



Treni con assetto cassa passivo o attivo: simulazione e confronto sulla rete sarda di RFI

Active or passive tilting trains: simulation and comparison on the Sardinian rail network

Prof. Ing. Bruno DALLA CHIARA^(*), Dott. Ing. Alessandro IANNINO^(**)

1. Premessa

Nell'articolo vengono messe a confronto le prestazioni dei treni Minuetto – di tipo convenzionale – e di due treni spagnoli, dotati di sistema di pendolamento, che rappresentano delle alternative ai mezzi attualmente circolanti in Sardegna: il Talgo XXI, di tipo passivo, ed il CAF R 598, di tipo attivo; le *performance* sono state valutate in termini di tempi di percorrenza puri, tempi di percorrenza in assetto commerciale, potenzialità teorica e potenzialità nominale, con l'ausilio del software di micro-simulazione ferroviaria denominato OpenTrack. Scopo della simulazione è confrontare le prestazioni che i diversi treni sono in grado d'offrire sulla linea in esame e valutare i vantaggi che l'introduzione di nuovo materiale rotabile di tipo *tilting* può apportare al sistema di trasporto regionale sardo su ferro.

2. Introduzione

Nell'ottica della linea guida nel P.R.T. della Regione Sardegna [1], la velocizzazione del trasporto locale (T.P.L.) e l'allineamento dei tempi di percorrenza con quelli del Continente risultano mete raggiungibili sia attraverso interventi sull'infrastruttura sia attraverso il rinnovo del materiale rotabile.

L'utilizzo di treni *tilting* su una rete tortuosa come quella sarda consente infatti d'incrementare in modo non marginale la velocità di marcia in curva, garantendo il rispetto dei limiti d'accelerazione laterale sul passeggero, quindi di comfort, imposti dall'UIC.

L'articolo pone le basi su le 'Prove di circolazione del treno Talgo XXI sulla rete RFI della Sardegna' [2], articolo all'interno del quale sono stati presentati i risultati della corsa prova effettuata con il convoglio diagnostico di tipo Talgo XXI di proprietà ADIF; s'introduce in questo caso anche il treno R 598, allargando le valutazioni alla poten-

1. Preface

The article compares the performance of the Minuetto trains – of conventional type – to the one achieved by two Spanish trains provided with tilting systems, as alternatives to the rolling stock which is currently circulating in Sardinia, namely: Talgo XXI, of passive type, and CAF R 598, of the active one. The performances have been assessed in terms of mere coverage time in operation, nominal and theoretical carrying capacity of the line, with the support of the microsimulation railway software named OpenTrack. The simulation is aimed at comparing the potential performance provided by the different trains on the analysed line and at assessing the advantages the introduction of new rolling stock of the tilting type can ensure to the regional transport system of Sardinia⁽¹⁾.

2. Introduction

In the perspective of the guidelines of the Regional Transport Plan developed by the Regional Council of Sardinia [1], the speeding up of local public transport (L.P.T.) and the alignment of the coverage times to those of the rest of Italy are results which can be attained by both acting on the infrastructure and renewing the rolling stock.

The use of tilting trains on a tortuous network such as the one of Sardinia will allow for a non-marginal increment of the running speed in curves, while ensuring compliance with the limits of lateral acceleration affecting the passengers, and – therefore – of comfort, as specified by UIC.

This article is based upon the 'Prove di circolazione del treno Talgo XXI sulla rete RFI della Sardegna' (Circulation tests of train Talgo XXI on the RFI network in Sardinia) [2], an article which describes the results of the trial run performed with the diagnostic train type Talgo XXI, owned by ADIF; the train R 598 has also been introduced,

^(*) Politecnico di Torino, Dip. DIATI – Trasporti.

^(**) Trenitalia.

^(*) Politecnico di Torino, Dept. DIATI– Transport Engineering.

^(**) Trenitalia.

⁽¹⁾ Italian Region.

zialità e prevedendo nuovi scenari infrastrutturali; sono stati inoltre sviluppati e vengono proposti legami teorici tra la tortuosità e la velocità media di linea. L'articolo citato è stato di basilare importanza nella *calibrazione* iniziale del software utilizzato per la simulazione ferroviaria, *OpenTrack*.

Il punto di partenza è rappresentato dagli studi teorici già effettuati sull'incremento di velocità in curva garantiti da un treno ad assetto cassa variabile rispetto ad un convoglio tradizionale [3], che si aggirano in via del tutto generale su valori del 25-30%, per capire fino a che punto queste stime siano realistiche per le due tipologie di assetto cassa, nel caso in questione, ed in quale riduzione effettiva di tempo avvertibile dall'utenza esse si traducano.

3. La linea ferroviaria analizzata

Lo studio è stato svolto simulando la circolazione dei treni Minuetto Diesel, Talgo XXI e R 598 sulle linee Cagliari – Sassari – Porto Torres e Cagliari – Olbia – Golfo Aranci Stazione, coincidenti fino alla stazione di Ozieri Chilivani, per un totale di circa 360 km, caricati sul software OpenTrack attraverso 603 nodi e 604 archi, caratterizzando:

- i nodi con la presenza di tutti i segnali di linea e passaggi a livello esistenti;
- gli archi con le caratteristiche plano-altimetriche della linea, oltre che con la presenza e la tipologia delle gallerie.

Le importanti pendenze nelle tratte a nord di Oristano - in particolare oltre Solarussa, dove resantano il 25‰ - mettono in luce le diverse caratteristiche di potenza dei convogli confrontati, mentre la planimetria caratterizzata da stretti raggi di curvatura fa risaltare maggiormente gli incrementi di velocità dovuti alla circolazione a ranghi superiori al C. La situazione planimetrica è la seguente:

- curve *molto strette* ($R \leq 250$ m): 1;
- curve *strette* ($250 < R \leq 400$ m): 112;
- curve *medie* ($400 < R \leq 600$ m): 218;
- curve *medio - larghe* ($600 < R \leq 1000$ m): 117;
- curve *larghe* ($R > 1000$ m): 97.

Su un totale di 545 curve, quelle con $R < 1000$ m sono 448, cioè l'82,2 % del totale.

La linea si sviluppa su semplice binario, fatta eccezione per la presenza del doppio binario sulla tratta 'metropolitana' Cagliari-San Gavino (50 km); sul solo tratto Cagliari-Decimomannu (16 km) è presente il blocco elettrico automatico atto alla ripetizione segnali in cabina di guida, sulla restante parte è presente il blocco conta-assi; la linea è interamente attrezzata con il sistema SSC, e la gestione della circolazione è affidata al D.C.O. con sede a Cagliari. Il profilo schematico della linea, completo dei gradi di frenatura e delle velocità massime di linea, è presentato in fig. 1.

extending the assessments to the carrying capacity of the line and assuming new infrastructural scenarios. Furthermore, theoretical links between the tortuosity and the average speed along the line have been developed and proposed. The aforementioned article has been essential in the initial calibration of the software utilized for the railway simulation, namely OpenTrack.

The starting point is represented by the theoretical studies which have already been developed on the increased speed in curves ensured by a tilting train versus the conventional ones [3] – whose overall values can be estimated around 25 to 30% – in order to understand to which extent such estimates are realistic for the two types of tilting trains in the case under exam and to what actual time reduction perceivable by the users they translate into.

3. The analysed railway line

The study has been developed by simulating the circulation of the trains Minuetto Diesel, Talgo XXI and R 598 on

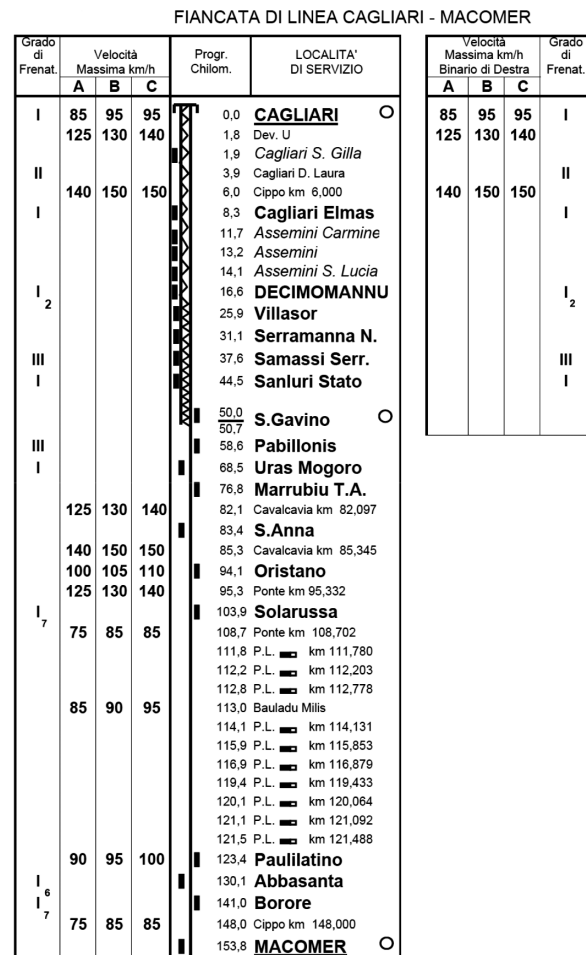


Fig. 1 - (segue)

