above a goal of increase in the average speed limits to 100 km/h in rank C and 120 in rank P has been defined. The percentage increases were 14% in rank C and about 10% in rank P (second scenario of fig. 4). To achieve this the geometric parameters of the limiting curves were modified and track displacements were evaluated. The degree of braking linked to the slope of the line was taken into account; speed routes were rescheduled in compliance RFI provisions [7]. All geometrical parameters and kinematic conditions affecting the safety and comfort

100 km/h in rango C e a 120 km/h in rango P. In percentuale gli incrementi sono stati del 14% in rango C e di circa il 10% in rango P (secondo scenario di fig. 4). Per ottenere ciò sono stati modificati i parametri geometrici delle curve limitanti e sono stati valutati gli spostamenti del binario. E' stato considerato il grado di frenatura legato alla pendenza della linea; sono state rimodulate le tratte di velocità nel rispetto delle disposizioni RFI [7]. Sono stati verificati tutti i parametri geometrici e le condizioni cinematiche che incidono sulla sicurezza e sul confort della marcia dei veicoli ferroviari e, infine, sono stati valutati i costi di intervento. Nella fig. 8 sono messe a confronto le fiancate di progetto con quelle attuali.

Su circa 250 km di linea, in 11 curve è stata modificata la sopraelevazione, in 13 sono stati allungati i raccordi parabolici e in 37 si è dovu-

Linea : CAGLIARI - G.ARANCI

da Km 3+042,58  
a Km 3+198,90

N° Picch.	Frecce Corrette	dist. Picch	SOPRAELEV.	R R.P.	Tangenti ai punti	SCARTAM.
0	0,0	1,50	0	RETTO		1.435,0
1	0,8	1,50	0	RP m 40,0	0+9,47	
2	4,0	1,50	11			
3	7,8	1,50	21			
4	11,6	1,50	31			
5	14,7	1,50	40		4+9,47	
6	15,2	1,50		CR m 3289,0		
7	15,2	1,50				
8	15,2	1,50				
9	15,2	1,50				
10	15,2	1,50				
11	15,2	1,50		RP m 40,0		
12	15,0	1,50				
13	13,6	1,40	40 36		12+5,79	
14	9,8	1,50	26			
15	6,0	1,50	16			
16	2,2	1,50	6 0	RETTO	16+5,79	
17	0,3	1,50	0			
18	0,0	1,50	0			1.435,0

Fig. 6 - Esempio di prospetto riassuntivo di una curva.  
Fig. 6 - Example of summary prospect of a curve.

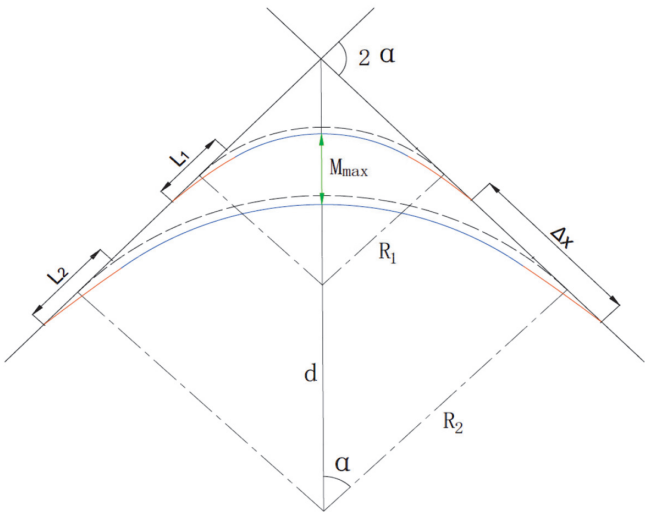


Fig. 5 - Costruzione grafica dello spostamento massimo con modifica dei raggi.  
Fig. 5 - Graphical construction of maximum displacement with modification of radii.

of the operation of railway vehicles were verified and lastly intervention costs were assessed. In fig. 8 the design speeds are compared with the current ones.

Out of approximately 250 km of the route, the cant was changed on 11 curves, the parabolic joints were lengthened in 13 curves and in 37 curves one had to resort to increasing the radius of curvature. The overall cost of the operation was estimated in approximately 30 million Euros. To-date works are underway along the Ploaghe-Scala di Giocca route (fig. 9).

- Project works are (fig. 10):
- excavation of trenches;
  - gabions and retaining walls
  - subgrade broadening;
  - renewal of manholes/small bridges;
  - other minor machining operations (on the track bed, the permanent way, on the safety and signalling systems, on block headway systems and on technological systems).

TABELLA 2 – TABLE 2

Variazione dei raggi delle curve 109 e 110 nella tratta Macomer–Campeda e della curva 194 nella tratta Madonna di Castro-Oschiri, Linea Cagliari-G. Aranci.  $M_{max}$  rappresenta gli spostamenti massimi in metri a centro curva  
Of the radii of curves 109 and 110 in the Macomer – Campeda route and of curve 194 in the Madonna di Castro-Oschiri route, Cagliari-G- Aranci Line.  $M_{max}$  represents the maximum displacements in metres at the curve centre

Curva Curve	Sviluppo (m) Development (m)	$\theta$ (rad)	R1(m)	L1(m)	R2 (m)	L2 (m)	$\Delta x(m)$	$M_{max}(m)$
n°194	561,57	1,53	298,60	80,00	395,00	80,00	90,10	42,88

mln di euro. Ad oggi i lavori sono in corso lungo la tratta Ploaghe–Scala di Giocca (fig. 9).

