



## Accessibilità ferroviaria al nuovo stadio di Roma

### *Rail accessibility to a planned new soccer stadium in Rome*

Dott. Ing. Giuseppe LOPRENCIPE<sup>(\*)</sup>

Dott. Ing. Marco MORETTI<sup>(\*\*)</sup>

Dott. Ing. Laura MORETTI<sup>(\*)</sup>

Prof. Ing. Stefano RICCI<sup>(\*)</sup>

**Sommario** – Un nuovo stadio di calcio per la società A.S. Roma è stato progettato, in anni recenti, nell'area di Tor di Valle, quartiere a sud-ovest di Roma. L'impianto sportivo sorgerà sulla sponda sinistra del Tevere, in un'area non direttamente servita dall'attuale sistema di trasporto pubblico. La rete di trasporto dovrà dunque essere adeguata: il presente studio esamina e compara alcune soluzioni trasportistiche che possono essere implementate per migliorare i collegamenti nell'area interessata. Gli autori hanno elaborato quattro alternative con l'obiettivo di favorire lo scambio tra le esistenti linee su ferro: la metropolitana B-B1, la ferrovia urbana Roma-Lido di Ostia e la ferrovia FR1 Fiumicino-Roma. Per ogni scenario, sono state condotte analisi di fattibilità trasportistica ed economica. Metodi di analisi trasportistica sono stati implementati per valutare caratteristiche tecniche e funzionali delle proposte, mentre per l'analisi economica i costi di realizzazione sono stati valutati tenendo conto dell'attuale mercato italiano. I risultati dello studio evidenziano che la soluzione più conservativa tra quelle proposte garantisce i migliori risultati sia tecnici sia economici. Infatti, con il minore tra gli investimenti stimati, si assicura un immediato miglioramento del servizio di trasporto e la possibilità di futura espansione dello stesso.

#### 1. Introduzione

La costruzione di un nuovo stadio di calcio con capienza massima 60.000 persone nella zona sud-ovest della città di Roma cambierà inevitabilmente la domanda di traffico da e verso l'area. Sebbene lo stadio insisterà nell'area in cui si trova un ippodromo in disuso, sulla riva sinistra del Tevere, il relativo impatto richiede analisi [5], [12], [13], valutazioni [18], [16] e la conseguente modifi-

**Summary** - In the last years, a stadium for the soccer team A.S. Roma has been designed in the Tor di Valle neighbourhood, located in the South-Western area of Rome. The planned location is along the Tiber river and is not directly served by the current network of public transportation. The need to improve the surrounding transportation infrastructure motivated the present study. The work examines and compares some track alignment and station location options that could be implemented to improve the accessibility in this area. The authors compare four railway and metro infrastructure alternatives for improving the mass transit lines in that area of the city being currently the existing B-B1 metro line, the Roma-Lido di Ostia urban railway line and the Fiumicino Airport-Rome (FR1) railway line. For each alternative, the feasibility of train operation, investment and operating costs are assessed. The technical and functional characteristics of the proposed infrastructure and train service options have been analysed while the economic impact was assessed using the current Italian costs for construction of rail infrastructures. The results of this study suggest the upgrading of the existing signalling and safety systems of the Roma-Lido di Ostia option as the best one from both the train traffic and economic point of views because it guarantees an immediate improvement of the service at lower cost and it also enables the possibility of an increase of the train frequency in future.

#### 1. Introduction

The plan of construction of a new soccer stadium in the South-Western part of the city of Rome (Italy) will change the traffic demand in this area and will increase the expected traffic flows, since the stadium is designed for a capacity of 60,000 persons. Although the stadium will be

<sup>(\*)</sup> Sapienza Università di Roma.

<sup>(\*\*)</sup> Ex studente Sapienza Università di Roma.

<sup>(\*)</sup> Sapienza Università di Roma.

<sup>(\*\*)</sup> Former student Sapienza University of Rome.

ca dell'attuale rete di trasporto pubblico. Difatti, la costruzione di una struttura destinata a ospitare grandi eventi rende necessario l'adeguamento delle strategie di gestione del trasporto pubblico [23] e la valutazione delle relative conseguenze. La fattibilità di un progetto è strettamente correlata a tali valutazioni [6], [17], visto che il trasporto privato non può assicurare un adeguato livello di servizio in presenza di grandi eventi. Inoltre, le esternalità del trasporto privato, quali inquinamento [14], rumore, vibrazioni [10], [24], congestione del traffico e incidenti [22], [3] non possono essere trascurate. In presenza di un nuovo stadio di calcio, l'uso del trasporto pubblico a discapito del privato motorizzato deve pertanto essere un obiettivo della pianificazione trasportistica a esso correlata. Nel caso specifico, la Giunta del Comune di Roma nel 2014 ha riconosciuto di interesse pubblico il progetto dello stadio a condizione che almeno il 50% degli utenti possano raggiungerlo con mezzi pubblici.

Lo studio presenta l'analisi preliminare infrastrutturale [21] e trasportistica di alternative di trasporto su ferro nell'area sud-ovest di Roma [20], che possano soddisfare l'incremento di domanda di traffico conseguente alla costruzione dell'impianto. L'analisi esamina quattro scenari, che differiscono nella geometria della rete di trasporto su ferro, e usa metodi analitico-combinatori per valutarne le conseguenze trasportistiche (per esempio, il coefficiente di utilizzazione regolare e il coefficiente di utilizzazione totale del sistema). Infine il lavoro presenta i risultati dell'analisi economica condotta coerentemente con le recenti esperienze di costruzione di linee urbane di trasporto su ferro in Italia e in particolare a Roma.

## 2. Attuali infrastrutture di trasporto su ferro

L'area interessata dalla costruzione del nuovo stadio è attualmente servita da tre linee di trasporto su ferro: la metropolitana B-B1, la ferrovia urbana Roma-Lido e la ferrovia FR1 Roma-Fiumicino. In particolare, le linee B-B1 e Roma-Lido corrono lungo la riva del Tevere dove si trova l'ippodromo, mentre la linea FR1 interessa la riva opposta, dove la stazione più vicina al futuro stadio è Muratella.

La linea B ha 26 stazioni, comprese tra i capolinea Laurentina e Rebibbia lungo la direttrice sud-ovest/nord-est; nella parte a nord ha una diramazione chiamata B1 [2]. Nel suo tronco a sud, la linea è parallela al primo tratto della linea Roma-Lido, che collega la stazione Porta San Paolo a Ostia, municipio litoraneo di Roma (fig. 1). La ferrovia Roma-Lido è lunga 28 km, ha 13 stazioni, 3 delle quali (Porta San Paolo, Basilica San Paolo e EUR Magliana) consentono ai passeggeri uno scambio diretto con la linea B.

Le tre linee di trasporto su ferro convergono a Porta San Paolo, dove in un raggio di 500 m si trovano il capolinea della ferrovia Roma-Lido, la stazione Porta San Paolo della Metro B e la stazione Ostiense della linea FR1.

*built near a disused hippodrome, on the left riverside of the Tiber, the potential impact in the area requires different analyses [5], [12], [13], different evaluation [18], [16] and subsequent adaptation of the current public transport network capacity. Indeed, the construction of large event venues makes it necessary to reshape the transportation demand management strategies [23] and to evaluate the corresponding economic and transportation consequences. Transportation accessibility and related costs should be examined when new sport infrastructures are considered, because these criteria influence the feasibility of a project [6], [17]. Private transport by cars cannot ensure a good level of service, also due to its externalities as pollution [14], noise, congestion and accidents [22], [3]. Therefore, the use of public transportation and the discouragement of private motorized transportation should be implemented when analysing the transportation-related consequence of the construction of a new building like soccer stadium. In this case, in 2014 the Municipal Council of Rome recognized as a public interest the stadium project on condition that at least 50% of the users may reach it by mean public transport.*

*This study focuses on the preliminary analysis of infrastructural [21] and operational solutions of rail lines in the South-West of Rome [20] to provide alternatives to manage the consequences of the increase demand caused by the construction of the stadium. The analysis examines four geometric and technical alternatives, which differ in their final layout, and it uses analytical-combinatorial methods to evaluate the corresponding transportation consequences (e.g. the coefficient of regular utilization and the coefficient of total utilization of the system). Finally, the work presents and discusses the results of an economic analysis conducted for each solution, considering the recent experience gained in Italy and especially in Rome about construction of rail transportation lines.*

## 2. Current Transportation Infrastructures in the area of interest

*The area involved in the construction of the new stadium is currently served by three rail transport lines: B-B1 metro line, Roma-Lido urban railway and FR1 railway Roma-Fiumicino Airport. Particularly, B-B1 and Roma-Lido lines pass by the Tiber riverside where the stadium will be located, while FR1 line passes on the opposite side of the river and its closest station is Muratella.*

*Line B has a total of 26 stations along the South-West to North-East direction, from Laurentina to Rebibbia terminuses. The Northern section of this line has a bifurcation called B1 [2]. In its Southern part, the line runs parallel to the first part of Roma-Lido line, which links Porta San Paolo to the district of Ostia, a Rome's seaside neighbourhood (fig. 1). The Roma-Lido line is 28 km long and it serves 13 stations, 3 of them (Porta San Paolo, Basilica San Paolo and EUR Magliana) allowing direct exchange with Metro B.*