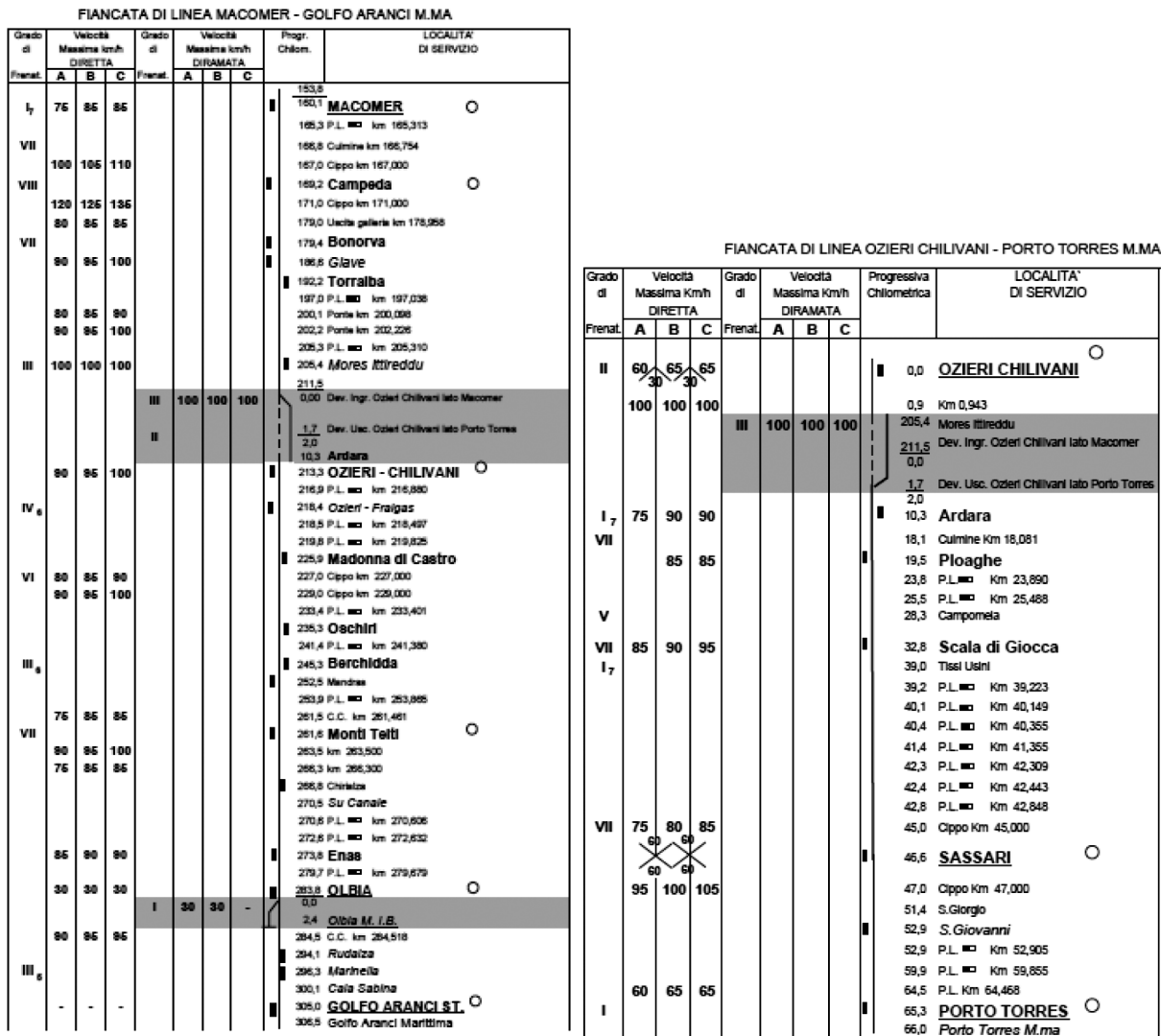


Fig. 1 - Profili schematici della linea ferroviaria Cagliari - Ozieri Chilivani - Golfo Aranci / Porto Torres.
Fig. 1 - Schematic profiles of the Cagliari - Ozieri Chilivani - Golfo Aranci / Porto Torres railway line.

4. I treni a confronto

Il treno con le migliori prestazioni attualmente in circolazione sulla linea sarda è il Minuetto Diesel, convoglio di tipo tradizionale, quindi senza assetto cassa variabile; le sue caratteristiche tecniche sono messe a confronto con i treni 'basculanti' spagnoli in tabella 1. Il convoglio test provato nel 2008 ha fornito utili elementi per la calibrazione del software, ma nella simulazione al calcolatore è stata prevista la circolazione del convoglio Talgo tipo commerciale con 8 vetture e doppia motrice, come proposto nei documenti indicativi della Regione; anche per il CAF, si è fatto riferimento alla particolare

the lines: Cagliari – Sassari – Porto Torres and Cagliari – Olbia – Golfo Aranci Stazione, which are the same one up to the station of Ozieri Chilivani, for an overall coverage of approx. 360 km, loaded onto the OpenTrack software through 603 nodes and 604 arcs, characterizing:

- the nodes by the presence of all the existing line signals and level crossings;
- the arcs by the horizontal and vertical layout features of the line, besides the presence and type of tunnels.

The significant slopes in the sections located North to Oristano – in particular beyond Solarussa, where they are

versione 'para Cerdeña' della serie 598 in servizio nella penisola iberica⁽¹⁾ [4].

La posizione del baricentro è relativamente bassa nel Talgo, inferiore al centro di rotazione, così in curva l'azione della forza centrifuga genera un momento che induce la naturale rotazione della cassa in curva fino ad un massimo di 3,5° (*tilting* passivo o gravitazionale); nel CAF, invece, il baricentro è in posizione più elevata rispetto al centro di rotazione; esso è stato equipaggiato con un attuatore di tipo elettro-meccanico ed una 'traversa basculante', installati vantaggiosamente tra la sospensione secondaria e la primaria, per poter inclinare la cassa fino a 8° (*tilting* attivo) [5].

Le altre caratteristiche peculiari che distinguono il Talgo XXI sono il ridotto rapporto peso/posto, ottenuto dall'utilizzo di materiali leggeri, e le ruote indipendenti che, tramite una biella ed una barra di guida all'estremità della cassa, permettono che in curva l'assile giaccia sempre sulla bisettrice dell'angolo formato dai due veicoli adiacenti, e le ruote (che non sono rigidamente calettate all'assile) siano sempre parallele alla via; il CAF invece vanta l'installazione del SIBI (*Sistema Inteligente de Basculación Integral*), un innovativo dispositivo di cui sono equipaggiate le serie R-594.1 e 598, e si basa sulla conoscenza della posizione del treno lungo la linea che sta percorrendo, ottenuta tramite la memorizzazione del tracciato prima della partenza e tramite il sistema SDP che calcola la posizione esatta del treno lungo il tracciato (odometri, boe tipo *balise*, GPS), e su di una legge di inclinazione della cassa ottimizzata.

5. Gli ipotetici ranghi di velocità

Di basilare importanza per la simulazione è la *definizione dei ranghi di velocità* ai quali ciascun treno considerato appartiene, funzione di vari parametri tra i quali l'accelerazione massima laterale consentita; il Minuetto è ammesso a viaggiare sulla rete sarda in rango C dal 2009, con una $a_{NC} = 1 \text{ m/s}^2$; per i due treni spagnoli, sono stati introdotti i ranghi di velocità C+ per il Talgo e P per il CAF; il nuovo rango C+, finora inesistente in quanto trattasi della prima applicazione italiana, consegue alla necessità di definire delle condizioni di rango per i treni ad assetto variabile di tipo passivo. Le nuove velocità sono state calcolate partendo dalla conoscenza planimetrica della linea; le variazioni di velocità lungo il percorso sono state posizionate nei medesimi punti nei quali attualmente variano le velocità per i ranghi A, B e C, mantenendo quindi invariati i tratti a velocità costante nei quali la linea è stata suddivisa. Considerando un coefficiente di *sou-*

close to 25% – highlight the different power features of the trains which are the subject of the comparison, whilst the layout characterized by narrow radii of curves highlights the speed increments due to the circulation at operation ranks greater than C⁽²⁾. The layout conditions are as follows:

- very narrow curves ($R \leq 250 \text{ m}$): 1 (one curve);
- narrow curves ($250 < R \leq 400 \text{ m}$): 112;
- medium curves ($400 < R \leq 600 \text{ m}$): 218;
- medium to large curves ($600 < R \leq 1,000 \text{ m}$): 117;
- large curves ($R > 1,000 \text{ m}$): 97.

On a total amount of 545 curves, the $R < 1000 \text{ m}$ is 448, i.e. 82.2 % of the total.

The line develops on a single track, with the exception of the presence of a double track on the Cagliari-San Gavino 'metropolitan' section (50 km); the sole Cagliari-Decimomannu section (16 km) is provided with the automatic electric block for the repetition of the signals to the driver's cab, whilst the rest of the line is provided with axle counter; the line is fully equipped with the SSC⁽³⁾ system, and the management of the circulation is committed to the D.C.O.⁽⁴⁾, whose headquarters are in Cagliari. The schematic profile of the line, complete with the braking grades and of the max. speeds along the line, is shown in fig. 1.

4. The trains in comparison

The best performing train which is currently circulating on the Sardinian line is the Minuetto Diesel; a train of the conventional type, i.e. not tilting; its technical features are compared to the Spanish tilting trains in table 1. The trial train tested in 2008 provided useful elements for the software calibration, but the computer simulation has concerned the circulation of the commercial type Talgo train, with 8 wagons and double motor coach, as proposed in the indicative documents of the Regional Council; also for the CAF, reference was made to the special 'para Cerdeña' version of series 598 in service in the Iberian Peninsula⁽⁵⁾ [4].