Le opere in progetto sono (vedi anche fig. 10):

- sbancamento Trincee;
- gabbionate e muri di sostegno;
- allargamento piattaforma;
- rinnovo Tombini/Ponticelli;
- altre lavorazioni minori (sulla sede, sull'armamento, sugli impianti di sicurezza e segnalamento, sui sistemi di distanziamento e sugli impianti tecnologici).

## 7. Interventi infrastrutturali – Riduzione tempi

Prendiamo in analisi i risultati ottenuti nelle fiancate di fig. 8 ed a questi aggiungiamo gli effetti dell'SCMT e dell'ACCM con blocco emulato sulla tratta Cagliari-Oristano: otteniamo allora quanto illustrato in fig. 1.

Il passaggio dall'attuale SSC ad un sistema che contempli quattro codici di velocità tipo SCMT con conseguente possibilità di utilizzare materiale pendolante comporta un impor-



Fig. 7 - Tracciato nord Sardegna.  
Fig. 7 - Northern Sardinia layout.

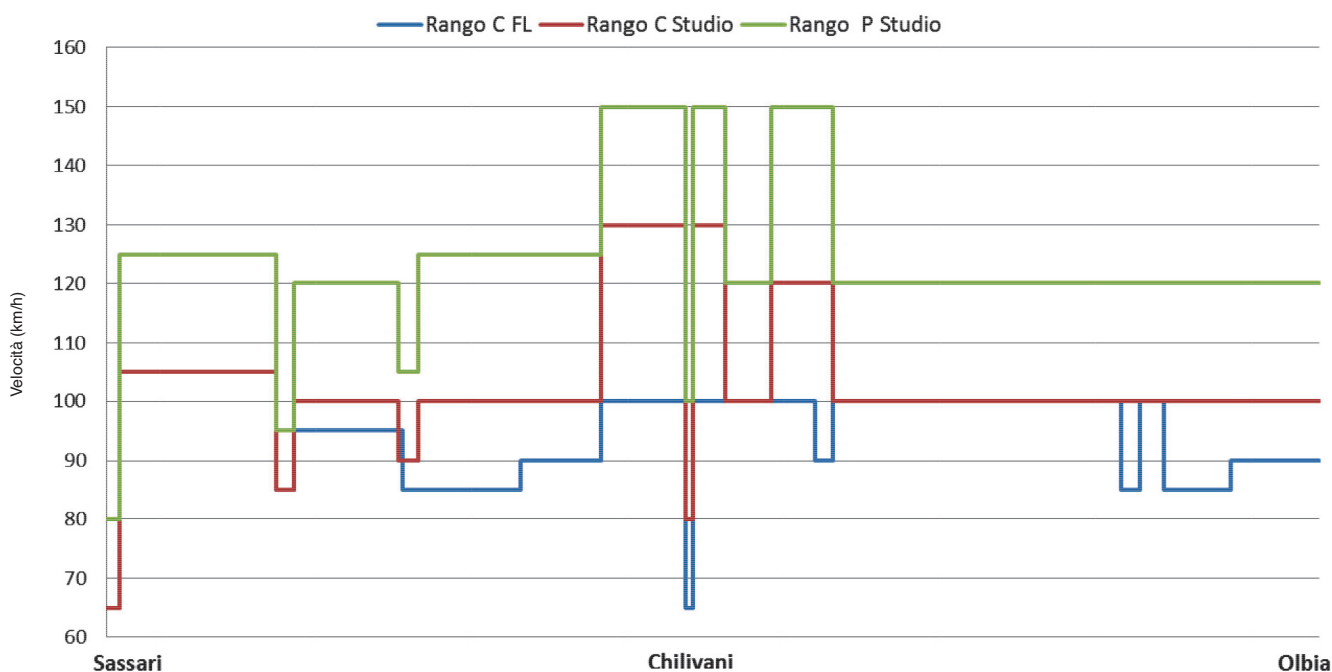


Fig. 8 - Grafico fiancata, relazione Sassari-Olbia.  
Fig. 8 - Speed graph, Sassari-Olbia connection.



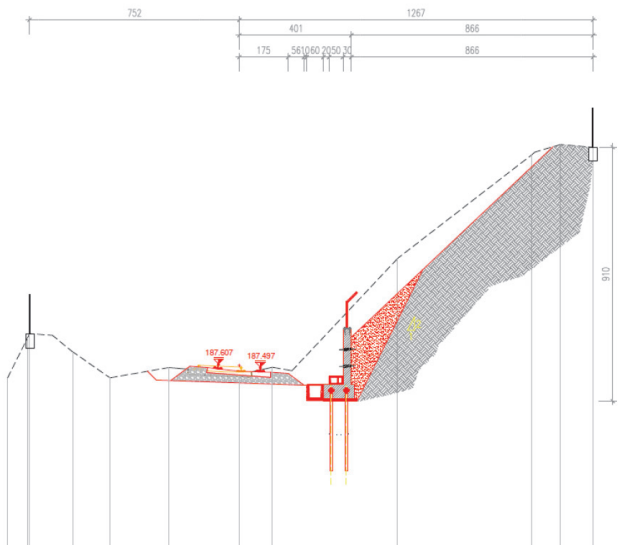


Fig. 9 - Lavori di sbancamento, posa micropali e realizzazione muro di sostegno, tratta Ploaghe-Scala di Giocca.  
Fig. 9 - Excavation works, installation of micropiles and retaining wall construction, on the Ploaghe-Scala di Giocca route.