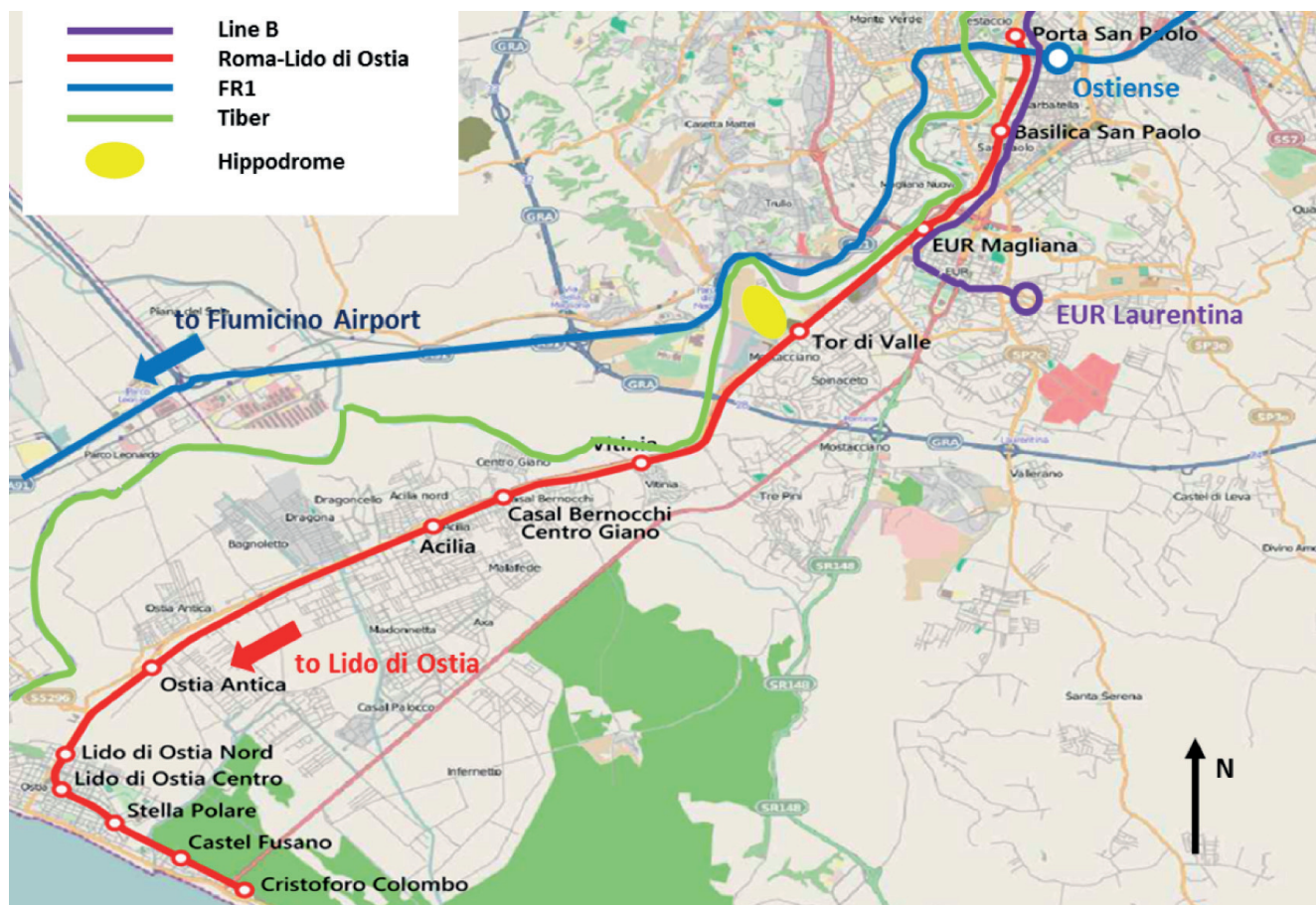


Fig. 1 - Tracciati del trasporto pubblico su ferro nell'area di studio.

Fig. 1 - Map of urban railway Roma-Lido, railway FR1 and subway Line B involved in the study.

Lungo la linea B-B1, le sezioni di blocco sono lunghe in media 240 m, con lunghezza compresa tra 172 e 326 m. Dopo la stazione di EUR Magliana, un sistema di diramazioni collega la linea al deposito Officine Magliana e sarà utilizzato in alcune delle alternative proposte. Sulla Roma-Lido, le sezioni di blocco sono lunghe in media 890 m, con lunghezza compresa tra 301 e 1348 m.

I convogli considerati nello studio, sia per la Metro B sia per la Roma-Lido, sono prodotti da CAF (modello S300). Ciascuno è lungo 108 m e ha capacità di trasporto di 1.212 persone. Alcune caratteristiche dinamiche degli stessi sono elencate in tabella 1, mentre la fig. 2 ne presenta le curve caratteristiche di trazione e frenatura.

### 3. Scenari esaminati

La fig. 3 rappresenta in maniera schematica (non in scala) i quattro scenari esaminati.

Nelle piante, le linee tratteggiate rappresentano binari di nuova costruzione. Nei quattro scenari proposti è inoltre prevista la costruzione di un ponte pedonale per consentire lo scavalco delle strade di scorrimento Via

All these rail lines converge to Porta San Paolo, where the terminus of Roma-Lido line, a station of Metro B (Porta San Paolo) and a station of FR1 (Ostiense) are located within a 500 m large area.

In Metro B-B1, the average block length in the area is 240 m, ranging from 172 to 326 m. After the EUR Magliana station a junction is linking the line to Officine Magliana depot and maintenance centre. This junction will be used in some of the proposed alternatives. In Roma-Lido railway, the average block length is 890 m, ranging from 301 to 1348 m.

Rolling stock considered in the analysis, both for Metro B and Roma-Lido, is produced by CAF (model S300). Each convoy is 108 m long and has a maximum carrying capacity of 1,212 people. Some operational characteristics of the convoys are listed in table 1, while fig. 2 shows the typical traction and braking efforts curve of these vehicles.

### 3. Considered alternatives

Fig. 3 (not in scale) represents the schemes for the four alternatives analysed.



TABELLA 1 – TABLE 1

Caratteristiche dinamiche operative dei treni  
Dynamic operation characteristics of convoys

Caratteristica Characteristic	Valore Value	Unità Unit
Massa a pieno carico Full load mass	266.000	kg
Massima accelerazione Maximum acceleration	1,0	m/s <sup>2</sup>
Massima decelerazione Ordinary deceleration	1,1	m/s <sup>2</sup>
Massima velocità di marcia Maximum current speed	80	km/h

Ostiense e Via del Mare, che separano la Roma-Lido dal futuro stadio.

Lo *Scenario A* sposta il capolinea della Roma-Lido da Porta San Paolo a Tor di Valle. Questa alternativa prevede inoltre una diramazione della Metro B-B1 tra EUR Magliana ed EUR Palasport, con la conseguente costruzione di due nuove stazioni: Tor di Valle (di scambio con la Roma-Lido) e Muratella (di scambio con la FR1). Il nuovo tracciato della linea B userà il tracciato dell'attuale Roma-Lido da EUR Magliana a Tor di Valle. Le stazioni Tor di Valle (Roma-Lido) e Muratella (Metro B) saranno di nuova costruzione, mentre l'attuale stazione di Tor di Valle verrà adattata per le esigenze della Metro B.

Lo *Scenario B* non modifica il tracciato della Roma-Lido. È prevista una diramazione della Metro B tra EUR Magliana ed EUR Palasport, con la conseguente costruzione di due nuove stazioni: Tor di Valle (di scambio con la Roma-Lido) e Muratella (di scambio con la FR1). Le stazioni Tor di Valle (Roma-Lido) e Muratella (Metro B) saranno di nuova costruzione.

Lo *Scenario C* non modifica il tracciato della Roma-Lido. Questa alternativa prevede lo sfioccamiento della Metro B tra EUR Magliana ed EUR Palasport fino a Muratella (di scambio con la FR1). In questo caso, la stazio-

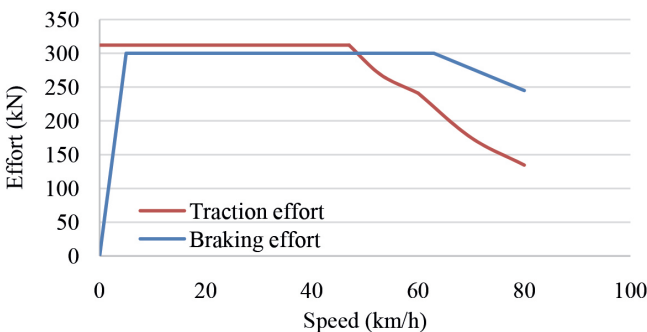


Fig. 2 - Curve di trazione e frenatura per i convogli considerati.

Fig. 2 - Traction and braking effort curves for the considered convoys.

In these drawings, the dashed lines represent new rail construction. For the concerned alternatives, the construction of a footbridge has also been considered, since it would permit to cross the existing parallel high traffic roads Via Ostiense and Via del Mare, which represent a physical separation between the present Roma-Lido line and the future stadium.

Alternative A moves the terminus of the Roma-Lido from Porta San Paolo to Tor di Valle station. Besides, this alternative includes a bifurcation of Metro B-B1, between EUR Magliana and EUR Palasport, with a branch line with two new stations: Tor di Valle (interconnection with Roma-Lido) and Muratella (interconnection with FR1). The new proposed branches of line B use the track of the current Roma-Lido from EUR Magliana to Tor di Valle stations. The stations Tor di Valle (Roma-Lido) and Muratella (Metro B) would be newly built, while the current Tor di Valle station would be adapted to be used by Metro B.

Alternative B does not change the route of the Roma-Lido line. In this case, however, there is a Metro B new branch between EUR Magliana and EUR Palasport stations with two stations: Tor di Valle (interconnection with Roma-Lido) and Muratella (interconnection with FR1). Under this condition, the Tor di Valle (Roma-Lido) and Muratella stations would be newly built.

Alternative C does not change the current route of the Roma-Lido line. This proposal includes a new branch of Metro B starting between EUR Magliana and EUR Palasport stations towards Muratella (interconnection with FR1). In this case, the Tor di Valle station would be modified and the Muratella (Metro B) station would be newly built.

Finally, Alternative D consists of changing the Roma-Lido signalling into a metro line, with an upgraded signalling system, to serve the new stadium by means of existing Tor di Valle station.

For each analysed alternative, some preliminary assessments were conduct to verify the feasibility of the horizontal and vertical alignment of the different track connection alternatives with respect to track radii, gradients, switches, and speed limits.