The position of the gravity centre is relatively low in the Talgo, lower than its rotational centre; therefore - in curves

⁽²⁾ Italian railway lines are ranked into four route groups - A, B and C plus P, which is equivalent to C but adapted for tilting trains - which might also be identified as circulation ranks or operation ranks, on the basis of four factors: maximum permissible speed, train speed on curves, jerk on transition curves, non-compensated lateral acceleration.

⁽³⁾ "Sistema Supporto Condotta", i.e. the Driving Support System.

⁽⁴⁾ "Dirigenza Centrale Operativa", i.e. the centralised traffic controlling system.

⁽⁵⁾ The mechanical features of the rolling stock have been intentionally omitted from the article in compliance with the agreements taken with the companies which have provided the data to the authors.

⁽¹⁾ Le caratteristiche meccaniche del materiale rotabile sono state volutamente omesse dall'articolo per rispettare quanto stabilito con le aziende che hanno fornito tali dati agli autori.

CONFRONTO TRA LE PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEI ROTABILI IN ESAME
COMPARISON BETWEEN THE MAIN FEATURES OF THE ROLLING STOCK IN EXAM

	Minuetto	Talgo XXI	CAF R 958
Tipo veicolo <i>Type of vehicle</i>	UT Diesel-Idraulica <i>UT Diesel-Hydraulic</i>	DMU Diesel-Idraulica <i>DMU Diesel-Hydraulic</i>	UT Diesel-Idraulica <i>UT Diesel-Hydraulic</i>
V massima - <i>Vmax</i>	130 km/h	220 km/h	160 km/h
Acc. laterale massima (in curva): <i>Max. side acceleration (in turns):</i> BT Veicoli - <i>Vehicles</i>	1,0 m/s ²	1,2 m/s ² 1,5 m/s ²	1,8 m/s ²
Accelerazione massima in condizioni ordinarie <i>Max. acceleration in ordinary conditions</i>	1,0 m/s ²	1,0 m/s ²	0,60 m/s ²
Decelerazione in condizioni ordinarie <i>Deceleration in ordinary conditions</i>	0,50 m/s ²	0,50 m/s ²	0,96 m/s ²
Massima inclinazione della cassa in curva <i>Max. tilting in turns</i>	0°	3,5°	8°
Percentuale di massa frenata <i>Percentage of braking mass</i>	145%	170%	145%
Numero di assi <i>Number of axes</i>	8	13	12
Posti <i>Seats</i>	24 (I classe) + 122 (II classe) + 23 strapuntini 24 (1st class) + 122 (2nd class) + 23 gangway seats	235	204
Dimensioni e pesi - <i>Dimensions and weights</i>			
Lunghezza della composizione <i>Length of the composition</i>	51.90 [m]	135.06 [m]	75.93 [m]
Peso (pieno carico) - <i>Weight (full load)</i>	116 [t]	230.02 [t]	190,5 [t]
Peso per asse - <i>Weight per axis</i>	14.88 [t]	18 [t]	15,9 [t]
Altezza massima cassa <i>Max. height of the body</i>	3820 [mm]	3600 [mm]	4170 [mm]
Larghezza massima cassa <i>Max. width of the body</i>	2950 [mm]	2942 [mm]	2940 [mm]
Passo del carrello motore <i>Pitch of the motored bogie</i>	2,4 [m]	2,8 [m]	2,7 [m]
Passo del carrello portante <i>Pitch of the carrying bogie</i>	2,7 [m]	- [assi singoli] - <i>[single axes]</i>	2,7 [m]
Sistema di trazione - <i>Traction system</i>			
Numero motori di trazione <i>Number of traction motors</i>	2 2	2 (1 per ogni locomotiva BT) 2 <i>(1 for each BT locomotive)</i>	6 (3 per ogni vettura motrice) 6 <i>(3 for each BT locomotive)</i>
Modello - <i>Model</i>	IVECO V8 – 8 cilindri a V	Voith 12V 4000 R20	MAN D 2876 LUE 623
Potenza alle ruote <i>Power to the wheels</i>	835 kW	1100 kW (per locomotiva BT) <i>(for the BT locomotive)</i>	2292 kW
Potenza specifica - <i>Specific power</i>	7,2 kW/t	9,56 kW/t	12,03 kW/t
Coefficiente resistenza all'avanzamento <i>Resistance to the forward motion coefficient</i>	$Ra [N] = 6.4 \cdot M + 130 \cdot n + 0.14 \cdot M \cdot v + [0.046 + 0.0065(N-1)] \cdot A_f \cdot v^2$	$Ra [kN] = A + B \cdot V + C \cdot V^2$	$R [daN] = M (A + B \cdot v) + C \cdot v^2 + 0,00981 \cdot M \cdot s$
M	116 [t]	-	190,5 [t]
N	3	-	-
A _{frontale}	12 [m ²]	-	-
A	-	1.67	1,0478
B	-	0.01665	0,0029
C	-	0.000347	0,03

plesse di $-0,30$ per le vetture Talgo e di $+0,14$ per la locomotiva Talgo, l'accelerazione laterale massima alla quale fare riferimento per la determinazione della velocità massima sui vari tratti vale $1,2 \text{ m/s}^2$ (rango C+), mentre per il CAF, grazie alla maggiore rotazione della cassa, si può arrivare ad accelerazioni non compensate di $1,8 \text{ m/s}^2$ (rango P), garantendo comunque limiti accettabili di comfort a bordo treno.

Le velocità assegnate ai ranghi C, C+ e P sono state inserite nel programma quali dati di input, assegnandole a ciascun arco con cui la linea è costituita. Studi teorici [3] legano la velocità massima in curva al raggio di curvatura attraverso il coefficiente K:

$$V = K \cdot \sqrt{R}$$

assegnando valori generali a K di 4,89 o 5,93 o 6,40 rispettivamente per treni tradizionali (rango B), ad assetto cassa passivo ed attivo; i valori di K sono stati ricalcolati per i treni in esame e, considerando la *souplesse*, valgono rispettivamente 4,89 – 5,70 e 6,07, con *riduzioni teoriche* dei tempi di percorrenza del 21 e 30% rispetto al treno convenzionale. Le simulazioni che seguono evidenziano come i valori sul campo, seppur per una linea alquanto tortuosa, siano inferiori a quelli ipotizzati, raggiungendo nei tronchi più tortuosi nei quali è stata suddivisa la linea valori massimi di *riduzione effettiva* del 13 e 21%.

6. La simulazione dei tempi di percorrenza

La simulazione della circolazione dei treni sulla rete è stata sviluppata come indicato al fine di determinare i tempi di percorrenza e la potenzialità.

Riguardo ai tempi di percorrenza teorici (minimi) sono stati creati tre scenari: lo scenario 1, che considera infrastruttura ed impianti attuali; lo scenario 2, a medio termine, che prevede modifiche al sistema di segnalamento tra le stazioni di Cagliari e Decimomannu; lo scenario 3, a lungo termine, che prevede modifiche al sistema di segnalamento anche nella tratta Decimomannu - San Gavino (fig. 2). Le modifiche al segnalamento consentirebbero di superare il limite attuale di 150 km/h, imposto dai regolamenti ferroviari in assenza di ripetizione continua dei segnali in cabina di guida (RSC), raggiungendo 165 km/h per il rango C+ e 180 km/h per il rango P. È interessante notare come il CAF risulti in questi casi penalizzato dalla propria velocità limite di 160 km/h, mentre il Talgo, che raggiungerebbe senza vincoli i 200 km/h, debba venir limitato a 165 km/h.

La prima simulazione è volta a stimare i tempi di percorrenza pura, senza incroci con altri treni provenienti dalla direzione opposta e senza fermate intermedie (soltanto 120' di sosta a Sassari o Olbia), ed i risultati sono presentati nelle tabelle 2 e 3.

Da una simulazione dei tempi di percorrenza puri, co-

– the action of the centrifugal force generates a momentum which induces the natural rotation of the body in the curve up to a maximum of 3.5° (passive or gravitational tilting); in the CAF, on the other hand, the gravity centre is at an higher position with respect to the rotational centre; the latter has been equipped with an actuator of the electro-mechanical type and a oscillating body centre plate, which are advantageously installed between the secondary suspension and the primary one, in order to tilt the body up to 8° (active tilting) [5].

The other special features which characterize Talgo XXI are the reduced weight/seat ratio, which is obtained through the use of light materials, and the independent wheels which – through a connecting rod and a guiding bar at the extremity of the body – allow, along the curves, the axle of the wheel-set laying always on the bisector of the angle formed by the two adjacent vehicles, and the wheels (which are rigidly keyed to the axle) are always parallel to the track. On the other hand, the CAF boasts the installation of the SIBI (Sistema Inteligente de Basculación Integral), an innovative device the R-594.1 and 598 series are equipped with, based on the knowledge of the position of the train along the line which is being covered, obtained through the memorization of the track before the starting and through the SDP system, which calculates the exact position of the train along the track (odometers, balises or transponders, GPS), and on an optimized law of inclination of the body.

5. The assumed speed operation or circulation ranks

The definition of the speed operation ranks available for every train taken into account – as a function of some parameters such as the maximum lateral acceleration allowed – is essential in the simulation; Minuetto has been allowed traveling on the Sardinian network at rank C since 2009, with $a_{NC} = 1 \text{ m/s}^2$ (non-compensated lateral acceleration); two speed operation ranks have been adopted for the two Spanish trains: namely C+ for Talgo and P for CAF; the new speed operation rank C+, not existing until now since we are dealing with the first application in Italy, derives from the need to define the operation rank conditions for passive tiling trains. The new speeds have been calculated starting from the layout data of the line; the speed variations along the pathway have been located at the same points where the speed for speed operation ranks A, B and C currently vary, so without changing the constant speed sections the line has been divided into. If we consider a *souplesse* coefficient of -0.30 for the Talgo trains and of $+0.14$ for the Talgo locomotive, the maximum lateral acceleration to refer to in order to determine the max. speed on the different sections is 1.2 m/s^2 (C+), whilst, in case of the CAF – thanks to the greater rotation of the body – non compensated lateral accelerations of 1.8 m/s^2 (P) can be reached, yet ensuring acceptable limits of comfort on-board the train.