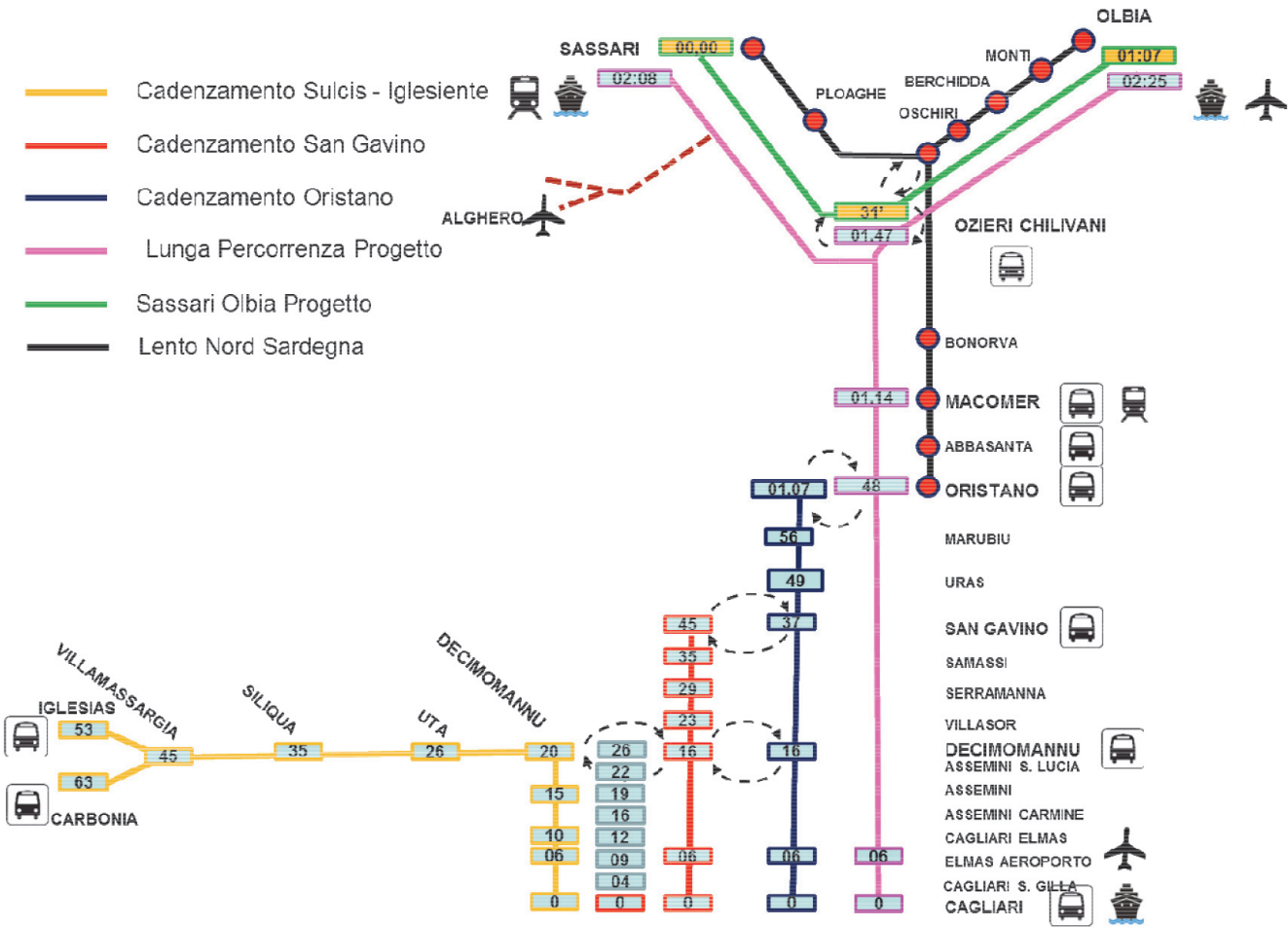


Fig. 10 - Modello di Servizio.  
Fig. 10 - Service Model.

tante risparmio dei tempi di percorrenza (da rosso a verde), mediamente di 10 minuti su 130 km.

L'intervento di rettifica dei tracciati rende ancora più significativo tale risparmio (da verde a viola meno i tre minuti dell'ACCM con BACF sulla Cagliari - Oristano). Va ricordato inoltre che, a differenza dell'SCMT, le rettifiche incidono su tutte le velocità di rango e quindi i miglioramenti sono riferibili a tutti tipi di materiali rotabili. Ad oggi sono in corso i lavori lungo la tratta Scala di Giocca-Ploaghe, per il passaggio da 85 km/h a 100 km/h in rango C e da 100 a 120 km/h in rango P, su una estesa di 10 km. La realizzazione dell'SCMT sull'intera rete, per consentire al materiale rotabile pendolante, la marcia in rango P, è prevista entro fine 2017. Stessi Tempi per ACCM e BACF sulla tratta Cagliari-Oristano. Il tutto già finanziato con la legge di stabilità del 2015.

Per il progetto nel suo complesso, in termini di riduzione dei tempi di percorrenza:

- 37 minuti, per la relazione Cagliari-Sassari (250 km);
- 39 minuti, per la relazione Cagliari-Olbia (275 km);
- 19 minuti, per la relazione Sassari-Olbia (117 km).