#### 4. Methodology for capacity assessment

The combinatorial method proposed by POTTHOFF [19] and later specialised and extensively applied [8] [9] was used for the calculation of the carrying capacity of various options. For each hypothesis, the layout, the positions of signals and switches were considered to compile the following matrices:

- Routes matrix (or compatibility matrix C): every row and column of C represents a route, and each  $c_{i,j}$  element represents the compatibility/incompatibility conditions between the route on row i and the route on column j among those explained in fig. 4. Cases “γ” (com-

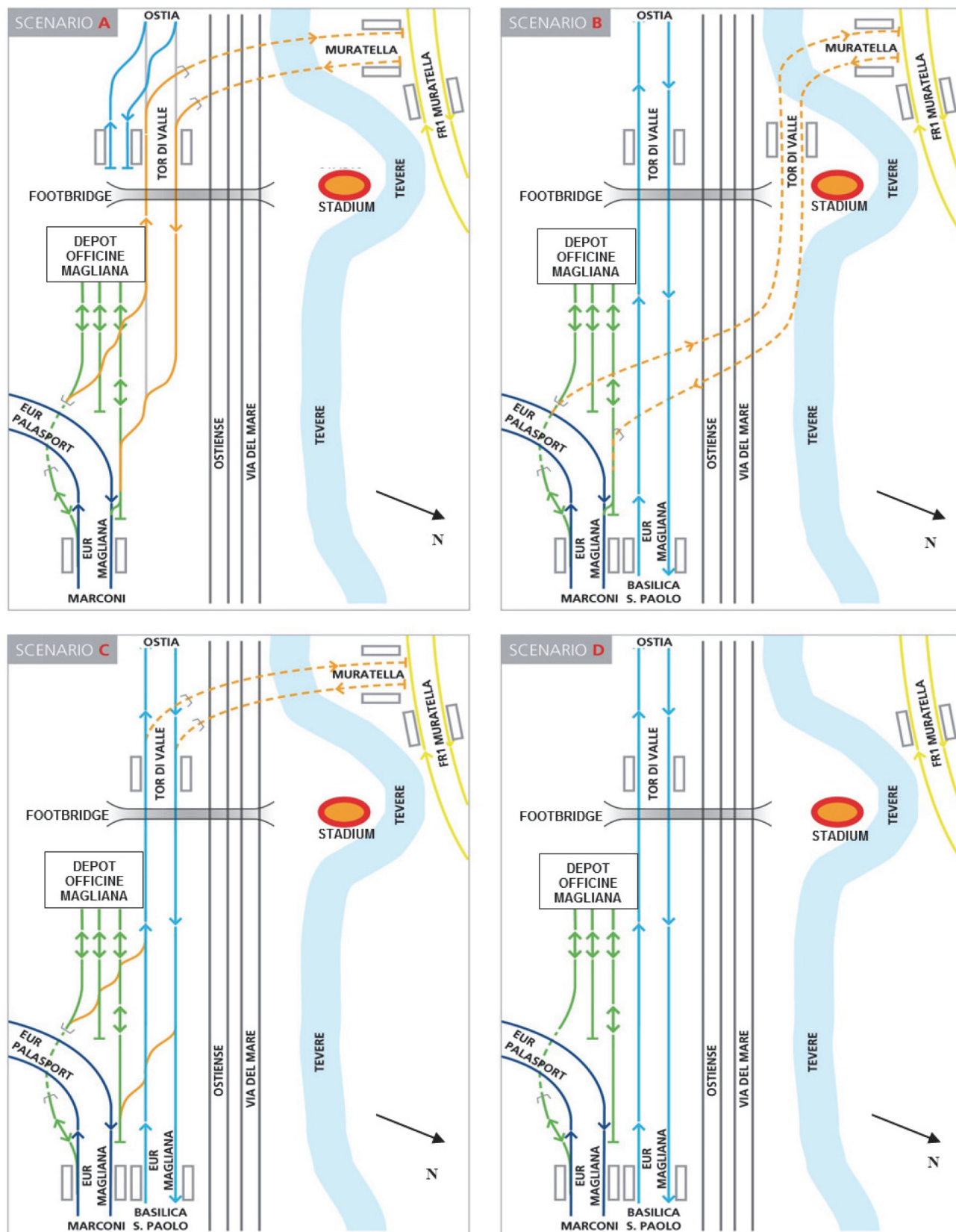


Fig. 3 - Pianta schematica dei quattro scenari.  
Fig. 3 - Schematic layout of the four alternatives.

ne di Tor di Valle sarà modificata e la stazione di Mura-  
tella (della Metro B) sarà di nuova costruzione.

Infine lo *Scenario D* prevede un ammodernamento del  
sistema di segnalamento della Roma-Lido, in modo che  
possa garantire un servizio di metropolitana e collegare il  
nuovo stadio attraverso la fermata di Tor di Valle.

Per ciascuno scenario, sono state condotte alcune va-  
lutazioni preliminari per verificare la fattibilità delle so-  
luzioni di tracciato proposte sia dal punto di vista plani-  
metrico che altimetrico con riferimento ai valori dei raggi  
e delle pendenze longitudinali, agli scambi e alle velocità  
limite.

#### 4. Metodologia per il calcolo della capacità di trasporto

Il metodo combinatorio proposto da POTTHOFF [19] e  
più tardi perfezionato e ampiamente applicato [8], [9] è  
stato implementato per il calcolo della capacità di tra-  
sporto degli scenari, considerandone il layout, la posizio-  
ne dei segnali e degli scambi. L'analisi ha richiesto la  
compilazione delle matrici:

- matrice degli itinerari (o matrice di compatibilità  $C$ ):  
ciascuna riga e colonna di  $C$  rappresenta un itinerario  
e ciascun elemento  $c_{ij}$  rappresenta le condizioni di  
compatibilità/incompatibilità tra l'itinerario  $i$  e l'itine-  
rario  $j$  secondo le condizioni riportate in fig. 4. I casi  
“ $\gamma$ ” (compatibile), “ $\alpha$ ” e “ $\sigma$ ” non possono generare ri-  
tardo;
- matrice dei tempi di interdizione ( $I$ ): questa riporta i  
tempi di occupazione  $t_{ij}$  da parte dell'itinerario  $i$  ri-  
spetto a  $j$ , che variano da 0 (per itinerari compatibili)  
al totale dell'occupazione;
- matrice dei treni ( $T$ ): ciascun elemento è il prodotto  
tra il numero di treni che percorrono l'itinerario  $i$  e il  
numero di treni che percorrono l'itinerario  $j$ , rispetti-  
vamente  $n_i$  e  $n_j$ ;
- matrice treni-tempi ( $TT$ ): è il prodotto tra la matrice  
dei tempi di interdizione  $I$  e la matrice dei treni  $T$ ;
- matrice dei ritardi ( $D$ ): ciascun elemento  $R_{ij}$  rappre-  
senta il ritardo causato dall'itinerario  $i$  sull'itinerario  $j$ .

Il metodo consente il calcolo, per un tempo di riferi-  
mento  $T$  e per un nodo critico, del numero di movimenti  
( $N$ ), del numero di itinerari compatibili ( $n_m$ ), del tempo  
medio di occupazione del nodo ( $t_m$ ) e del tempo complessi-  
simo di ritardo ( $\Sigma R$ ) dovuto alle incompatibilità [11] [15].  
Il metodo prevede che la probabilità di arrivo di un treno  
sia costante nel periodo  $T$ : ne consegue che il traffico in  
un nodo è conseguenza di  $N/n_m$  eventi e il tempo totale di  
occupazione  $B$  è (1):

$$B = \frac{N}{n_m} \cdot t_m \quad (1)$$

patible), “ $\alpha$ ” and “ $\sigma$ ” cannot generate waiting time be-  
cause they involve the operation of a single train;

- *Interdiction time matrix ( $I$ ):* this matrix contains infor-  
mation about how route  $i$  restrains route  $j$  for a period  
of time  $t_{ij}$  variable from zero (for compatible routes) to  
the total occupation time;
- *Trains matrix ( $T$ ):* each element represents the number  
of trains which pass along the routes  $i$  and  $j$ , respective-  
ly  $n_i$  and  $n_j$ ;
- *Trains-times matrix ( $TT$ ):* this matrix is the result of the  
product between matrices  $I$  and  $T$ ;
- *Waiting time matrix ( $D$ ):* each element  $R_{ij}$  represents the  
waiting time caused by route  $i$  on route  $j$ .

The method permits to calculate, for a reference time  $T$   
and a critical node, the total number ( $N$ ) of train move-  
ments, the average number of compatible routes ( $n_m$ ), the  
average occupation time for the whole node ( $t_m$ ) and the  
overall waiting time ( $\Sigma R$ ) due to incompatibilities [11]  
[15]. It is in first instance assumed that the probability of  
arrival of a train-during the period  $T$  is constant. Therefore,  
the traffic in the node is as a sequence of  $N/n_m$  events and  
the total track occupation time  $B$  of any node is (1):

$$B = \frac{N}{n_m} \cdot t_m \quad (1)$$

Besides, the incompatibilities prevent the operation in  
the node for a time  $D$ , defined as (2):

$$D = \frac{\Sigma R}{n_m} \quad (2)$$

The condition to be verified in the node is (3):

$$T \geq B + D = \frac{N}{n_m} \cdot t_m + \frac{\Sigma R}{n_m} \quad (3)$$

The empirical equations suggested in [18] permit to de-  
termine the number of compatible routes  $n_m$  (4) and the av-  
erage time of occupation of the node  $t_m$  (5):

$$n_m = \frac{N^2}{\Sigma I n_i \cdot n_j} \quad (4)$$

$$t_m = \frac{\Sigma I n_i \cdot n_j \cdot t_{ij}^2}{2T} \quad (5)$$

where:

- $n_i$  and  $n_j$  are the number of train movements along the  
routes  $i$  and  $j$  (i.e. the number of movements for each  
route is derived from the scheduled train operation dur-  
ing the reference time  $T$ );
- $t_{ij}$  is the interdiction time of route  $i$  versus route  $j$  (i.e.  
the period during which the route  $i$  prevents the use of  
route  $j$  calculated according to the dynamic characteris-

Le incompatibilità impediscono i movimenti nel nodo per un tempo  $D$ , definito come (2):

$$D = \frac{\sum R}{n_m} \quad (2)$$

La condizione di verifica del nodo è perciò (3):

$$T \geq B + D = \frac{N}{n_m} \cdot t_m + \frac{\sum R}{n_m} \quad (3)$$

Le equazioni empiriche formulate in [18] permettono di calcolare il numero di itinerari compatibili  $n_m$  (4) e il tempo medio di occupazione del nodo  $t_m$  (5):

$$n_m = \frac{N^2}{\sum_i n_i \cdot n_j} \quad (4)$$

$$t_m = \frac{\sum_i n_i \cdot n_j \cdot t_{ij}^2}{2T} \quad (5)$$

ove:

- $n_i$  e  $n_j$  sono i numeri di treni sugli itinerari  $i$  e  $j$  (ovvero il numero di movimenti di ciascun itinerario calcolato secondo le operazioni programmate nel tempo di riferimento  $T$ );
- $t_{ij}$  è il tempo di interdizione dell'itinerario  $i$  rispetto all'itinerario  $j$  (ovvero il tempo per il quale un treno sull'itinerario  $i$  impedisce la circolazione sull'itinerario  $j$  calcolato in funzione delle caratteristiche dinamiche del treno elencate in tabella 1 e le leggi del moto). In particolare, i tempi di interdizione sono stati calcolati applicando le leggi del moto rettilineo uniforme e uniformemente accelerato, tenendo conto della velocità operativa dei treni in marcia su curve planimetriche e scambi, nonché nelle fasi di ingresso e uscita dalle stazioni.

Le sommatorie al denominatore di (4) e al numeratore di (5) comprendono tutte le combinazioni di itinerari incompatibili.

Il ritardo atteso  $R_{ij}$  indotto da ciascuna incompatibilità è dato da (6) [15] e il ritardo complessivo di un nodo  $\sum R$  è dato da (7):

$$R_{ij} = \frac{n_i \cdot n_j \cdot t_{ij}^2}{2T} \quad (6)$$

$$\sum R = \sum_L R_{ij} \quad (7)$$

ove  $L$  è l'insieme delle coppie di itinerari incompatibili con esclusione delle incompatibilità di tipo "α" e "σ" (fig. 4).