Fig. 2 - Gli interventi infrastrutturali tra le stazioni di Cagliari - Decimomannu e San Gavino.
 Fig. 2 - The infrastructural actions between the stations of Cagliari - Decimomannu and San Gavino.

TABELLA 2 - TABLE 2

TEMPI DI PERCORRENZA DA SIMULATORE
 COVERAGE TIMES FROM SIMULATOR

Linea Cagliari – Olbia – Golfo Aranci Stazione							
Cagliari	→	Olbia				→	Golfo Aranci Stazione
		t [h:mm:ss]	Δt [mm:ss]	Δt [%]		t [h:mm:ss]	Δt [mm:ss] Δt [%]
			treno riferimento reference train				treno riferimento reference train
Minuetto		2:49:42				3:09:21	
Talgo 1 BT		2:31:13	-18:29	-10,89		2:49:29	-19:52 -10,49
Talgo 2 BT		2:31:41	-18:01	-10,61		2:50:09	-19:12 -10,14
CAF R 598		2:20:32	-28:50	-16,99		2:37:16	-32:05 -16,94

me si può notare, su entrambe le linee il risparmio di tempo assoluto rispetto al Minuetto (rango C) è dell'ordine del **9,1 ÷ 10,6%** per il Talgo 2 BT, e del **15,1 ÷ 17%** per il treno della CAF.

Analizzando il Δt percentuale su vari tronchi della Cagliari – Sassari, si può affermare come il guadagno di tempo relativo tra il Talgo e il CAF sia contenuto tra Cagliari e San Gavino (+0,2% a favore del CAF) e tra San Gavino e Oristano (+1% a favore del CAF), dove la linea non presenta eccessiva tortuosità e la velocità massima

The speeds allocated to the C, C+ and P operation ranks have been introduced as input data, and each of them has been allocated an arc the line consists of. Theoretical studies [3] link the max. speed in curves to the curve radius through the K coefficient:

$$V = K \cdot \sqrt{R}$$

assigning K general values of 4.89, 5.3 and 6.40 – respectively – for conventional trains (operation rank B), with passive

TEMPI DI PERCORRENZA DA SIMULATORE
COVERAGE TIMES FROM SIMULATOR

Linea Cagliari – Sassari – Porto Torres								
Cagliari	→	Sassari	→			Porto Torres		
		t [h:mm:ss]	Δt [mm:ss]	Δt [%]		t [h:mm:ss]	Δt [mm:ss]	Δt [%]
			treno riferimento reference train				treno riferimento reference train	
Minuetto		2:30:40				2:45:28		
Talgo 1 BT		2:15:43	-14:57	-9,92		2:30:01	-15:27	-9,33
Talgo 2 BT		2:15:59	-14:41	-9,74		2:30:20	-15:08	-9,11
CAF R 598		2:07:10	-23:30	-15,59		2:20:23	-25:05	-15,16

consentita è la stessa per i due treni (150 km/h): queste piccole differenze saranno allora attribuibili totalmente alle superiori prestazioni del CAF rispetto al Talgo Pendular in termini di potenza specifica e diversa resistenza all'avanzamento, mentre la differenza di entrambi i convogli *tilting* rispetto al Minuetto è dovuta solamente alla limitazione a 130 Km/h di quest'ultimo, non all'assetto cassa variabile.

A valle di Oristano, la linea si fa più tortuosa, i contributi dell'assetto cassa sono fondamentali, ed il CAF 598, grazie alla inclinazione della cassa fino a 8°, riesce a mantenere velocità superiori rispetto al rango C+ previsto per il Talgo (inclinazione massima 3,5°); per tale motivo, è in grado di offrire risparmi percentuali relativi più significativi, sia tra Oristano e Macomer (+ 7,9%) sia tra Macomer e Sassari (+ 7,72%).

Non deve perciò stupire, ma essere bensì un'ulteriore conferma, il fatto che il risparmio percentuale relativo sia pressoché confrontabile tra i primi due tronchi (inferiore all'1%), e tra i secondi due (circa 7,8%).

I tempi di percorrenza commerciali sono stati stimati nello scenario attuale di tipo 1: in questo caso sono stati inseriti nel software tutti i treni che da Orario Ufficiale circolano sulla rete in un giorno ferialo tipo, contemporaneamente, tenendo perciò conto realisticamente anche degli incroci che vengono effettuati nelle località di servizio adibite e dei perditempo nelle diverse fermate che effettuano lungo il percorso. I treni circolanti da Orario Ufficiale, caricati tutti sul simulatore, sono stati raggruppati in 5 tipologie omogenee, al fine di analizzare meglio i risultati: treni a 'lunga distanza' che percorrono la dorsale nord-sud e viceversa, treni che circolano solo nella parte alta della rete, treni che coprono relazioni di tipo 'metropolitano', treni a 'media distanza' a sud di Oristano e treni a 'media distanza' su tratte miste. Con riferimento al convoglio Minuetto, le riduzioni medie in termini per-

and active tilting body, the K values have been recalculated for the trains in exam and – considering the *souplesse* – they respectively result to be 4.89, 5.70 and 6.07, with theoretical reductions of the coverage running time by 21% and 30% versus the conventional trains. The following simulations highlight that the field values, even though for a rather tortuous line, are lower than the assumed ones, reaching – in the most tortuous sections the line has been divided into – max. actual reduction values of 13% and 21%.

6. The simulation of the running time

The simulation of the train running on the network has been developed as indicated in order to determine the running or coverage time and the daily carrying capacity.

As related to the rated (minimum) coverage time, three scenarios have been created, namely: scenario 1, which considers the actual infrastructures, equipment and systems; the medium-term scenario 2, which involves changes to the signalling system between the stations of Cagliari e Decimomannu, and the long-term scenario 3, which includes modification to the signalling system also in the Decimomannu-San Gavino section (fig. 2). The modifications to signalling would allow overcoming the current limit of 150 km/h, which is set by the railway regulations in case of absence of continuous repetition of the signals to the driver's cab (RSC⁽⁶⁾), reaching 165 km/h for operation rank C+ and 180 km/h for operation rank P. It is worth noticing that – in this case – the CAF is penalized by its own speed limit of 160 km/h, whilst the Talgo, which would reach 200 km/h without constraints, is to be limited to 165 km/h.

The first simulation is aimed at estimating the mere running time, without crossing with other trains from the

⁽⁶⁾ "Ripetizione Segnali Continua": continuous cab signal, that is the continuous repetition on board of signals throughout the line.

TABELLA 4 - TABLE 4

Δt [%] MEDIO PER I TRENI COMMERCIALI,
DISTINTI PER 5 TIPOLOGIE DI LINEA
AVERAGE Δt [%] FOR THE COMMERCIAL TRAINS,
DIVIDED BY 5 TYPES OF LINE

Dorsale - Backbone	
	Δt [%] medio - average
Talgo 2 BT	-5,42
CAF 598	-7,16
Sassari - Ozieri Chilivani - Olbia	
	Δt [%] medio- average
Talgo 2 BT	-7
CAF 598	-14,45
Relazione metropolitana- Metropolitan link	
	Δt [%] medio - average
Talgo 2 BT	-10,74
CAF 598	-12,13
Media percorrenza-tratta a monte di Oristano Average coverage - section upstream Oristano	
	Δt [%] medio - average
Talgo 2 BT	-16,58
CAF 598	-17,47
Media percorrenza-tratte miste - Average coverage - mixed sections	
	Δt [%] medio - average
Talgo 2 BT	-9,38
CAF 598	-13,79

opposite direction and without intermediate stops (only 120' of stop in Sassari or Olbia), and the results are presented in tables 2 and 3.

As one can see from a simulation of the mere coverage time, the absolute time savings versus Minuetto (rank C) is within **9.1 ÷ 10.6%** for Talgo 2 BT, and within **15.1 ÷ 17%** for the CAF train.

Analysing the percentage Δt on the different sections of the Cagliari – Sassari line, it can be stated that the relative time saving between Talgo and CAF is limited between Cagliari and San Gavino (+0.2% in favour of CAF) and between San Gavino and Oristano (+1% in favour of CAF), where the line shows no excessive tortuosity and the maximum speed allowed is the same for both trains (150 km/h): these minor differences could then be totally ascribed to the higher performance of the CAF versus the Talgo Pendular in terms of specific power and diverse running resistance, whilst the difference of both the tilting trains versus the Minuetto is only due to the limitation of the latter to 130 km/h, not to the tilting body equipment.

Downstream Oristano, the line is more tortuous, the role of the body feature is essential, and the CAF 598 – thanks to the body tilting up to 8° – manages to keep higher speed versus the C+ rank defined for Talgo (max. incline 3.5°); this is why it can offer a more significant relative saving percentage, both between Oristano and Macomer (+ 7.9%) and between Macomer and Sassari (+ 7.72%).

The fact that the relative percentage savings are almost comparable between the first two sections (lower than 1%), and between the two second ones (approx. 7.8%) is therefore not surprising, but it can be considered as a further confirmation.