L'autorizzazione alla messa in servizio di tutti i sistemi e delle nuove velocità seguirà l'iter previsto dalle specifiche tecniche di interoperabilità per l'infrastruttura ferroviaria [10]. Tempi stimati per la conclusione dell'intero progetto: autunno 2018.

## 8. Conclusioni

Nel lavoro svolto si è partiti da obiettivi di riduzione dei tempi di percorrenza e sono stati individuati specifici interventi infrastrutturali, attribuendo una primaria importanza alla sostenibilità dell'investimento.

Per le rettifiche di tracciato si è inteso dare un metodo di calcolo semplificato per la valutazione degli spostamenti del binario. È stato valutato in modo iterativo il giusto mix dei parametri H, L ed R che riducesse gli spostamenti in curva fissati gli incrementi di velocità. La rapidità di calcolo è stata ottenuta attraverso la risoluzione in forma esplicita della disequazione del contraccollo e in base a considerazioni di carattere geometrico sui raccordi e sulle curve. Sono state analizzate le condizioni al contorno lungo la linea e verificata la compatibilità degli spostamenti con le stesse, al fine di contenere i costi. Costi in prima approssimazione stimati con progetti tipologici.

Sono stati illustrati i risultati ottenuti, in termini di velocità, sul nord Sardegna e sono stati simulati i tempi commerciali lungo le principali relazioni, conseguenti agli interventi infrastrutturali complessivi.

Infine, a seguito del lavoro effettuato e considerate le possibilità di integrazione modale del trasporto in Sardegna (vedi ancora fig. 10 e fig. 11), si propone, anche come spunto per successive analisi e approfondimenti, un mo-

## 7. Infrastructure interventions - Time reduction

*Let us analyse the results obtained in the speeds in fig. 8 and add to these the effects of the SCMT and ACCM with emulated block on the Cagliari - Oristano route. The result obtained is shown in fig. 1.*

*The transition from the DSS to a system based on four speed codes like the SCMT with consequent possibility of using tilting rolling stock involves significant savings in travel time (from red to green), an average of 10 minutes over 130 km.*

*The intervention of the adjustments of tracks makes the savings even more significant (from green to purple less three minutes of the ACCM with FCAB on the Cagliari - Oristano connection). It should also be recalled that, unlike the SCMT, the adjustments affect all of the rank speeds, and therefore the improvements are referable to all types of rolling stock. To date, work is underway along the Scala di Giocca-Ploaghe route, for the transit from 85 km/h to 100 km/hr in rank C, and from 100 to 120 km/h in rank P, on a stretch of 10 km. The implementation of the SCMT throughout the entire network, to allow the tilting rolling stock to travel in rank P, is expected by the end of 2017. Same times for the ACCM and FCAB on the Cagliari-Oristano connection. The whole works are already funded with the 2015 Stability Act. For the project as a whole, in terms of travel time reduction:*

- 37 minutes, for the Cagliari-Sassari connection (250 km);
- 39 minutes, for the Cagliari-Olbia connection (275 km);
- 19 minutes, for the Sassari-Olbia connection (117 km).

*The authorisation for the commissioning of all systems and new speeds will follow the course provided for by the railway infrastructure interoperability technical specifications [10]. Estimated time for the conclusion of the whole project: autumn 2018.*

## 8. Conclusions

*In the work carried out we started from reduced travel times targets and specific infrastructure works with primary relevance to the sustainability of the investment.*

*For layout adjustments the intention was to give a simplified calculation method for the assessment of track displacements. The right mix of parameters H, L and R was iteratively estimated that would reduce travelling cornering with fixed speed increases. The speed calculation was achieved through the solution in an explicit form of the inequality of the jerk and based on geometric considerations on the joints and curves. The operating conditions along the line were analysed and the compatibility of the displacements with the same were checked, in order to contain costs. Costs were estimated in the first approximation with typological projects.*

*The results obtained, in terms of speed, on northern Sardinia were illustrated and the commercial times along the main connections were simulated, resulting from the overall infrastructural works.*



Fig. 11 - Ponte in muratura sulla tratta Macomer-Campeda. ATR 365 su linea RFI e ADE 09 su linea ARST. Foto di Salvatore DI MARTINO (Ass. Sardegna Vapore).

Fig. 11 - Masonry bridge on the Macomer-Campeda route. ATR 365 on RFI line and ADE 09 on the ARST line. Photo by Salvatore DI MARTINO (Ass. Sardegna Vapore).

dello di servizio che parte dall'offerta attuale e si sviluppa sulla base degli investimenti messi in campo.