Ne consegue che la condizione di verifica è (8):

$$T \geq \frac{\sum_i n_i \cdot n_j \cdot t_{ij}}{N} + \frac{\sum_L R_{ij} \cdot \sum_i n_i \cdot n_j}{N^2} \quad (8)$$

tics of train listed in table 1 and the laws of motion). Particularly, the interdiction times have been calculated according to the law of uniform motion and constant acceleration motion, taking into account the speed of train when operating through switches and curves, and braking/accelerating before/after the station platforms.

The sums in the denominator of (4) and numerator of (5) include the set of all incompatible routes.

The waiting time  $R_{ij}$  induced by each incompatibility is given by (6) [15] and the overall waiting time of a node  $\sum R$  is given by (7):

$$R_{ij} = \frac{n_i \cdot n_j \cdot t_{ij}^2}{2T} \quad (6)$$

$$\sum R = \sum_L R_{ij} \quad (7)$$

where  $L$  is the set of pairs of incompatible routes, except for the "α" and "σ" incompatibility cases (fig. 4).

Therefore, the general condition to be verified is (8):

$$T \geq \frac{\sum_i n_i \cdot n_j \cdot t_{ij}}{N} + \frac{\sum_L R_{ij} \cdot \sum_i n_i \cdot n_j}{N^2} \quad (8)$$

Finally, the result of the analysis consists of the coefficients of regular utilization  $U_R$  (9) and total utilization  $U_T$

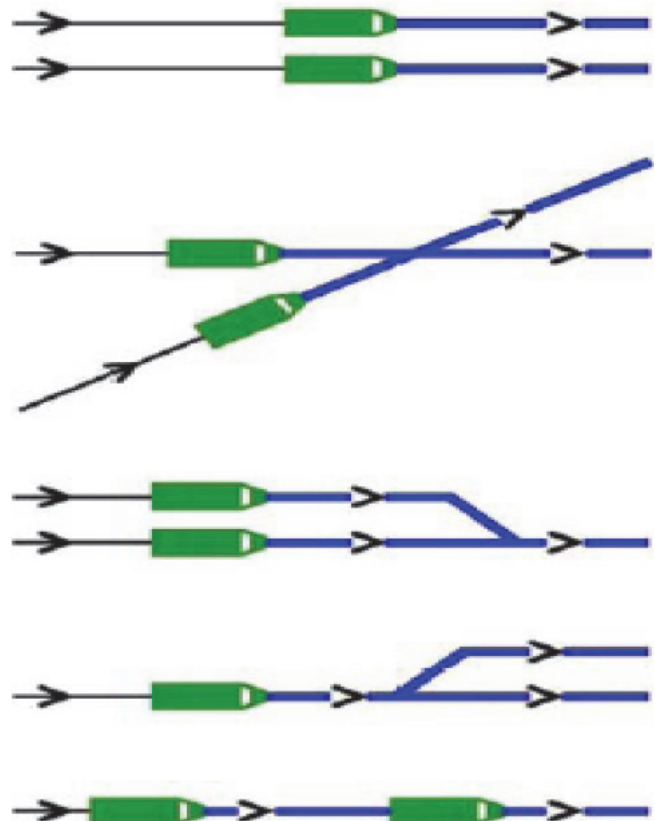


Fig. 4 - Compatibilità e incompatibilità tra itinerari.  
Fig. 4 - Compatibility and incompatibility between routes.



Infine, il risultato dell'analisi è sintetizzato dal coefficiente di utilizzazione regolare  $U_R$  (9) e dal coefficiente di utilizzazione totale  $U_T$  (10), che hanno permesso il confronto delle alternative:

$$U_R = \frac{B}{T} \quad (9)$$

$$U_T = \frac{B+D}{T} \quad (10)$$

La fig. 5 riporta il diagramma di flusso del metodo di verifica della capacità di circolazione esposto.

La procedura di calcolo esposta è stata utilizzata per calcolare la capacità di trasporto di ciascuno scenario. I coefficienti  $U_R$  and  $U_T$  sono stati considerati come parametri di valutazione per quantificare i margini di miglioramento del sistema.

## 5. Analisi economica

L'analisi economica degli scenari esaminati è stata condotta sulla base dei costi di costruzione di metropolitane in Italia, in particolare la Roma-Lido (nuova stazione di Acilia sud in costruzione), linea B1 (in esercizio) e la linea C (in parte in esercizio, in parte in costruzione) a Roma [1], [7], [4].

La tabella 2 elenca i costi delle voci di spesa considerate.

## 6. Analisi degli scenari

### 6.1. Scenario A

La fig. 6 presenta il layout dello Scenario A. Questo prevede la costruzione di 2.000 m di tracciato in superficie e 5.500 m di tracciato in sotterraneo. Nel tratto Magliana-Tor di Valle saranno presenti 24 sezioni di blocco lunghe 300 m. L'attuale stazione Tor di Valle della Roma-Lido sarà adeguata e integrata alla Metro B, mentre la stazione Tor di Valle a servizio della Roma-Lido sarà di nuova costruzione. Lungo il tratto Tor di Valle-Muratella saranno presenti 24 sezioni di blocco lunghe 300 m.

Nella stazione Magliana della Metro B, si assume un arrivo ogni 140 s nelle ore di punta, il passaggio di treni sul tronco da e per Muratella avverrà ogni 420 s, mentre lo stesso da e per Laurentina avverrà ogni 210 s. La linea B avrà pertanto una capacità di trasporto pari a 9.696 passeggeri/h da

(10), which are compared with regard to the differences between the infrastructure alternatives:

$$U_R = \frac{B}{T} \quad (9)$$

$$U_T = \frac{B+D}{T} \quad (10)$$

The flow chart in fig. 5 shows the exposed methodology the steps.

The proposed procedure is herein used to calculate the carrying capacity for each analysed option. It should be pointed out that the selected coefficients  $U_R$  and  $U_T$  are considered as objective parameters that indicate remaining time margins of track occupation.

## 5. Input for economic assessment

Economic assessment of the unit investment and operating costs for each option are conducted using informa-

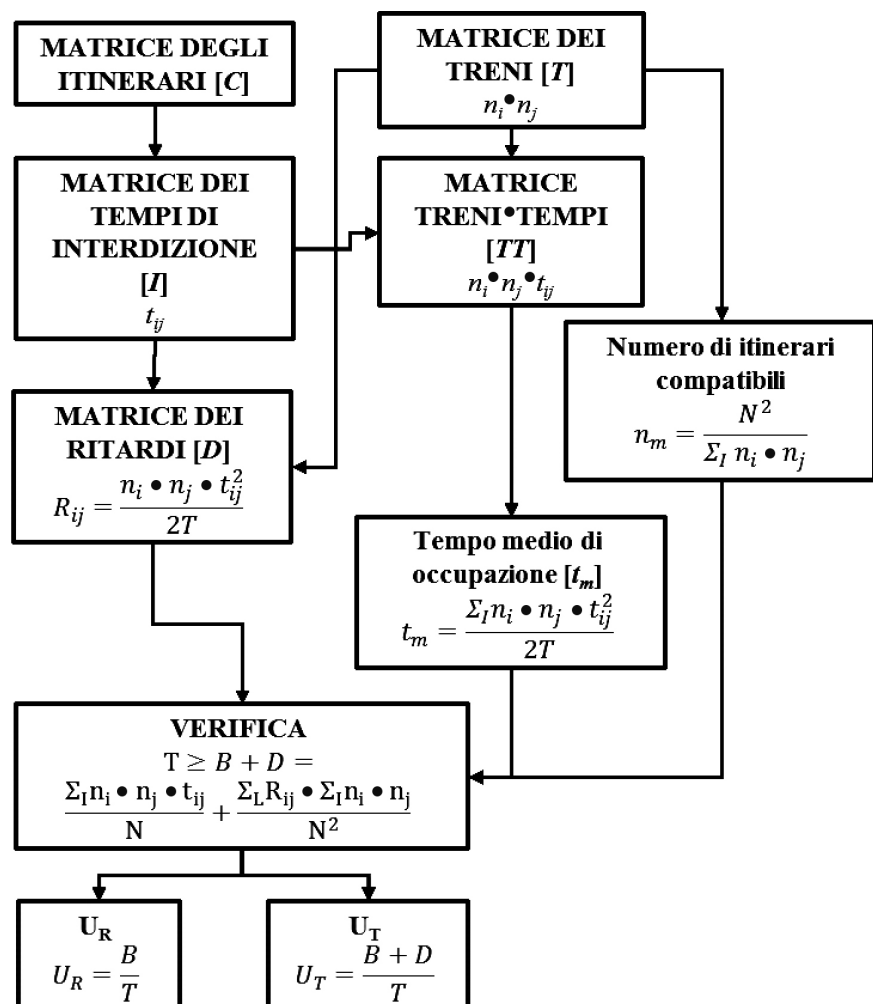


Fig. 5 - Diagramma di flusso del metodo di verifica della capacità di circolazione.  
Fig. 5 - Flow chart of the methodology.



tion on the costs of similar metro systems in Italy, with particular reference to Roma-Lido (new Acilia sud station under construction), line B1 (in operation) and line C (partially in operation and still under construction) in Rome [1] [7] [4].

## 6. Analysis of infrastructure alternatives

Fig. 6 presents the layout of Alternative A. It implies the construction of 2,000 m of an on-ground new track and 5,500 m of an underground new track. The track Magliana-Tor di Valle will be provided of 24 block sections 300 m long. The Tor di Valle station of the current Roma-Lido line would be rehabilitated and used as part of line B, while the Tor di Valle station of the future would be newly constructed. The trackella would be provided of 24 block sec-

Il layout di fig. 6 permette di considerare gli itinerari del nodo  $L$  indipendenti da quelli del nodo  $H$ . L'analisi di

*In the Magliana station of Metro B, it is assumed a headway of 140 s during the peak period. Also, it is assumed that the headway of trains from and to the Muratel-*

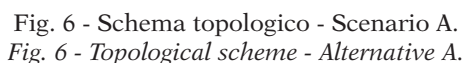


TABELLA 3 – TABLE 3

Matrice degli itinerari *C* - Scenario A  
Routes matrix *C* - Alternative A

	<i>a-e</i>	<i>f-b</i>	<i>c-e</i>	<i>f-d</i>
<i>a-e</i>	$\alpha$	$\gamma$	$\zeta$	$\gamma$
<i>f-b</i>		$\alpha$	$\gamma$	$\sigma$
<i>c-e</i>			$\alpha$	$\gamma$
<i>f-d</i>				$\alpha$

trasporto dello Scenario A si riduce pertanto all'analisi dei nodi *L* e *H* e delle relative coppie di itinerari, ovvero rispettivamente *a-e* e *c-e*, e *f-b* e *f-d*.