The commercial coverage time is estimated in the current type 1 scenario: in this case, the software has included all those trains that – according to the Official Timetable – circulate at the same time on the network in a typical working day, therefore realistically taking into account also the crossings which occur in the allocated service areas and of the downtime generated by the different stops along the pathway. The trains in circulation according to the Official Timetable, which are all loaded onto the simulator, have been gathered into 5 homogeneous types, in order to better analyse the results: 'long distance' trains, which cover the North-South backbone and vice versa, trains which circulate only in the higher part of the network, trains which cover relationships of 'metropolitan' type, 'medium distance' trains south to Oristano and 'medium distance' trains on mixed

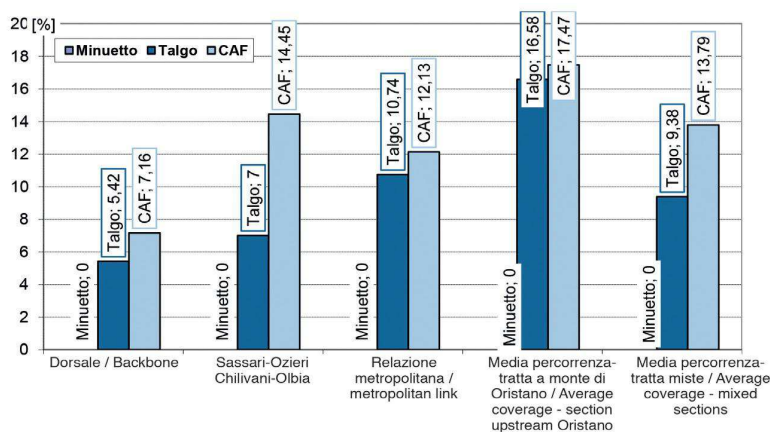


Fig. 3 - Confronto tra i valori medi percentuali di tempo risparmiato in esercizio, sulle 5 tipologie di tratta.

Fig. 3 - Comparison between the average percentage values of the time saved in the service, on the 5 types of section.

TABELLA 5 - TABLE 5

TEMPI DI PERCORRENZA E ΔT [%] SULLA TRATTA CAGLIARI-SASSARI-PORTO TORRES NELLO SCENARIO 1
 COVERAGE TIME AND ΔT [%] ON THE CAGLIARI-SASSARI-PORTO TORRES SECTION IN SCENARIO 1

Scenario 1: Cagliari - Decimomannu								
Linea Cagliari - Sassari - Porto Torres								
Cagliari	→	Sassari	→			Porto Torres		
		t [h:mm:ss]	Δt [mm:ss]	Δt [%]		t [h:mm:ss]	Δt [mm:ss]	Δt [%]
			treno riferimento reference train				treno riferimento reference train	
Minuetto		2:30:40				2:45:28		
Talgo 2 BT		2:15:42	-14:58	-9,93		2:30:02	-15:26	-09,33
CAF R 598		2:06:56	-23:44	-15,75		2:20:08	-25:20	-15,31

TABELLA 6 - TABLE 6

TEMPI DI PERCORRENZA E ΔT [%] SULLA TRATTA CAGLIARI-OLBIA-GOLFO ARANCI NELLO SCENARIO 1
 COVERAGE TIME AND ΔT [%] ON THE CAGLIARI-OLBIA-GOLFO ARANCI SECTION IN SCENARIO 1

Scenario 1: Cagliari - Decimomannu								
Linea Cagliari - Olbia - Golfo Aranci Stazione								
Cagliari	→	Olbia	→			Golfo Aranci Stazione		
		t [h:mm:ss]	Δt [mm:ss]	Δt [%]		t [h:mm:ss]	Δt [mm:ss]	Δt [%]
			treno riferimento reference train				treno riferimento reference train	
Minuetto		2:49:42				3:09:21		
Talgo 2 BT		2:29:28	-20:14	-11,92		2:46:23	-22:58	-12,13
CAF R 598		2:18:19	-31:23	-18,49		2:33:30	-35:51	-18,93

TABELLA 7 - TABLE 7

TEMPI DI PERCORRENZA E ΔT [%] SULLA TRATTA CAGLIARI-SASSARI-PORTO TORRES NELLO SCENARIO 2
 COVERAGE TIME AND ΔT [%] ON THE CAGLIARI-SASSARI-PORTO TORRES SECTION IN SCENARIO 2

Scenario 2: Cagliari - San Gavino								
Linea Cagliari - Sassari - Porto Torres								
Cagliari	→	Sassari	→			Porto Torres		
		t [h:mm:ss]	Δt [mm:ss]	Δt [%]		t [h:mm:ss]	Δt [mm:ss]	Δt [%]
			treno riferimento reference train				treno riferimento reference train	
Minuetto		2:30:40				2:45:28		
Talgo 2 BT		2:14:31	-15:51	-10,52		2:28:51	-16:37	-10,04
CAF R 598		2:05:29	-25:11	-16,71		2:18:41	-26:47	-16,18

TEMPI DI PERCORRENZA E ΔT [%] SULLA TRATTA CAGLIARI-OLBIA-GOLFO ARANCI NELLO SCENARIO 2
 COVERAGE TIME AND ΔT [%] ON THE CAGLIARI-OLBIA-GOLFO ARANCI SECTION IN SCENARIO 2

Scenario 2: Cagliari - San Gavino							
Linea Cagliari – Olbia – Station of Golfo Aranci							
Cagliari	→	Olbia	→			Golfo Aranci Stazione	
		t [h:mm:ss]	Δt [mm:ss]	Δt [%]		t [h:mm:ss]	Δt [mm:ss] Δt [%]
			treno riferimento reference train				treno riferimento reference train
Minuetto		2:49:42				3:09:21	
Talgo 2 BT		2:28:17	-21:25	-12,62		2:45:12	-24:09 -12,75
CAF R 598		2:16:52	-32:50	-19,35		2:32:03	-37:16 -19,68

centuali dei tempi di percorrenza sono presentate in tabella 4 e in fig. 3.

I risparmi di tempo medi relativi, in forma percentuale, riscontrabili in esercizio commerciale richiamano quelli visti per una percorrenza pura: circa + 7,45% a favore del CAF sulla linea Sassari Ozieri Chilivani e Olbia (tratte interamente a valle di Oristano), +1,4% sulla tratta veloce tra Cagliari, Decimomannu e San Gavino, + 0,9% tra Cagliari e Oristano, e di poco superiori (+1,7 / +4,4%) sulle tratte miste, in funzione del rapporto tra i chilometri percorsi nella tratta tortuosa a nord di Oristano e quelli totali, che includono i 95 km che collegano Cagliari e Oristano e che poco contribuiscono a mettere in mostra il guadagno relativo da parte del CAF.

I tempi di percorrenza pura negli scenari futuri a breve-medio e a medio-lungo termine (scenario 1 e 2) sono nelle tabelle 5, 6, 7 e 8, e mostrano risparmi di tempo compresi rispettivamente nel range 9,3-12,1% (Talgo); 15,3 – 18,9% (CAF) e del 10-12,7% (Talgo); 16,1-19,6% (CAF).

7. La simulazione della potenzialità della linea

La definizione di *potenzialità* alla quale si è fatto riferimento è quella generalmente presente in letteratura [7]; i parametri che la determinano sono sostanzialmente quelli relativi all’infrastruttura, al piano di trasporto adottato ed alla qualità del servizio.

Resta inteso che, derivando da fattori così diversi, la potenzialità resta una grandezza non univocamente definibile e con un *range* di risultati assai ampio, come dimostrato da studi sul tema [6] [7] [8].

Valutazioni circa la potenzialità sono state date sia in termini di potenzialità teorica, sia in termini di potenzialità nominale, qui intesa come passeggeri trasportabili nell’unità di tempo sulla base dell’offerta di posti a sedere di un convoglio.

sections. With reference to the Minuetto train, the average reductions in terms of coverage time are documented in table 4 and in fig. 3.

The average relative time saving, in percentage, which can be detected in the commercial service recall the ones which have been noticed for mere running time, i.e. : approx. +7,45% in favour of CAF on the Sassari Ozieri Chilivani and Olbia lines (section which are entirely upstream Oristano), +1,4% on the fast section between Cagliari, Decimomannu and San Gavino, +0,9% between Cagliari and Oristano, and little greater (+1,7 / +4,4%) on the mixed sections, as a function of the ratio between the kilometres covered in the tortuous section North to Oristano and the total ones, which include the 95 km which connect Cagliari to Oristano and contribute little to show the relative gain by the CAF.

The short to medium and medium to long term mere running time (scenarios 1 and 2) is reported in tables 5, 6, 7 and 8, and show time savings which are respectively included in ranges such as 9.3-12.1% (Talgo); 15.3-18,9% (CAF) and of 10-12.7% (Talgo); 16.1-19.6% (CAF).

7. The simulation of the carrying capacity of the line

The definition of daily carrying capacity we have referred to is the one which is generally reported in the literature [7]; the parameters which determine it are essentially those which are related to the infrastructure, to the adopted transport plan and to the quality of the service.

It is understood that – since it derives from such different factors – the carrying capacity remains a value which cannot be defined univocally and – instead – produces a rather wide range of results, as shown by studies on the theme [6] [7] [8].