## APPENDICE

### 1. Studio della funzione contraccollo $\psi(V)$ (fig. 12)

Insieme di definizione:  $\forall V \in \mathbb{R}$ ;

$$\text{zeri: } \frac{V^3}{LR} - \frac{g\Delta H}{SL} V = 0 \rightarrow V_0 = 0 \text{ e } V_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{g\Delta HR}{S}};$$

massimi e minimi relativi:

$$\frac{d(\psi)}{dV} = \frac{3V^2}{LR} - \frac{g\Delta H}{SL} = 0 \rightarrow V = \pm \sqrt{\frac{g\Delta HR}{3S}}$$

$$\text{Convessità: } \frac{d^2(\psi)}{(dV)^2} = \frac{6V}{LR}; \frac{6V}{LR} > 0 \rightarrow V > 0; \frac{6V}{LR} < 0 \rightarrow V < 0$$

$$\text{Asintoti: } \lim_{V \rightarrow \pm\infty} \psi = \pm\infty \quad \lim_{V \rightarrow \pm\infty} \frac{\psi}{V} = \pm\infty$$

la funzione non ha asintoti;

La funzione è antisimmetrica rispetto all'origine  
 $f(-x) = f(x)$ ;

ha tre zeri nei punti:  $(0; 0), \left(-\sqrt{\frac{g\Delta HR}{S}}; 0\right)$  e  $\left(\sqrt{\frac{g\Delta HR}{S}}; 0\right)$ ;

un massimo relativo nel punto  $\left[-\sqrt{\frac{g\Delta HR}{3S}}; \left(\frac{2}{3\sqrt{3}} \sqrt{\frac{g^3 \Delta H^3 R}{S^3 L^2}}\right)\right]$ ;

un minimo relativo nel punto  $\left[\sqrt{\frac{g\Delta HR}{3S}}; \left(-\frac{2}{3\sqrt{3}} \sqrt{\frac{g^3 \Delta H^3 R}{S^3 L^2}}\right)\right]$ ;

un flesso nel punto  $(0; 0)$ .

Finally, as a result of the work carried out and considering the possibility of modal transport integration in Sardinia (see fig. 10 and fig. 11), a service model is proposed, even as a starting point for further analysis and insight that starts from the current offer and develops on the basis of the investments put in place.

## APPENDIX

### 1. Study of the jerk function $\psi(V)$ (fig. 12)

Definition set:  $\forall V \in \mathbb{R}$ ;

$$\text{zeros: } \frac{V^3}{LR} - \frac{g\Delta H}{SL} V = 0 \rightarrow V_0 = 0 \text{ e } V_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{g\Delta HR}{S}};$$

relative maximums and minimums:

$$\frac{d(\psi)}{dV} = \frac{3V^2}{LR} - \frac{g\Delta H}{SL} = 0 \rightarrow V = \pm \sqrt{\frac{g\Delta HR}{3S}}$$

$$\text{Convexity: } \frac{d^2(\psi)}{(dV)^2} = \frac{6V}{LR}; \frac{6V}{LR} > 0 \rightarrow V > 0; \frac{6V}{LR} < 0 \rightarrow V < 0$$

$$\text{Asymptotes: } \lim_{V \rightarrow \pm\infty} \psi = \pm\infty \quad \lim_{V \rightarrow \pm\infty} \frac{\psi}{V} = \pm\infty$$

the function has no asymptotes;

The function is antisymmetric with respect to the origin  
 $f(-x) = f(x)$ ;

it has three zeros  
 in the points:  $(0; 0), \left(-\sqrt{\frac{g\Delta HR}{S}}; 0\right)$  and  $\left(\sqrt{\frac{g\Delta HR}{S}}; 0\right)$ ;

a relative maximum  
 in the point  $\left[-\sqrt{\frac{g\Delta HR}{3S}}; \left(\frac{2}{3\sqrt{3}} \sqrt{\frac{g^3 \Delta H^3 R}{S^3 L^2}}\right)\right]$ ;

a relative minimum  
 in the point  $\left[\sqrt{\frac{g\Delta HR}{3S}}; \left(-\frac{2}{3\sqrt{3}} \sqrt{\frac{g^3 \Delta H^3 R}{S^3 L^2}}\right)\right]$ ;

an inflection in the point  $(0; 0)$ .

### 2. Condition on the jerk for the calculation of the maximum time speeds

Let us go back to our third condition that we shall rewrite as follows:

$$\begin{aligned} \psi &\leq (\psi)_{\lim} & \text{for} & \quad \psi \geq 0 & [I] \\ \psi &\geq -(\psi)_{\lim} & \text{for} & \quad \psi \leq 0 & [II] \end{aligned}$$

Let us analyse the system [I], by analogy we study the [II].

$$\begin{cases} \psi = \frac{V^3}{LR} - \frac{g\Delta H}{SL} V \leq (\dot{a}_{nc})_{\lim} \\ \frac{V^3}{LR} - \frac{g\Delta H}{SL} V \geq 0 \end{cases}$$

Let us solve the first inequality:



## 2. Condizione sul contraccolpo ai fini del calcolo delle velocità massime d'orario

Torniamo alla nostra terza condizione che riscriviamo così:

$$\begin{aligned} \psi &\leq (\psi)_{\lim} & \text{per} & \psi \geq 0 & [I] \\ \psi &\geq -(\psi)_{\lim} & \text{per} & \psi \leq 0 & [II] \end{aligned}$$

Analizziamo il sistema [I], per analogia si studia il [II].

$$\begin{cases} \psi = \frac{V^3}{LR} - \frac{g\Delta H}{SL} V \leq (\dot{a}_{nc})_{\lim} \\ \frac{V^3}{LR} - \frac{g\Delta H}{SL} V \geq 0 \end{cases}$$

Risolviamo la prima disequazione:

$$\bullet V^3 - \frac{g\Delta H}{S} RV - LR(\psi)_{\lim} \leq 0 \quad [III]$$

$$V^3 + pV + q \leq 0 \quad \text{con } p = \frac{-g\Delta HR}{S} \quad q = -LR(\psi)_{\lim}$$