Per ciascuna coppia di itinerari il tempo di interdizione  $t_{ij}$  è la somma dei tempi:

$t_{30}$ : tempo trascorso dal convoglio in moto a velocità pari a 30 km/h (moto rettilineo uniforme);

$t_f$ : tempo trascorso dal convoglio in fase di frenatura (moto rettilineo uniformemente decelerato);

$t_s$ : tempo di fermata per la salita e discesa dei passeggeri, assunto pari a 20 s;

$t_{acc}$ : tempo trascorso dal convoglio in fase di accelerazione (moto rettilineo uniformemente accelerato);

$t_{80}$ : tempo trascorso dal convoglio in moto a velocità pari a 80 km/h (moto rettilineo uniforme).

Si riportano a titolo di esempio i calcoli per i tempi di interdizione degli itinerari *a-e* con se stesso e *f-b* con se stesso:

- a-e* con se stesso (nodo *L*): il tempo di interdizione  $t_{ij}$  è il tempo che intercorre (11) tra il superamento da parte della testa del convoglio del segnale in *A* e il superamento da parte della coda del segnale posto in *E* (fig. 6):

$$t_{a-e/a-e} = t_{30} + t_f + t_s + t_{acc} = 74s \quad (11)$$

- f-b* con se stesso (nodo *H*): il tempo di interdizione  $t_{ij}$  è il tempo che intercorre (12) tra il superamento da parte della testa del convoglio del segnale in *F* e il superamento da parte della coda del segnale posto in *G* (Fi):

$$t_{f-b/f-b} = t_f + t_s + t_{acc} + t_{30} = 61s \quad (12)$$

La tabella 4 riporta gli elementi  $t_{ij}$  della matrice *I* espressi in secondi.

Coerentemente con le frequenze di passaggio assunte, per ciascuna coppia di itinerari *i* e *j*, è stato calcolato il numero di treni (rispettivamente  $n_i$  e  $n_j$ ) in transito durante il periodo di riferimento *T* assunto pari a 60 minuti (tabella 5).

Per ciascun nodo il prodotto tra la matrice *I* (tabella 4) e la matrice *T* (tabella 5) restituisce la matrice tempi-treni *TT* (tabella 6).

TABELLA 4 – TABLE 4

Matrice dei tempi di interdizione *I* dei nodi *L* e *H*  
Scenario A [s]  
Interdiction time matrix *I* of nodes *L* and *H* – Alternative A [s]

Nodo L - Node L			Nodo H - Node H		
	<i>a-e</i>	<i>c-e</i>		<i>f-b</i>	<i>f-d</i>
<i>a-e</i>	74	74	<i>f-b</i>	61	62
<i>c-e</i>	59	59	<i>f-d</i>	57	57

la branch is 420 s and that the headway of trains from and to Laurentina terminus is 210 s. Line B will have the capacity to transport 9,696 passengers/h to and from Tor di Valle station and 19,392 passengers/h along the route between Laurentina and EUR Magliana stations. The defined frequencies and their corresponding scheduled operation require the purchase of 10 new trains. Table 3 shows the routes matrix *C* of Alternative A.

The layout in fig. 6 permits to consider the routes passing through node *L* as independent upon those intersecting the node *H*. Therefore, the transportation analysis of Alternative A is reduced to the analysis of nodes *L* and *H* and their couples of routes, i.e. respectively *a-e* and *c-e*, and *f-b* and *f-d*.

For each couple of routes, the interdiction time is the sum of either all the factors or only part of them:

$t_{30}$ : travel time at the speed of 30 km/h (uniform motion);

$t_f$ : braking time (constant deceleration motion);

$t_s$ : dwelling time of 20 s;

$t_{acc}$ : acceleration time (constant acceleration motion);

$t_{80}$ : travel time at the speed of 80 km/h (uniform motion).

For instance, the calculation of  $t_{ij}$  for routes *a-e* with itself and *f-b* with itself is:

- a-e* with itself (node *L*): the interdiction time  $t_{ij}$  is the time (11) from the head of train passes the signal in *A* until the end of the train passes the signal in *E* (fig. 6):

$$t_{a-e/a-e} = t_{30} + t_f + t_s + t_{acc} = 74s \quad (11)$$

- f-b* with itself (node *H*): the interdiction time  $t_{ij}$  is the

TABELLA 5 – TABLE 5

Matrice dei treni *T* dei nodi *L* e *H* - Scenario A  
Trains matrix *T* of nodes *L* and *H* - Alternative A

Nodo L - Node L			Nodo H - Node H		
	<i>a-e</i>	<i>c-e</i>		<i>f-b</i>	<i>f-d</i>
<i>a-e</i>	64	128	<i>f-b</i>	64	128
<i>c-e</i>	128	256	<i>f-d</i>	128	256

TABELLA 6 – TABLE 6

Matrice tempi-treni *TT* dei nodi *L* e *H* - Scenario A  
*Trains-times matrix TT of nodes L and H - Alternative A*

Nodo L - Node L			Nodo H - Node H		
	<i>a-e</i>	<i>c-e</i>		<i>f-b</i>	<i>f-d</i>
<i>a-e</i>	79	158	<i>f-b</i>	65	133
<i>c-e</i>	126	252	<i>f-d</i>	73	146

Attraverso l'Equazione (6), i risultati elencati nelle tabelle 5 e 6 consentono di definire la matrice dei ritardi *D*, i cui elementi in tabella 7 sono espressi in secondi. I valori pari a zero fanno riferimenti a casi di interdizioni che non generano ritardo.

I risultati dell'analisi trasportistica condotta per i nodi *L* e *H* dello Scenario A sono riportati in tabella 8.

I risultati presentati in tabella 8 dimostrano che, per un periodo di riferimento *T* pari a 60 minuti, il numero complessivo di treni *N* è 24 per entrambi i nodi, *t<sub>m</sub>* è 64,2 s per il nodo *L* e 43,2 s per il nodo *H*. Il ritardo medio *R<sub>ij</sub>* è 11 s per il nodo *L*, mentre è 0 s per il nodo *H* poiché le incompatibilità non producono ritardo. I coefficienti *U<sub>R</sub>* ottenuti per i nodi *L* e *H* sono rispettivamente 0,43 e 0,29, mentre *U<sub>T</sub>* sono rispettivamente 0,47 e 0,29. Il nodo *L* è utilizzato per il 47% della sua capacità, perciò il segnalamento, la lunghezza delle sezioni di blocco e la sicurezza di circolazione non consentono l'incremento del numero di itinerari. Il nodo *H* è utilizzato per il 29% della sua capacità, ma viste le caratteristiche del nodo *L*, non è possibile incrementare il suo numero di circolazioni. La tabella 9 riporta i costi dello Scenario A desunti da quanto riportato in tabella 2: il costo complessivo dello Scenario A è 294,70 M€, con un costo medio di 39,29 M€/km.

6.2. Scenario B

La fig. 7 presenta il layout dello Scenario B, che coincide con quanto presentato per lo Scenario A. Lo Scenario B prevede la costruzione di 12.500 m di tracciato in sotterraneo. Il tronco di binari compreso tra EUR Magliana e Tor di Valle sarà provvisto di 23 sezioni di blocco lunghe 300 m. La stazione di Tor di Valle della Roma-Lido sarà adeguata per consentire lo scambio di passeggeri tra le linee. Lungo il tratto Tor di Valle-Muratella saranno presenti 24 sezioni di blocco lunghe 300 m.

TABELLA 7 – TABLE 7

Matrice dei ritardi *D* dei nodi *L* e *H* - Scenario A [s]  
*Waiting time matrix D of nodes L and H - Alternative A [s]*

Nodo L - Node L			Nodo H - Node H		
	<i>a-e</i>	<i>c-e</i>		<i>f-b</i>	<i>f-d</i>
<i>a-e</i>	0	97	<i>f-b</i>	0	0
<i>c-e</i>	62	0	<i>f-d</i>	0	0

time (12) from the head of train passes the signal in *F* and the end of the train passes the signal in *G* (fig. 6):

$$t_{f-b/f-b} = t_f + t_s + t_{acc} + t_{30} = 61s \quad (12)$$

Table 4 shows the interdiction time *t<sub>ij</sub>* matrix *I* where elements are expressed in seconds.

According to the assumed frequencies, it is possible to assess, for each couples of routes, the number of trains which pass during the reference time *T* equal to 60 minutes along the routes *i* and *j*, respectively *n<sub>i</sub>* and *n<sub>j</sub>* (table 5).

For each examined node, the product between the matrices listed in table 4 and gives the matrix trains-times *TT* (table 6).

According to Equation 6, the results listed in table 5 and 6 permit to calculate the waiting time matrix *D*, where elements are expressed in seconds (table 7). Values equal to 0 refers to routes which do not generate waiting time.

Table 8 lists the results of the analysis conducted for nodes *L* and *H* under this alternative.

The results of the analysis presented in table 8 show that, for a reference time *T* equal to 60 minutes, the total number of routes *N* is 24 for both nodes, *t<sub>m</sub>* is 64.2 s for node *L* and 43.2 s for node *H*. Average *R<sub>ij</sub>* is 11 s for node *L*, while it is 0 s for node *H* because its incompatibilities do not cause any waiting time. Also, *U<sub>R</sub>* obtained for nodes *L* and *H* is respectively the values of 0.43 e 0.29, while *U<sub>T</sub>* is respectively 0.47 and 0.29. Node *L* is used at 47% of its capacity that means that signalling, length of block sections and safety conditions of the system do not permit to increase the number of routes through this node. Node *H* is used at 29% of its capacity, but due to the characteristics of node *L*, it is not possible to increase the number of routes passing though this point. Finally, table 9 shows the costs of Alternative A according to table 2, from where it is possible to observe that the overall cost of Alternative A is 294.70 M€, with an average cost of 39.29 M€/km.