Assessments relevant to the carrying capacity have been given both in terms of theoretical capacity, as well as in

La potenzialità teorica è stata dapprima stimata con l'uso del calcolatore - servendosi indirettamente degli output di OpenTrack - e da questa si è facilmente ricavata la potenzialità nominale del sistema. Entrambe le potenzialità così valutate sono state confrontate con i risultati dell'applicazione analitica proposta dal metodo UIC, la cui formulazione è presente originariamente nella Fiche UIC 405/R del 1978, modello che tra i 60 e più presenti in letteratura si adatta bene ad una linea a semplice binario. Il procedimento di calcolo proposto dalla UIC appartiene alla categoria dei metodi analitici; risulta d'immediata applicazione e presenta il vantaggio di tenere in considerazione la teoria delle code, concetti di derivazione statistica e di natura sperimentale, esplicitati in due maggiorazioni all'intervallo di distanziamento tra due treni successivi e nel termine t_{fm} . La formulazione è la seguente:

$$P = T / (t_{fm} + t_r + t_{zu})$$

P = potenzialità della linea nel periodo T di esercizio giornaliero, determinata dalla *sezione critica* (o *determinante*), cioè la sezione compresa fra due località di servizio a maggiore tempo di occupazione;

t_{fm} = intervallo di distanziamento medio ponderale fra treni (media delle casistiche che si presentano con un coefficiente ponderale in funzione della loro frequenza F), di *derivazione probabilistica*;

t_r = primo margine di ampliamento determinato in $0,67 t_{fm}$, dalla *teoria delle code*;

t_{zu} = tempo supplementare che tiene conto del funzionamento della linea (pari a $0,25 \cdot a$, dove a è il numero di sezioni di blocco in cui è suddivisa la tratta in questione), di *derivazione sperimentale*.

La *sezione critica* è la sezione a maggiore tempo di occupazione e dipende non solo dalla distanza che separa le due località di servizio, ma anche dalla velocità ammessa, dalle caratteristiche plano-altimetriche e dalle caratteristiche dei mezzi di trazione: ad esempio, la potenza che determina l'accelerazione e la lunghezza del treno, che influisce sul tempo di liberazione dei circuiti di binario.

Sulla rete sarda, la distanza media tra stazioni abilitate agli incroci è di 11,392 km; la sezione tra le stazioni di *Torralba e Ozieri-Chilivani* è lunga ben 21,095 km e, con pendenze che raggiungono il 25% (ascesa direzione nord-sud), rappresenta la sezione determinante della linea. La stazione di *Ozieri-Chilivani* è munita di segnale di protezione esterno per le provenienze da *Torralba* e da *Ardara* per inoltrare i treni sulla 'bretella', evitando il cambio banco ad *Ozieri-Chilivani* ma non permettendo servizio viaggiatori, e di segnale di protezione interno per proteggere la stazione stessa (fig. 4).

Definita con F la frequenza degli incroci sul tratto critico, la potenzialità risulta inversamente proporzionale ad essa; la ponderazione propria di F va allora effettuata due volte, la prima per tenere conto della frequenza con la quale i treni percorrono la bretella invece della sezione critica ordinaria (direzione *Sassari* e viceversa), la secon-

terms of the nominal one, here intended as the number of passengers that can be transported in the considered time, on the basis of the seats available on a train.

The theoretical carrying capacity has first been estimated using the computer - by indirectly employing the OpenTrack outputs - and the nominal carrying capacity of the system has been easily obtained by it. Both the carrying capacities which have been assessed as such have been compared to the results of the analytical application proposed in the UIC method, whose formulation is originally mentioned in the Leaflet/Fiche UIC 405/R of 1978, a model which - amongst the more than 60 ones which are reported in the literature - suits well a simple track line. The calculation procedure proposed by UIC belongs to the category of analytical methods; it results to be of immediate application and has the advantage that it takes into account the queuing theory, i.e. concepts of statistical derivation and experimental nature, which are made explicit in two increases in the distancing interval between two subsequent trains and in the t_{fm} term. The expression is as follows:

$$P = T / (t_{fm} + t_r + t_{zu})$$

P = *carrying capacity of the line in period T of daily service, determined by the critical (or determining) section, i.e. the section included between the two places of service with the greatest time of occupancy;*

t_{fm} = *average pondered distancing interval between the trains (mean of the cases which show up with a pondered coefficient that is a function of their frequency F), of probabilistic derivation;*

t_r = *first margin of increase determined in $0,67 t_{fm}$ from the queuing theory;*

t_{zu} = *additional time, which takes into account the operation of the line (equal to $0,25 \cdot a$, where a is the number of block sections the line section in exam is divided into), of experimental derivation.*

The critical section is the one of the greatest time of occupancy and it depends not only on the distance which separates the two service places, but also on the speed allowed, on the horizontal and vertical layout of the line and of on the features of the traction rolling stock: e.g., the power, which determines the acceleration, and the length of the train, which affects the time to clear the track circuits.

*On the Sardinian network, the average distance between the stations enabled to the crossings is 11.392 km; the section between the stations of *Torralba* and *Ozieri-Chilivani*, which is 21.095 km long with slopes (grade stakes) reaching 25% (uphill in the North-South direction), represents the determining section of the line. The *Ozieri - Chilivani* station is provided with an external protection system for the arrivals from *Torralba* and *Ardara* to route the trains on the double cross-over, thus avoiding the control desk change in *Ozieri - Chilivani*, but not allowing the passenger service, and with internal protection signal to protect the station itself (fig. 4).*

If we define by F the frequency of the crossings on the critical section, the carrying capacity will be inversely pro-



Fig. 4 - La sezione critica della linea simulata con il software Open Track.
 Fig. 4 - The critical section of the line as simulated by the OpenTrack software.

da per tenere conto della probabilità di accadimento di un incrocio che interessi tale sezione critica (treni da e per Olbia e Sassari).

La teoria delle code è stata applicata considerando una distribuzione degli arrivi secondo Poisson e distribuzione dei tempi di servizio costante (σ uguale a 0).

Il periodo di riferimento è stato considerato di 22 h, lasciando 2 h giornaliere alle operazioni di manutenzione (tabella 9).

Si evince quindi che il convoglio più performante in termini di tempi di percorrenza e di potenzialità teorica, non necessariamente lo è anche in termini di potenzialità nominale, in particolare se la differenza nel numero di treni/giorno è piccola.

8. Legami tortuosità – velocità e proposte di un nuovo indice

Nello studio da cui quest’articolo è tratto si è dato spazio anche all’espressione della tortuosità ed al suo legame con la velocità ammessa: partendo dalla definizione classica presente in letteratura (τ), sono state messe a punto due nuove definizioni sperimentali di tortuosità (τ_I e τ_{II}) che inglobano alcuni parametri fondamentali per descrivere l’importanza delle curve presenti in linea:

$$\tau_I = \Sigma \frac{L^2}{H \cdot R}$$

$$\tau_{II} = \frac{n}{\Sigma R} \cdot 100 \quad \tau = \frac{l_c}{l_r} \cdot 100$$

portional to it; the proper pondering of F is therefore to be performed twice: once to take into account the frequency by which the trains cover the double cross-over instead of the ordinary critical section (in the Sassari direction and vice versa) and once to take into account the likelihood of a crossing involving such critical section (i.e. trains from and to Olbia and Sassari).

The queuing theory has been applied taking into account a distribution of the arrivals according to Poisson and constant distribution of the service time (i.e. σ equal to 0).

The reference time taken into consideration is of 22 h, leaving 2 h/day to the maintenance operations (table 9).

Hence, the most performing train in terms of coverage time and theoretical carrying capacity is not necessarily the most performing one in terms of nominal carrying capacity as well, mainly if the difference in terms of trains/day is low.

8. Tortuosity-speed relations and proposals for a new index

In the study this article is drawn from, room is given also to the expression of tortuosity and to its link to the allowed speed: starting from the classic definition mentioned in the literature (τ), two new experimental definitions of tortuosity have been defined, namely (τ_I e τ_{II}), which include some essential parameters to describe the significance of the curves on the line:

$$\tau_I = \Sigma \frac{L^2}{H \cdot R}$$

$$\tau_{II} = \frac{n}{\Sigma R} \cdot 100 \quad \tau = \frac{l_c}{l_r} \cdot 100$$

TABELLA 9 - TABLE 9

TEMPI DI PERCORRENZA E ΔT [%] SULLA TRATTA
CAGLIARI-SASSARI-PORTO TORRES NELLO SCENARIO 1
COVERAGE TIME AND ΔT [%] ON THE
CAGLIARI-SASSARI-PORTO TORRES SECTION IN SCENARIO 1

P teorica - Theoretical carrying capacity [T = 22 h]									
UIC			OpenTrack						
	Minuetto	Talgo	CAF	Minuetto	Talgo	CAF			
	TOT.	TOT.	TOT.	TOT.	TOT.	TOT.			
F	[treni / 2 direzioni] - [trains / 2 directions]			[treni / 2 direzioni] - [trains / 2 directions]					
15%	88	94	98	78	82	96			
20%	84	90	94						
25%	80	86	90						
30%	78	84	88						
35%	74	80	84						
40%	72	78	80						
45%	70	74	78						
50%	68	72	76						
55%	66	70	74						
60%	64	68	70						
65%	62	66	68						
70%	60	64	66						
75%	58	62	64						
80%	56	60	62						
85%	54	58	62						
90%	54	58	60						
95%	52	56	58						
100%	50	54	56						
Δ	-	+ 6.8 - 8%	+ 11.4-12%				-	+5.1%	+23%

where:

l_c = overall length of the curve sections, including the parabolic connecting tracks [m];

L = length of the curve, including the parabolic connecting tracks [m];

l_r = length of the (real) line section [m];

H = cant [mm];

R = curve radius [m] (< 1000 m);

n = number of curves.