Soluzione semplificata "Formula di Cardano"

$$V_1 = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\Delta}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\Delta}} \quad \text{con } \Delta = \frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27};$$

- Se  $\Delta > 0$  otteniamo una unica radice reale, rappresentata da quella appena descritta, più due radici complesse. La [III] è soddisfatta per:

$$V \leq V_1 = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\Delta}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\Delta}};$$

- Se  $\Delta < 0$  otteniamo tre radici reali espresse come segue:

$$V_i = 2\sqrt{-\frac{p}{3}} \cos\left(\frac{\theta + i2\pi}{3}\right); \quad \theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{-\Delta}}{-\frac{q}{2}}\right)$$

$$\text{per } -\frac{q}{2} > 0; \theta = \pi + \arctan\left(\frac{\sqrt{-\Delta}}{-\frac{q}{2}}\right) \quad \text{per } -\frac{q}{2} < 0.$$

Scriviamo la [6] in forma fattoriale:

$$(V - V_0) \cdot (V - V_1) \cdot (V - V_2) \leq 0 \quad \text{e troviamo le relative soluzioni.}$$

Risolviamo seconda disequazione:

$$\bullet \frac{V^3}{LR} - \frac{g\Delta H}{SL} V \geq 0 \quad V \cdot \left(\frac{V^2}{LR} - \frac{g\Delta H}{SL}\right) \geq 0 \quad [IV]$$

$$V = 0; \quad V = \pm \sqrt{\frac{gHR}{s}}$$

$$\text{La disequazione è soddisfatta per } -\sqrt{\frac{gHR}{s}} \leq V \leq 0 \cup V \geq \sqrt{\frac{gHR}{s}}$$

Intersechiamo le soluzioni della [III] e della [IV] e risolviamo il sistema [I].

Visualizziamo graficamente la soluzione complessiva (figg. 13 e 14), unione dei sistemi di disequazioni [I] e [II].

$|\psi| < (\psi)_{\lim}$  è soddisfatta per  $\forall V$  compreso nell'intervallo  $[-V_1; V_1]$ .

$$|\psi| < (\psi)_{\lim} \rightarrow \forall V \in [-V_{\max}; V_{\text{med}}] \cup [V_{\min}; -V_{\min}] \cup [-V_{\text{med}}; V_{\max}].$$

### Funzione Contraccolpo

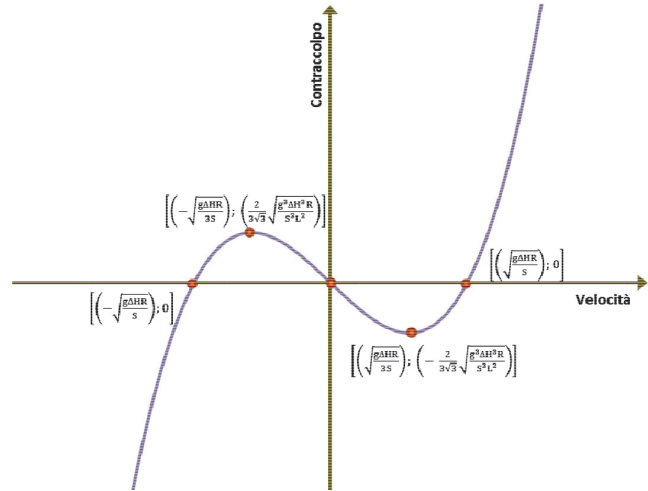


Fig. 12 - Grafico della funzione contraccolpo.  
Fig. 12 - Graph of the jerk function.

$$\bullet V^3 - \frac{g\Delta H}{S} RV - LR(\psi)_{\lim} \leq 0 \quad [III]$$

$$V^3 + pV + q \leq 0 \quad \text{with } p = \frac{-g\Delta HR}{S} \quad q = -LR(\psi)_{\lim}$$

"Cardano Formula" simplified solution

$$V_1 = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\Delta}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\Delta}} \quad \text{with } \Delta = \frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27};$$

- If  $\Delta > 0$  a single real root is obtained, represented by the one just described, plus two complex roots. [III] is satisfied by:

$$V \leq V_1 = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\Delta}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\Delta}};$$

- If  $\Delta < 0$  we obtain three real roots expressed as follows:

$$V_i = 2\sqrt{-\frac{p}{3}} \cos\left(\frac{\theta + i2\pi}{3}\right); \quad \theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{-\Delta}}{-\frac{q}{2}}\right)$$

$$\text{for } -\frac{q}{2} > 0; \theta = \pi + \arctan\left(\frac{\sqrt{-\Delta}}{-\frac{q}{2}}\right) \quad \text{for } -\frac{q}{2} < 0.$$

Let us write in a fact form:  $(V - V_0) \cdot (V - V_1) \cdot (V - V_2) \leq 0$  and find the related solutions.

Let us solve the second inequality:

$$\bullet \frac{V^3}{LR} - \frac{g\Delta H}{SL} V \geq 0 \quad V \cdot \left(\frac{V^2}{LR} - \frac{g\Delta H}{SL}\right) \geq 0 \quad [IV]$$

$$V = 0; \quad V = \pm \sqrt{\frac{gHR}{s}}$$

$$\text{The inequality is satisfied by } -\sqrt{\frac{gHR}{s}} \leq V \leq 0 \cup V \geq \sqrt{\frac{gHR}{s}}$$

Let us intersect the solutions of [III] and of [IV] and solve the system [I].