6.2. Alternative B

Fig. 7 presents the layout of Alternative B. As observed in this figure, the signalling layout coincides with the one

TABELLA 8 – TABLE 8

Risultati dello Scenario A  
*Results of Alternative A*

Parametro <i>Parameter</i>	Nodo L <i>Node L</i>	Nodo H <i>Node H</i>
<i>N</i>	24	24
<i>t<sub>m</sub></i> [s]	64,20	43,20
<i>R<sub>ij</sub></i> [s]	11,00	0,00
<i>U<sub>R</sub></i>	0,43	0,29
<i>U<sub>T</sub></i>	0,47	0,29



Costi complessivi - Scenario A  
Total costs - Alternative A

Voce di costo Type of work	Costo - Cost [M€]
Costruzione del corpo ferroviario e segnalamento Railroad and signalling construction	115,3
Costruzione di una nuova stazione Tor di Valle (Roma-Lido) Construction of the new Tor di Valle station (Roma-Lido)	10,5
Adeguamento di stazione Tor di Valle (Metro B) Adjustment of Tor di Valle station (Metro B)	3,9
Costruzione di una nuova stazione Muratella (Metro B) Construction of new Muratella station (Metro B)	75,0
Acquisto di 10 nuovi treni 10 new trains	80,0
Costruzione di sovrappasso pedonale Footbridge construction	2,0
Montaggio/smontaggio di TBM Assembly and disassembly of TBM	8,0
Totale Total	294,70

La frequenza e la distribuzione dei treni sui tronchi della Metro B durante il periodo di punta coincideranno con quanto previsto per lo Scenario A, perciò anche lo Scenario B richiederà l'acquisto di 10 nuovi treni. La tabella 10 rappresenta la matrice degli itinerari (C) dello Scenario B.

Gli itinerari in fig. 7 permettono di considerare come indipendenti i nodi L e H. L'analisi di trasporto dello Sce-

TABELLA 9 – TABLE 9

presented for Alternative A. This solution implies the construction of 12,500 m of an underground new track. The EUR Magliana-Tor di Valle track would be provided with 23 block sections that are 300 m long. The Tor di Valle station of the Roma-Lido line would get adapted to permit the interchange between lines. Besides, the Tor di Valle-Muratella track would be provided with 24 block sections 300 m long.

The frequency and their allocation between branches through the Magliana station during peak periods are the same presented for Alternative A. Therefore, the proposed alternative requires the purchase of 10 new trains. Table 10 lists the routes matrix (matrix C) of this solution. The routes in fig. 7 permit to consider independently node L and node H. Therefore, the analysis of Alternative B is again reduced to the

analysis of nodes L and H and their corresponding routes, i.e. a-e and c-e, and f-d and f-b. Table 11 shows the interdiction time matrix, in which the data is expressed in seconds.

The procedure exposed for Alternative A has been used to complete the study of Alternative B. The results of the analysis conducted on those two nodes under Alternative B are summarized in table 12.

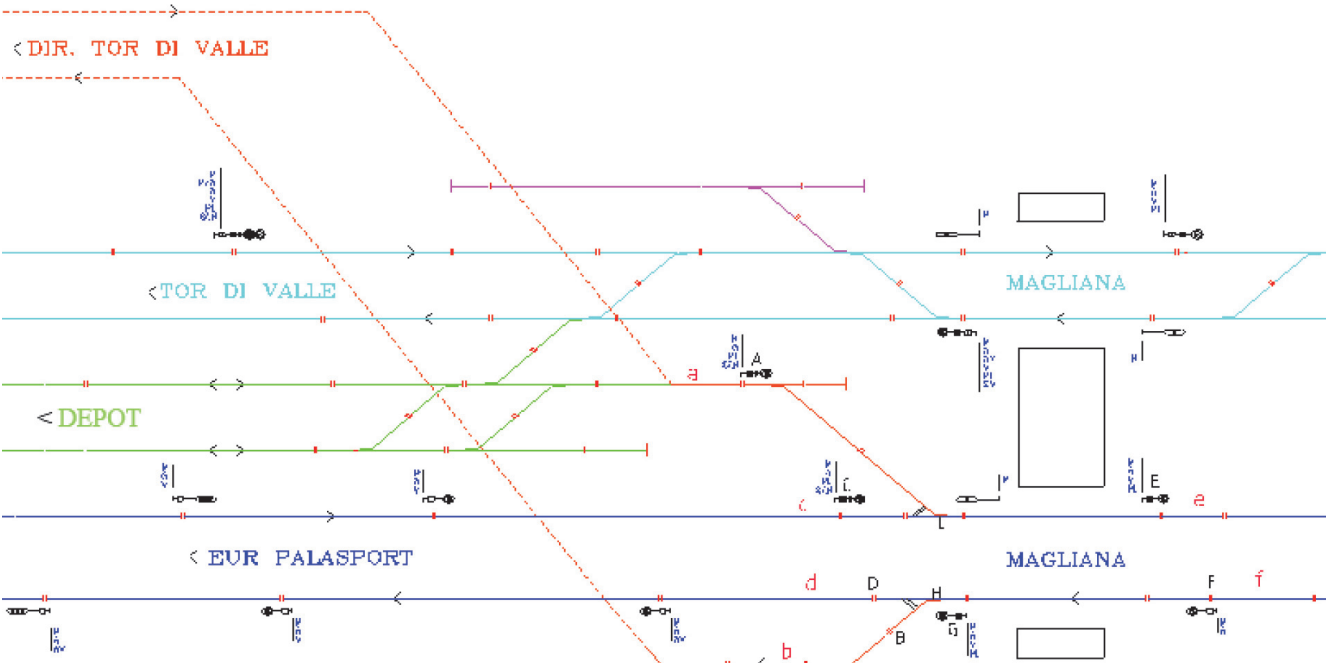


Fig. 7 - Schema topologico - Scenario B.  
Fig. 7 - Topological scheme - Alternative B.

nario B si riduce pertanto all'analisi dei nodi *L* e *H* e dei relativi itinerari, ovvero *a-e* e *c-e*, e *f-b* e *f-d*. La tabella 11 riporta gli elementi  $t_{ij}$  della matrice *I* espressi in secondi. I risultati dell'analisi condotta sui due nodi nello Scenario B sono riportati in tabella 12.

Il metodo di calcolo esposto per lo Scenario A è stato impiegato nello studio dello Scenario B. I risultati sono riportati in tabella 12.

I risultati presentati in tabella 12 dimostrano che, per un periodo di riferimento *T* pari a 60 minuti, il numero

TABELLA 10 – TABLE 10

Matrice degli itinerari *C* - Scenario B  
*Routes matrix C - Alternative B*

	<i>a-e</i>	<i>c-e</i>	<i>f-d</i>	<i>f-b</i>
<i>a-e</i>	$\alpha$	$\zeta$	$\gamma$	$\gamma$
<i>c-e</i>		$\alpha$	$\gamma$	$\gamma$
<i>f-d</i>			$\alpha$	$\sigma$
<i>f-b</i>				$\alpha$

TABELLA 11 – TABLE 11

Matrice dei tempi di interdizione *I* dei nodi *L* e *H* - Scenario B [s]  
*Interdiction time matrix I of nodes L and H - Alternative B [s]*

Nodo L - Node L			Nodo H - Node H		
	<i>a-e</i>	<i>c-e</i>		<i>f-d</i>	<i>f-b</i>
<i>a-e</i>	67	67	<i>f-d</i>	57	57
<i>c-e</i>	59	59	<i>f-b</i>	64	61

TABELLA 12 – TABLE 12

Risultati dello Scenario B  
*Results of Alternative B*

Parametro <i>Parameter</i>	Nodo L <i>Node L</i>	Nodo H <i>Node H</i>
<i>N</i>	24	24
$t_m$ [s]	61,80	58,80
$R_{ij}$ [s]	9,00	0,00
$U_R$	0,41	0,39
$U_T$	0,45	0,39

complessivo di treni *N* è 24 per entrambi i nodi,  $t_m$  è 61,8 s per il nodo *L* e 58,8 s per il nodo *H*. Il ritardo medio  $R_{ij}$  è 9 s per il nodo *L*, mentre è 0 s per il nodo *H* poiché le incompatibilità non producono ritardo. I coefficienti  $U_R$  ottenuti per i nodi *L* e *H* sono rispettivamente 0,41 e 0,39, mentre  $U_T$  sono rispettivamente 0,45 e 0,39. Il nodo *L* è utilizzato per il 45% della sua capacità e, in analogia a quanto concluso per lo Scenario A, è difficile incrementare tale valore a causa segnalamento, la lunghezza delle sezioni di blocco e la sicurezza della circolazione. Dal momento che il nodo *H* ha solo interdizioni di tipo “ $\alpha$ ” e “ $\sigma$ ”, non ci sono ritardi: ciò giustifica il fatto che sia  $U_R$  sia  $U_T$  abbiano lo stesso valore (39%). Come osservato per il nodo *L*, non è possibile incrementare il numero di circolazioni nel nodo *H*.

As observed in table 12, for a reference time *T* equal to 60 minutes, the total number of routes *N* is 24 for both nodes,  $t_m$  is 61.8 s for node *L* and 58.8 s for node *H*. The average value of  $R_{ij}$  is 9 s for node *L* and 0 s for node *H*, due to the fact that its incompatibilities do not cause waiting time.  $U_R$  of nodes *L* and *H* are 0.41 and 0.39 respectively as well as  $U_T$  is 0.45 and 0.39 respectively.

The node *L* is used at 45% of its capacity and, similarly to what was concluded for Alternative A, it is difficult to increase this value due to signalling, length of block sections and the safety of the system.

Since node *H*, only has “ $\alpha$ ” and “ $\sigma$ ” interdctions, there is not related waiting time; this justifies that both  $U_R$  and  $U_T$  have the same values (i.e. 39%) but, similarly to what was observed for node *L*, it is not possible to increase the number of routes through it.

Table 13 lists costs of Alternative B according to table 2, from where it is concluded that the overall cost of Alternative B is 491.40 M€, with an average cost of 39.31 M€/km.

TABELLA 13 – TABLE 13

Costi complessivi - Scenario B  
*Total costs - Alternative B*

Voce di costo <i>Type of work</i>	Costo - Cost [M€]
Costruzione del corpo ferroviario e segnalamento <i>Railroad and signalling construction</i>	247,5
Adeguamento di stazione Tor di Valle (Roma-Lido) <i>Adjustment of Tor di Valle station (Roma-Lido)</i>	3,9
Costruzione di una nuova stazione Tor di Valle (Metro B) <i>Construction of the new Tor di Valle station (Line B)</i>	75,0
Costruzione di una nuova stazione Muratella (Metro B) <i>Construction of new Muratella station (Line B)</i>	75,0
Acquisto di 10 nuovi treni <i>10 new trains</i>	80,0
Costruzione di sovrappasso pedonale <i>Footbridge construction</i>	2,0
Montaggio/smontaggio di TBM <i>Assembly and disassembly of TBM</i>	8,0
Totale <i>Total</i>	491,4

La tabella 13 riporta i costi dello Scenario B desunti dalla tabella 2: il costo complessivo dello Scenario B è 491,40 M€, con un costo medio di 39,31 M€/km.