By applying the classic definition of τ [3], one cannot specify what (geometric features) and how many (quantity) curves are included in the line section under exam; the experimental definition of τ_r here proposed connects the length of the turn to the cant and to the curve radius (i.e. more geometric definition of τ), whilst - in τ_n - it has been tried to highlight the feeling which is perceived on board, therefore considering also the number of curves (more sensorial definition of τ). With the variation of the definition given

to τ , there is also a variation in the "classification" of the sections the line has been divided into, and - therefore - in the shape taken by the curve which links the max. speed to the tortuosity (graphs 1, 2 and 3). It is understood that - in any case - the speed-tortuosity link is connected to the choice the section is to be divided into, to the max. value of R as it is considered in the analytical formulas, and to special local situations of limited speed (e.g. bridges or switches where the mandatory speed is identical for the different operation ranks).

dove:

l_c = sviluppo complessivo dei tratti in curva, compresi i raccordi parabolici [m];

L = sviluppo della curva, compresi i raccordi parabolici [m];

l_r = lunghezza (reale) del tratto di linea [m];

H = sopraelevazione [mm];

R = raggio della curva [m] (< 1000 m);

n = numero delle curve.

Applicando la definizione classica di τ [3], non risulta possibile specificare quali (caratteristiche geometriche) e quante (in numero) curve sono affrontate sul tratto di linea in esame; la definizione sperimentale di τ_r qui introdotta lega lo sviluppo della curva alla sopraelevazione ed al raggio di curvatura (definizione più geometrica della τ), mentre in τ_n si è tentato di porre l'accento sulla sensazione avvertita a bordo, considerando perciò anche il numero delle curve presenti (definizione

9. Results of the analysis

In the case of the pure running times in the current scenario, the savings oscillate between **15.1 ÷ 17%** for the CAF train, versus **9.1 ÷ 10.6%** for the Talgo 2 BT, having Minuetto as reference; in the case of the future scenarios 1 and 2, the savings increase respectively to values included between **15.3 ÷ 18.9%** and **16.1 ÷**

TABELLA 9 - TABLE 9
(continuazione)

più sensoriale della τ). Al variare della definizione data a τ varia anche la 'classifica' dei tratti in cui la linea è stata suddivisa, quindi la forma assunta dalla curva che lega velocità massima-tortuosità (grafici 1, 2 e 3). Resta inteso che, in ogni caso, la relazione velocità-tortuosità risulta legata alla scelta dei tratti in cui suddividere la linea, al valore massimo di R considerato nelle formule analitiche ed a particolari situazioni locali di velocità limite (esempio ponti o scambi con velocità imposta identica per i vari ranghi).

9. Risultati dell'analisi

Nel caso di *tempi* di percorrenza pura nello scenario attuale, il risparmio oscilla tra il **15,1 ÷ 17%** per il treno della CAF, contro il **9,1 ÷ 10,6 %** per il Talgo 2 BT, avendo come riferimento il Minuetto; nel caso degli scenari futuri 1 e 2 il risparmio aumenta rispettivamente a valori compresi tra il **15,3 ÷ 18,9%** e **16,1 ÷ 19,6%** per il treno della CAF, contro il **9,3 ÷ 12,1%** e **10 ÷ 12,7%** per il Talgo 2 BT.

In termini di *potenzialità nominale*, dall'uso del metodo UIC si evince che il CAF consente 4174 ÷ 7232 pass./giorno in entrambe le direzioni in più del Minuetto, contro il Talgo che ne permette il passaggio di 5440 ÷ 9330 in più; attraverso l'uso del software OpenTrack, si dimostra che il Talgo consente 7960 pass./giorno più del Minuetto, ed il CAF ulteriori 314 (per un totale di 19584 pass./giorno).

La tabella 10 è riassuntiva delle migliori performance del CAF rispetto al Talgo, negli scenari analizzati.

Più nel dettaglio, *la media* è stata calcolata sui 4 tempi di percorrenza sulle relazioni Cagliari - Sassari, Cagliari - Porto Torres, Cagliari - Olbia e Cagliari - Golfo Aranci Stazione.

La potenzialità nominale calcolata seguendo il metodo UIC è più elevata per il Talgo per il fatto che la differenza tra il numero di treni/giorno per i due treni è bassa, e pesa maggiormente a favore del Talgo il numero di posti a sedere offerti sul treno (235 contro 204).

P nominale - Nominal carrying capacity [T = 22 h]						
UIC			OpenTrack			
	Minuetto	Talgo	CAF	Minuetto	Talgo	CAF
	TOT.	TOT.	TOT.	TOT.	TOT.	TOT.
F	[pass / 2 direzioni] - [pax. / 2 directions]			[pass / 2 direzioni] - [pax. / 2 directions]		
15%	12760	22090	19992	11310	19270	19584
20%	12180	21150	19176			
25%	11600	20210	18360			
30%	11310	19740	17952			
35%	10730	18800	17136			
40%	10440	18330	16320			
45%	10150	17390	15912			
50%	9860	16920	15504			
55%	9570	16450	15096			
60%	9280	15980	14280			
65%	8990	15510	13872			
70%	8700	15040	13464			
75%	8410	14570	13056			
80%	8120	14100	12648			
85%	7830	13630	12648			
90%	7830	13630	12240			
95%	7540	13160	11832			
100%	7250	12690	11424			
D	-	+ 73 - 75%	+ 57%	-	+70%	+73,1%

19.6% for the CAF train, versus **9.3 ÷ 12.1%** and **10 ÷ 12.7%** for Talgo 2 BT.

In terms of nominal carrying capacity, the use of the UIC methods shows that the CAF allows 4174 ÷ 7232 passengers/day in both directions more than the Minuetto, versus the Talgo, which allows the passage of 5440 ÷ 9330 more; through the use of the OpenTrack software, it is shown that the Talgo allows 7960 passengers/day more than the Minuetto, and the CAF another 314 (for a total of 19584 passengers/day).

Table 10 summarizes the better performance of CAF versus the Talgo, in the analysed scenarios.

In deeper detail, the mean value has been calculated on the 4 running times on the Cagliari - Sassari, Cagliari - Porto Torres, Cagliari - Olbia and Cagliari - Station of Golfo Aranci relationships.

The nominal carrying capacity calculated according to the UIC method is higher for Talgo since the difference between the number of trains/day for the two trains is low, and the number of seats offered on the train (i.e. 235 vs. 204) weighs in favour of the Talgo.

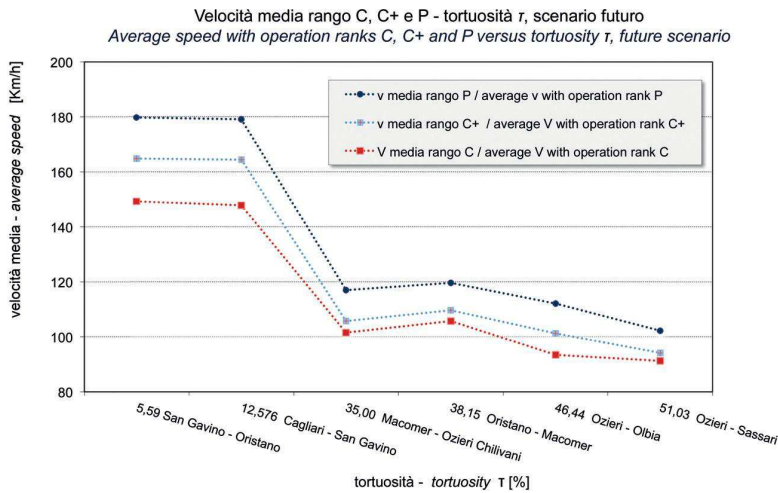


Grafico 1 - Legame velocità media - tortuosità τ per i tre ranghi considerati.
Graph 1 - Average speed - tortuosity link τ for the three operation ranks taken into account.

10. Conclusioni

L'inserimento sulle linee secondarie sarde di nuovi treni *tilting* consentirebbe senza dubbio di sfruttare appieno i vantaggi che questi convogli offrono. Risulterebbe, d'altra parte, la prima esperienza in tale direzione in Italia, sulla cui rete principale, caratterizzata da raggi di curvatura medio-grandi, questi treni circolano già da parecchi anni, ma senza sfruttare appieno la peculiarità dell'incremento di velocità in curva.

Entrambi i treni analizzati offrono performance soddisfacenti, sia in termini di riduzione dei tempi di percorrenza, sia in termini di potenzialità; i miglioramenti massimi al trasporto regionale Sardo si hanno senza dubbio con l'adozione di treni R 598 ad assetto variabile attivo, che offrirebbe ulteriori margini di sviluppo grazie al sistema di *tilting anticipato* [9], già disponibile sulla serie R 598.

Come si può vedere, i guadagni temporali del CAF, se confrontati con il Talgo, tendono ad aumentare, seppur leggermente, anche negli scenari futuri; i miglioramenti indotti dalle modifiche future al segnalamento risultano comunque eccessivamente bassi, almeno per le corse effettuate sull'intera tratta dorsale, e non giustificabili dalla sola riduzione delle tempistiche di percorrenza.

10. Conclusions

The introduction, on the secondary Sardinian lines, of new tilting trains would doubtlessly allow appreciating in full the advantages offered by these trains. On the other hand, this would be the first experience in such direction in Italy, on whose main network - which is characterised by medium to large curve radii - these trains have been circulating for several years, but without utilising the whole increment in the curves.