Let us graphically visualise the overall solution (figures 13 and 14), a union of systems of inequalities [I] and [II].



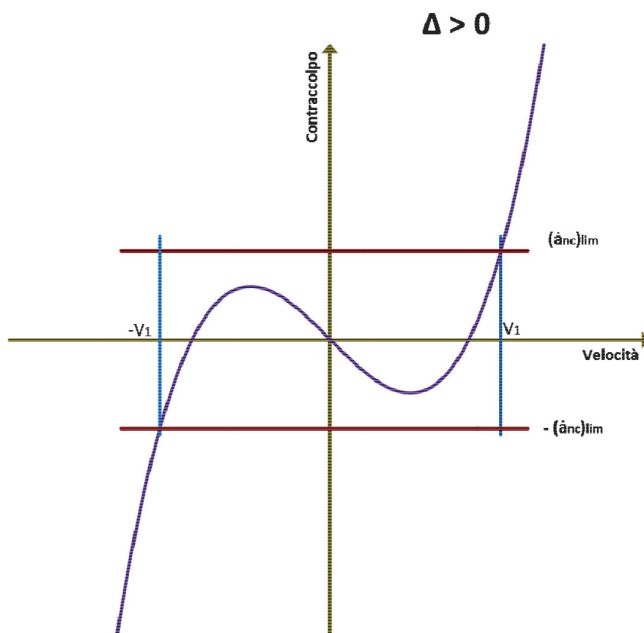


Fig. 13 -  $\Delta > 0$  una soluzione reale e due complesse.  
Fig. 13 -  $\Delta > 0$  one real solution and two complex ones.

Chiaramente, non potendo imporre dei limiti inferiori di velocità, la stessa dovrà essere  $\leq |V_{\min}|$ .

Il caso  $\Delta \leq 0$  va evitato in fase di progettazione e di rettifica dei tracciati. Il raccordo di sopraelevazione va dimensionato in modo che:

$$\Delta > 0 \rightarrow \frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27} > 0 \rightarrow (\psi)_{\lim}^2 \cdot \frac{27S^3}{4g^3} > \frac{\Delta H^3 R}{L^2}$$

$$\text{Posto } \alpha = (\psi)_{\lim}^2 \cdot \frac{27S^3}{4g^3}, \text{ deve essere } \Delta H < \sqrt[3]{\alpha \frac{L^2}{R}}.$$

Ad esempio con un raccordo parabolico di lunghezza  $L = 50$  m, raggio  $R = 700$  m e con  $(\psi)_{\lim(\text{Rango A})} = 0.25$ ,  $\Delta H$  deve essere inferiore a 153.3 mm.

### 3. Contraccollo su curve policentriche

Nella progettazione di tracciati ferroviari, non sempre è possibile ricorrere all'utilizzo di una curva semplice, ma la presenza di vincoli al contorno impone l'utilizzo di policentriche. Le stesse sono curve continue, costituite da due o più archi di circonferenza adiacenti, raccordati tra di loro con curve di transizione. Nel passaggio dall'arco con raggio  $R_1$  al successivo con raggio  $R_2$ , la parabola cubica  $y(x)$  deve soddisfare le seguenti condizioni:

$$\begin{aligned} x = x_1 = 0 & \quad y''(x) = y''_1 = \frac{1}{R_1} \\ x = x_2 = 0 & \quad y''(x) = y''_2 = \frac{1}{R_2} \end{aligned}$$

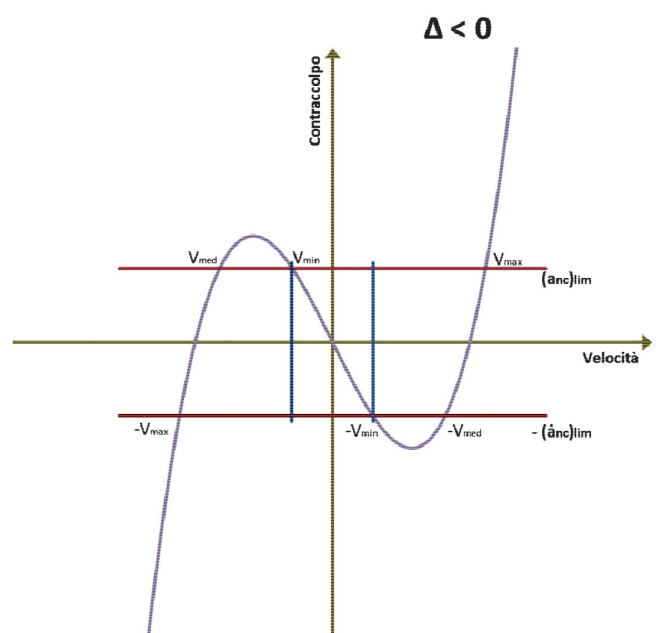


Fig. 14 -  $\Delta \leq 0$  tre soluzioni reali.  
Fig. 14 -  $\Delta \leq 0$  three real solutions.

$|\psi| < (\psi)_{\lim}$  is satisfied by  $\forall V$  included in the range  $[-V_1; V_1]$ .  
 $|\psi| < (\psi)_{\lim} \rightarrow \forall V \in [-V_{\max}; V_{\text{med}}] \cup [V_{\min}; -V_{\min}] \cup [-V_{\text{med}}; V_{\max}]$ .