### 6.3. Scenario C

La fig. 8 presenta il layout complessivo dello Scenario C. Questo prevede la costruzione di 6.000 m di tracciato in sotterraneo. Il tracciato compreso tra EUR Magliana e Tor di Valle sarà provvisto di 24 sezioni di blocco lunghe 300 m. La stazione di Tor di Valle della Roma-Lido sarà adeguata alle nuove esigenze di trasporto, mentre il tronco Tor di Valle-Muratella sarà provvisto di 24 sezioni di blocco lunghe 300 m, come nello Scenario B.

Si assume che nel periodo di picco transiti un treno ogni 140 s attraverso la stazione EUR Magliana della Metro B; si prevede in questo caso un treno da e per Laurentina ogni 210 s. Viste le ipotesi, la linea garantirà una capacità di 20.604 passeggeri/h; lungo la linea Roma-Lido, i treni avranno cadenza ogni 420 s e medesima frequenza avranno i convogli della Metro B che da Magliana saranno diretti a Muratella e viceversa, potendo così soddisfare una domanda di 9.696 pass/h. Nella stazione Tor di Valle si avranno perciò arrivi ogni 210 s. Le frequenze ipotizzate richiedono l'acquisto di 10 treni.

Le tabelle 14 e 15 rappresentano rispettivamente le matrici degli itinerari e dei tempi di interdizione dello Scenario C.

I risultati dell'analisi trasportistica svolta per lo Sce-

### 6.3. Alternative C

Fig. 8 presents the overall layout of Alternative C. This alternative includes the construction of 6,000 m of an underground new track. Moreover, the track Magliana-Tor di Valle requires 24 block sections 300 m long. Tor di Valle station of the Roma-Lido line would be adapted for new conditions and Tor di Valle-Muratella track would be provided with 24 block sections 300 m long, like for Alternative B.

It is assumed again a train every 140 s during peak periods through EUR Magliana station of Metro B and, in this case, a headway from and to Laurentina terminus of 210 s. On this basis, the line is assumed to have a capacity of 20,604 passengers/h. For the Roma-Lido line, it is assumed a train every 420 s, equal to the headway of Metro B from and to Muratella: this branch of Metro B will ensure a capacity of 9,696 passengers/h. Therefore, trains pass every 210 s through the Tor di Valle station. The assumed frequencies require purchasing 10 new trains.

Table 14 and 15 show respectively the routes and interdiction time matrices of Alternative C.

The procedure exposed for Alternative A has been used to complete the study: the results of the analysis conducted on those two nodes under Alternative C are summarized in table 16. In this table, it is possible to observe that, for a reference time  $T$  equal to 60 minutes,  $N$  is 96, and  $t_m$  is 55.8 s. The coefficient  $U_R$  is 0.54, while  $U_T$  is 0.62.

These results are very relevant since they suggest that the node capacity is approaching to saturation and, simi-

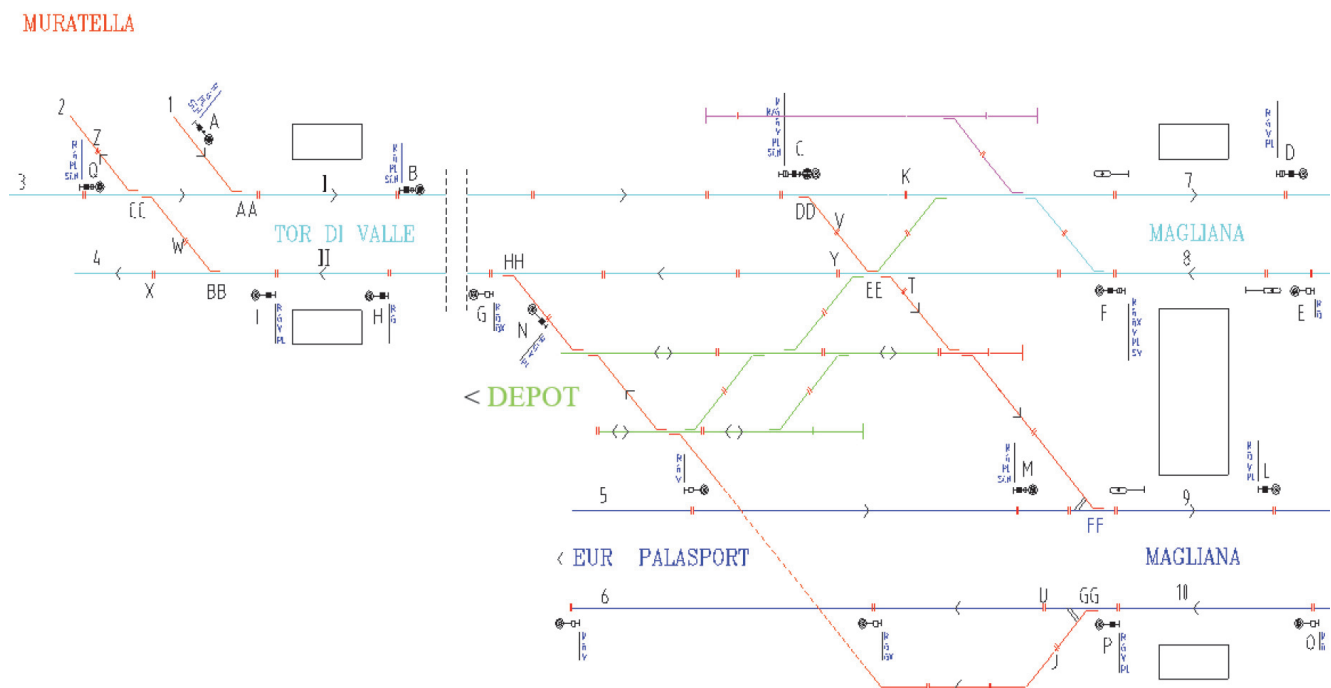


Fig. 8 - Schema topologico - Scenario C.  
Fig. 8 - Topological scheme - Alternative C.



TABELLA 14 – TABLE 14

Matrice degli itinerari - Scenario C  
Routes matrix - Alternative C

	I-I	3-I	II-2	II-4	8-II	10-II	I-7	I-9	5-9	10-6
I-I	$\alpha$	$\zeta$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$			$\gamma$	$\gamma$
3-I		$\alpha$	$\chi$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$			$\gamma$	$\gamma$
II-2			$\alpha$	$\sigma$			$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$
II-4				$\alpha$			$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$
8-II					$\alpha$	$\zeta$	$\gamma$		$\gamma$	$\gamma$
10-II						$\alpha$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	
I-7							$\alpha$	$\sigma$	$\gamma$	$\gamma$
I-9								$\alpha$	$\zeta$	$\gamma$
5-9									$\alpha$	$\gamma$
10-6										$\alpha$

TABELLA 15 – TABLE 15

Matrice dei tempi di interdizione - Scenario C [s]  
Interdiction time matrix - Alternative C [s]

	I-I	3-I	II-2	II-4	8-II	10-II	I-7	I-9	5-9	10-6
I-I	59	59					59	59		
3-I	58	58	20				58	58		
II-2		69	60	65	60	60				
II-4			59	57	57	57				
8-II			59	59	58	32		27		
10-II			59	59	12	61				64
I-7	58	58					58	7		
I-9	58	58			38		19	58	98	
5-9								59	59	
10-6						57				57

nario C, ottenuti in modo analogo a quanto fatto per gli Scenari A e B, sono riportati in tabella 16. Per un periodo di riferimento  $T$  pari a 60 minuti,  $N$  è 96, e  $t_m$  è 55,8 s. Il coefficiente  $U_R$  è 0,54, mentre  $U_T$  è 0,62. I risultati evidenziano che la capacità del nodo è prossima alla saturazione e, come per gli Scenari A e B, è difficile incrementare il numero di circolazioni nel sistema.

La tabella 17 riporta i costi dello Scenario C calcolati secondo quanto riportato in tabella 2: il costo complessivo dello Scenario C è 298,20 M€, con un costo medio di 49,70 M€/km.

6.4. Scenario D

Lo Scenario D è il meno impattante dei quattro proposti, perché non prevede la costruzione di nuovi tracciati ferroviari. Questo prevede l'ammodernamento del sistema di segnalamento lungo l'intera linea Roma-Lido, com-

lari to alternatives A and B, it is difficult to increase the number of routes in the system.

Table 17 lists the costs calculated for this alternative using the data presented in table 2. These results show that the overall cost of Alternative C is 298.20 M€, with an average cost of 49.70 M€/km.

6.4. Alternative D

Alternative D is the less impacting, since it does not provide the construction of any new branch. However, it does consider the consequences of the rehabilitation of existing signalling along all 56 km of Roma-Lido line. In this case, the new block sections are assumed to be 350 m long (instead of 890 m which is the current mean value), as represented in fig. 9.

As regard as the railway rolling stock and signal system considered in the study, the interdiction time  $t_m$  of each block section, i.e. the time required to have two free block sections between two consecutive trains, is 72 seconds. During the peak periods, it is assumed that trains pass every 300 s. Therefore 12 trains/hour/direction are expected. The assumed frequencies require purchasing 17 new trains. Table 18 shows the results of the analysis for a reference time  $T$  of 60 minutes.

In this case, the values of both  $U_T$  and  $U_R$  of Roma-Lido are 0.24. The two values are the same because there are

no conflicts and corresponding waiting time due to the configuration of the system.

Table 19 lists the costs calculated for Alternative D that shows that the overall cost of this alternative is 210.80 M€, with an average cost of 3.76 M€/km.

TABELLA 16 – TABLE 16

Risultati dello Scenario C  
Results of Alternative C

Parametro Parameter	Valore Value
$N$	96
$t_m$ [s]	55,80
$R_{ij}$ [s]	5,00
$U_R$	0,54
$U_T$	0,62

plessivamente lunga 56 km. Nel presente studio, si assume che le nuove sezioni di blocco siano lunghe 350 m (invece di 890 m, valore medio attuale), come illustrato in fig. 9.

Visti il materiale rotabile e il sistema di segnalamento considerati nello studio, il tempo di interdizione  $t_m$  di ciascuna sezione di blocco, ovvero il tempo necessario per avere due sezioni di blocco libere tra due treni, è pari a 72 secondi. Si assume che nel periodo di punta transiti un treno ogni 300 s, perciò sono attesi 12 treni/h in ciascuna direzione. Le frequenze ipotizzate richiedono l'acquisto di 17 treni. La tabella 18 riporta i risultati dell'analisi, riferiti a un tempo  $T$  pari a 60 minuti.

In questo caso, sia  $U_T$  sia  $U_R$  sono 0,24: coincidono perché non sussistono conflitti e dunque ritardi nel sistema configurato.

La tabella 19 riporta i costi di realizzazione dello Scenario D: il costo complessivo dello Scenario C è 210,80 M€, con un costo medio di 3,76 M€/km.