The two trains which have been analysed offer satisfactory performances, both in terms of reduction of the coverage time, and in terms of carrying capacity; the largest improvements to the regional transport

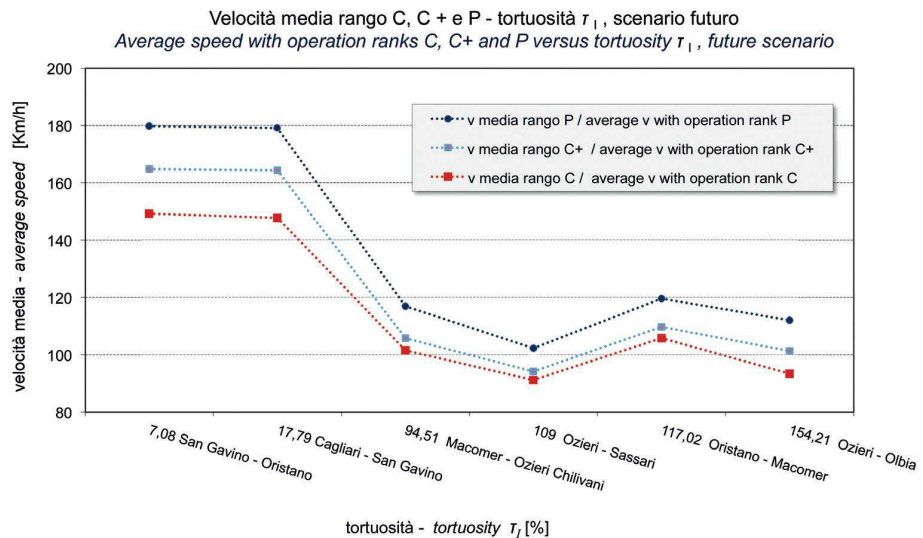


Grafico 2 - Legame velocità media - tortuosità τ_1 per i tre ranghi considerati.
Graph 2 - Average speed - tortuosity link τ_1 for the three operation ranks taken into account.

in Sardinia would doubtlessly be obtained by the adoption of the active tilting body trains R 598, which would offer further margins of development thanks to the anticipated tilting system [9], which is already available on the R 598 series.

As it can be noticed, the time gain of the CAF, if compared to the Talgo, tends to increase - even though lightly - also in the future scenarios; the improvements generated by the forthcoming modifications to the signalling result in any case to be excessively low, at least for the journey performed on the whole backbone sections, and could not be justified by the sole reduction of the coverage time.

Velocità media rango C, C+ e P - tortuosità τ_{11} , scenario futuro
 Average speed with operation ranks C, C+ and P versus tortuosity τ_{11} , *future scenario*

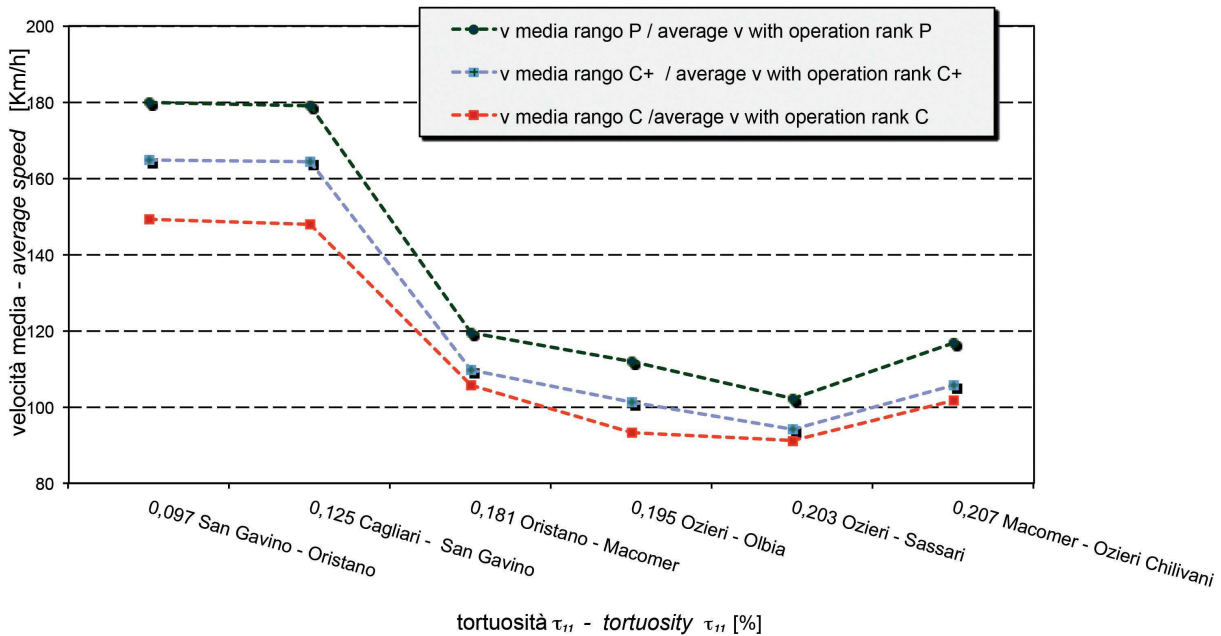


Grafico 3 - Legame velocità media - tortuosità τ_{11} , per i tre ranghi considerati.
 Graph 3 - Average speed - tortuosity link τ_{11} for the three operation ranks taken into account.

TABELLA 10 - TABLE 10

CONFRONTO RIASSUNTIVO DELLE PERFORMANCE DEL TRENO AD ASSETTO CASSA ATTIVO RISPETTO AL TRENO DI TIPO PASSIVO
 SUMMARY COMPARISON OF THE ACTIVE TILTING BODY PERFORMANCE VERSUS THE PASSIVE ONE

Scenario / Scenario	% a favore del CAF R 598 / % in favour of CAF R 598
percorrenza pura, scenario attuale / pure coverage, current scenario	+5,85 – 6,8% (Sassari - Golfo Aranci)
media - mean	6,27%
scenario commerciale / commercial scenario	+1 – 7,45% in f dei km percorsi a nord di Oristano +1 – 7,45% in f of km covered at the North of Oristano
percorrenza pura, scenario 1 / pure running time, scenario 1	+5,82 – 6,98% (Sassari - Olbia)
media - mean	6,29%
percorrenza pura, scenario 2 / pure running time, scenario 2	+6,14 – 6,93% (Sassari - Golfo Aranci)
media - mean	6,50%
potenzialità UIC / UIC carrying capacity	+2 ÷ 4 treni/giorno / +2 ÷ 4 trains/day (+3,70 ÷ 4,25%)
potenzialità OpenTrack / carrying capacity using OpenTrack	+14 treni/giorno / +14 trains/day (+17%)
potenzialità nominale UIC / nominal UIC carrying capacity	-1266 - 2098 pass./giorno / -1266 - 2098 pass./days (-9,49 ÷ 9,97%)
potenzialità nominale OpenTrack / nominal OpenTrack carrying capacity	+314 pass./giorno / +314 pass./days (+1,63%)

Infine, il legame tra *velocità e tortuosità* è fortemente connesso ad alcune particolarità della linea ma soprattutto alla formulazione data alla tortuosità stessa, e l'espressione tradizionale della τ proposta in letteratura [3] è solamente una delle possibili.

Ringraziamenti

Per il prezioso materiale fornito, di fondamentale importanza per la realizzazione dell'articolo, sono doverosi i ringraziamenti all'Ing. DE MAIO (Trenitalia – Direzione Passeggeri Regionale Sardegna), all'Ing. COSSU (RFI - Direzione Compartimentale Infrastruttura, Cagliari) e all'Ing. CONCU (libero professionista).

Finally, the link between speed and tortuosity is strongly connected to some particularity of the line, but - mainly - to the formulation of the tortuosity itself, and the traditional expression of τ proposed by the literature [3] is just one of the viable options.

Acknowledgements

For the precious material supplied, which was of extreme importance for the development of the article, it is dutiful to thank Messrs. DE MAIO (Trenitalia – Regional Passenger Management of Sardinia), COSSU (RFI - Compartmental Management of Infrastructures, Cagliari) and CONCU (self-employed expert).

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Regione Sardegna, *"Piano Regionale dei Trasporti"*, luglio 2007.
- [2] DE MAIO A., COSSU P., OLLA P.P., *"Prove di circolazione del treno Talgo XXI sulla rete RFI della Sardegna"*, Ingegneria Ferroviaria, dicembre 2008.
- [3] DALLA CHIARA B., *"Engineering and design of railway systems - trains, lines, operation, innovation and telematics"*, Ed. CLUT, pp. 1-366 (UK), Oct. 2012, ISBN 9788879923231.
- [4] ALONSO MOSTAZA J. C., *"Unidades Basculantes Serie 598"*, Nov. 2005.
- [5] DALLA CHIARA B., HAUSER G., ELIA A., *"I treni ad assetto variabile: evoluzione, prestazioni e prospettive"*, Ingegneria Ferroviaria, luglio-agosto 2008.
- [6] DEBARBIERI P., *"Miglioramento delle relazioni ferroviarie tra: Torino, Cuneo, Nizza, la Riviera Francese e la Riviera Italiana di Ponente"*, progetto Interreg III A ALCOTRA – CALIPSO, aprile 2008.
- [7] KONTAXI E., RICCI S., *"Tecniche e metodologie per la determinazione della capacità ferroviaria: analisi comparata e prospettive d'integrazione"*, Ingegneria Ferroviaria, dicembre 2009.
- [8] SACCO L., COLTRO N., DALLA CHIARA B., *"Calculations of the carrying capacity and energy consumption on the Turin-Modane railway connection: application of models and simulation / Calcolo della potenzialità e dei consumi energetici del collegamento ferroviario Torino-Modane applicazione di modelli e simulazione"*, Ingegneria Ferroviaria, vol. LXVI, ISSN: 0020-0956. N. 10, pp 831-858, Ott. 2011.
- [9] CANDELA F., DALLA CHIARA B., DEVECCHI D., *"Treni ad assetto variabile e tradizionali: prestazioni cinematiche ed analisi di comfort per l'ottimizzazione della compensazione"*, Ingegneria Ferroviaria, anno LX, n. 3, pp. 221-234, marzo 2005.