It is clear that, since lower speed limits cannot be imposed, the same will have to be  $\leq |V_{\min}|$ .

The  $\Delta \leq 0$  case must be avoided during the design and adjustment phase of the layouts. The cant joint must be sized so that:

$$\Delta > 0 \rightarrow \frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27} > 0 \rightarrow (\psi)_{\lim}^2 \cdot \frac{27S^3}{4g^3} > \frac{\Delta H^3 R}{L^2}$$

$$\text{Given } \alpha = (\psi)_{\lim}^2 \cdot \frac{27S^3}{4g^3}, \text{ must be } \Delta H < \sqrt[3]{\alpha \frac{L^2}{R}}.$$

For example, a parabolic joint with a length of  $L = 50$  m, radius  $R = 700$  m and with  $(\psi)_{\lim(\text{Rank A})} = 0.25$ ,  $\Delta H$  must be less than 153.3 mm.

### 3. Jerk on polycentric curves

In the design of railway layouts, it is not always possible to resort to the use of a simple curve, but the presence of operating constraints requires the use of polycentric curves. The same are continuous curves, consisting of two or more adjacent circumference arcs, connected between them with transition curves. In the transition from the arc with radius  $R_1$  to the next with radius  $R_2$ , the cubic parabola  $y(x)$  must meet the following conditions:

La curvatura di una cubica è una funzione lineare.

Consideriamo la retta passante per i punti  $(x_1; y''_1)$ , otteniamo:

$$\frac{y'' - y''_1}{y''_2 - y''_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}; \frac{y'' - \frac{1}{R_1}}{\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}} = \frac{x - 0}{L - 0}; y''(x) = \frac{x}{L} \left( \frac{R_1 - R_2}{R_1 R_2} \right) + \frac{1}{R_1}.$$

Riscriviamo la terza condizione ed otteniamo:

$$V^3 \frac{g\Delta H}{S} \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 - R_2} \right) V - L \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 - R_2} \right) (\psi)_{\lim} \leq 0$$

Per gli zeri della [V] si ragiona in modo analogo a quanto già esposto per la [III].

I casi  $R_1 > R_2$  con  $\Delta H < 0$  e  $R_1 < R_2$  con  $\Delta H > 0$ , non sono coerenti con la progettazione di un tracciato ferroviario. Il raccordo di sopraelevazione va realizzato per compensare una quota di accelerazione.

$$\begin{aligned} x = x_1 = 0 & & y''(x) = y''_1 = \frac{1}{R_1} \\ x = x_2 = 0 & & y''(x) = y''_2 = \frac{1}{R_2} \end{aligned}$$

*The curvature of a cubic is a linear function.*

*Let us consider a straight line passing through points,  $(x_1; y''_1)$ , we get:*

$$\frac{y'' - y''_1}{y''_2 - y''_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}; \frac{y'' - \frac{1}{R_1}}{\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}} = \frac{x - 0}{L - 0}; y''(x) = \frac{x}{L} \left( \frac{R_1 - R_2}{R_1 R_2} \right) + \frac{1}{R_1}.$$

*Let us rewrite the third condition and we obtain:*

$$V^3 \frac{g\Delta H}{S} \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 - R_2} \right) V - L \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 - R_2} \right) (\psi)_{\lim} \leq 0$$

*For the zeros of [V] the reasoning is similar to that already explained for [III].*

*Cases  $R_1 > R_2$  with  $\Delta H < 0$  and  $R_1 < R_2$  with  $\Delta H > 0$ , are not consistent with the design of a railway layout. The cant joint should be made to compensate a share of the acceleration.*

## BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] Pier Paolo OLLA, Pierandrea COSSU, Alberto DEMAIO, "Prove di circolazione del treno Talgo XXI sulla rete RFI della Sardegna", Ingegneria Ferroviaria, dicembre 2008.
- [2] Giancarlo BONO, Carlo FOCACCI, Spartaco LANNI, 1997, "La Sovrastruttura Ferroviaria", CIFI.
- [3] Gianfranco ANGELERI, 1987, "Le curve delle linee ferroviarie – Geometria e Cinematica", CIFI.
- [4] Bernhard LICHTBERGER, 2010, "Manuale del Binario", Eurail Press.
- [5] Istruzione Tecnica RFI, 2006, "Norma tecniche per la determinazione delle velocità massime d'orario delle linee esistenti".
- [6] Istruzione Tecnica RFI, 2006, "Norme tecniche per la progettazione dei tracciati ferroviari".
- [7] RFI Disposizione n° 14, 2004, "Specifiche dei requisiti funzionali per la determinazione del profilo statico della velocità massima ammessa dalle linee – per l'individuazione dei punti di variazione della velocità massima ammessa dalle linee e dal grado di frenatura – per la redazione delle fiancate di linea e principali dei binari di sinistra o legale e di destra nonché delle fiancate di linea principali relative ai binari illegali".
- [8] Fiche UIC 518 3<sup>rd</sup> edition, August 2005. "Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behavior – Safety – Track fatigue – Ride quality".
- [9] ENV 13803-1 final draft: 2005 Railway application – "Track alignment design parameters" – Track gauges 1435 mm and wider – Part 1: Plain Line.
- [10] Specifiche tecniche d'interoperabilità per il sistema infrastruttura del sistema ferroviario transeuropeo ad alta velocità di cui all'art. 6, paragrafo 1, della direttiva 96/48/CE del 30/05/2002.