7. Confronto dei risultati ottenuti

I risultati dello studio trasportistico condotto secondo il metodo di Potthoff sono riportati in tabella 20.

Considerando un tempo di riferimento pari a 60 minuti, lo Scenario D garantisce le maggiori possibilità di miglioramento del servizio poiché ha il valore  $U_T$  (24%) più basso rispetto a quello degli altri scenari: Scenario A (47% per il nodo L), Scenario B (45% per il nodo L) e Scenario C (62%). Risultati simili sono stati ottenuti nel calcolo di  $U_R$ : lo Scenario D ha il valore minore e perciò la migliore prestazione, soprattutto in termini di margini

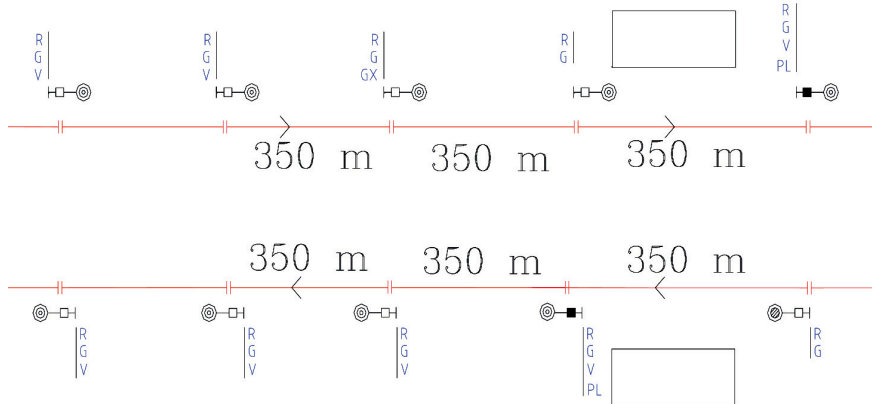


Fig. 9 - Sezioni di blocco - Scenario D.  
Fig. 9 - Block sections - Alternative D.

TABELLA 17 – TABLE 17

Costi complessivi - Scenario C  
Costs - Alternative C

Voce di costo Type of work	Costo - Cost [M€]
Costruzione del corpo ferroviario e segnalamento Railroad and signalling construction	118,8
Adeguamento di stazione Tor di Valle (Roma-Lido) Adjustment of Tor di Valle station (Roma-lido)	3,9
Costruzione di una nuova stazione Tor di Valle (Metro B) Construction of new Tor di Valle station (Line B)	10,5
Costruzione di una nuova stazione Muratella (Metro B) Construction of new Muratella station (Line B)	145,0
Acquisto di 10 nuovi treni 10 new trains	80,0
Costruzione di sovrappasso pedonale Foot bridge	2,0
Montaggio/smontaggio di TBM Assembly and disassembly of TBM	8,0
Totale Total	298,2

TABELLA 18 – TABLE 18

Risultati dello Scenario D  
Results of Alternative D

Parametro Parameter	Scenario D (per direzione) Alternative D (each direction)
$N$	12
$U_R$	0,24
$U_T$	0,24

7. Comparison of results among alternatives

The results of the transportation analyses conducted using the Potthoff method are listed in table 20.

Considering a reference time  $T$  equal to 60 minutes, it is possible to identify that Alternative D provides the best possibility for enhancing the service because it has the lowest  $U_T$  (equal to 24%) respect to the results of Alternative A (47% for node L), Alternative B (45% for node L) and Alternative C (62%). Similar results have been obtained in the calculation of  $U_R$ : Alternative D has the lowest value and therefore the best result, particularly in terms of capacity margins for further increase of traffic due to the combination of soccer matches flows and mobility due to different motivations.

The results of economic analysis, carried out according to current Italian costs for rail and underground line

di capacità in caso di incremento del traffico generato dagli eventi sportivi e domanda di mobilità generata da altre esigenze.

I risultati dell'analisi economica, condotta secondo prezzi correnti in Italia per la costruzione di ferrovie e metropolitane, sono riportati in tabella 21. Come prevedibile, lo Scenario D risulta il meno costoso, con un costo totale stimato pari a 210,80 M€: il risultato è giustificato dall'assenza di costruzione di nuove infrastrutture ferroviarie. Lo Scenario D implica infatti solo l'ammodernamento della linea esistente Roma-Lido, l'acquisto di 17 treni, per assicurare il livello di servizio atteso, e la costruzione di un sovrappasso pedonale per gli spettatori diretti allo stadio. L'alternativa più costosa è rappresentata dallo Scenario B, sebbene non abbia il più alto costo per chilometro, seguita dagli Scenari C e A. La differenza di costi tra le alternative è importante: lo Scenario B implica un investimento complessivo che è più del doppio di quello richiesto dallo Scenario D. Le differenze di costo per chilometro confermano la validità dello Scenario D, che richiede il minore investimento per chilometro.

Come conclusione generale, le analisi economiche e di trasporto suggeriscono che l'ammodernamento della linea esistente Roma-Lido garantisce la soluzione migliore per raggiungere gli obiettivi preposti. Inoltre, questa soluzione migliorerebbe il servizio di trasporto pubblico della linea Roma-Lido, pur non offrendo uno scambio diretto con la linea FR1 in Muratella.

8. Conclusioni

Lo studio ha esaminato alternative di trasporto pubblico su ferro per soddisfare la domanda di traffico generato dalla costruzione del nuovo stadio della squadra di calcio A.S. Roma.

TABELLA 19 – TABLE 19

Costi complessivi - Scenario D  
Costs - Alternative D

Voce di costo Works	Costo – Cost (M€)
Adeguamento segnalamento Signalling adjustment	72,8
Costruzione di sovrappasso pedonale Footbridge construction	2,0
Acquisto di 17 nuovi treni Purchasing of 17 new trains	136,0
Totale Total	210,8

TABELLA 20 – TABLE 20

Sintesi dell'analisi trasportistica (periodo di riferimento  $T = 60$  s)  
Synthesis of transport analysis (reference time  $T = 60$  s)

Scenario Alternative		$N$	$t_m$ [s]	$R_{ij}$ (s)	$U_R$	$U_T$
Scenario A Alternative A	Nodo L Node L	24	64,2	11	0,43	0,47
	Nodo H Node H	24	43,2	0	0,29	0,29
Scenario B Alternative B	Nodo L Node L	24	61,8	9	0,41	0,45
	Nodo H Node H	24	58,8	0	0,39	0,39
Scenario C - Alternative C		96	55,8	5	0,54	0,62
Scenario D - Alternative D		12	72	0	0,24	0,24

TABELLA 21 – TABLE 21

Sintesi dell'analisi economica  
Synthesis of economic analysis

Scenario Alternative	Costo unitario Unit cost [M€/km]	Costo totale Total cost [M€]
A	39,29	294,7
B	39,31	491,4
C	49,70	298,2
D	3,76	210,8

construction, are listed in table 21. As expected, Alternative D is the less expensive, with a total cost of 210.80 M€, since this Alternative does not include the construction of new railway infrastructure, but just the rehabilitation of existing Roma-Lido line and the purchase of 17 trains, to ensure the designed level of service, and the construction of a footbridge for the stadium spectators. The most expensive alternative is Alternative B, though with a lower unit cost, followed by alternatives C and A. The differences of cost among the alternatives are relevant: Alternative B requires an overall investment which is more than twice the cheapest one. The differences of unit costs per km confirm the validity of Alternative D, which has the lowest unit cost.

As a general conclusion, the transport and economic analyses suggest that the modernization of the existing Roma-Lido line could provide the best solution to achieve the proposed objectives. Moreover, this solution would ensure an improvement of the public transport service Roma-Lido, though is not creating a further integration with FR1 line in Muratella.

8. Conclusions

This paper examined different alternatives of mass transit systems to satisfy the demand generated by the new stadium of A.S. Roma soccer team.



Tre alternative (Scenari A, B, e C) prevedono la modifica della rete ferroviaria e metropolitana esistente con la costruzione di nuovi tracciati, stazioni e l'ammodernamento delle stazioni esistenti coinvolte. La quarta soluzione proposta (Scenario D) prevede la trasformazione della linea ferroviaria urbana Roma-Lido in una metropolitana, soprattutto attraverso l'ammodernamento del sistema di segnalamento.

Il metodo implementato per l'analisi della capacità ha consentito il calcolo dei coefficienti di utilizzazione regolare e totale dei nodi come parametri per valutare la futura capacità di trasporto della linea e il tasso di utilizzazione della rete.

I risultati ottenuti dimostrano che lo Scenario D è comparativamente l'alternativa migliore: ha il tasso di utilizzazione pari al 24%, tale da assicurare ulteriori possibilità di miglioramento e potenziamento del servizio. I risultati dell'analisi economica sono concordi con quelli dell'analisi trasportistica: lo Scenario D implica un investimento di circa 211 M€, mentre le altre alternative richiedono investimenti compresi tra 295 e 491 M€.

*Three solutions (Alternatives A, B, and C) imply modification of the current railway and metro system with the construction of new tracks, new stations, and the rehabilitation of the existing involved stations. The fourth solution (Alternative D) implies the transformation of the Roma-Lido line into a metro, mainly by the modernization of the current signalling.*

*The method implemented for the capacity analysis was used to calculate approximately the coefficients of regular and total utilization of nodes as parameters for estimating the future carrying capacity and utilisation rate of the network.*

*The obtained results show that Alternative D is the best option comparatively to the examined alternatives: 24% of utilisation rate, which ensures the further possibility to increase the train frequency and face potential traffic perturbations. The results of the economic assessment are compliant with the track capacity analysis: Alternative D requires just about 211 M€, while the others require an investment which ranges between 295 and 491 M€.*

## BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] ALEI A. (2012), "Metropolitana di Roma - Linea C: confronto dei costi di costruzione con altre realizzazioni in Italia e all'estero".
- [2] ATAC (2016), "Metro, ferrovie metropolitane e tram".
- [3] BAMBERG S., FUJII S., FRIMAN M., GÄRLING T. (2011), "Behaviour Theory and Soft Transport Policy Measures", Transport Policy 18 (1).
- [4] Bombardier (2016), <http://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/rail-control-solutions/mass-transit-solutions/cityflo-650.html>.
- [5] CANTISANI G., LOPRENCIPE G., PRIMIERI F. (2011), "The integrated design of urban road intersections: a case study", The International Conference on Sustainable Design and Construction.
- [6] CHAPIN T. (2000), "The political economy of sports facility location: an end-of-the-century review and assessment", Marquette Sports Law Review 10.
- [7] Comune di Torino (2007), "Elenco Prezzi Città di Torino 2007 – Impianti tramviari".
- [8] CORAZZA G.R., MUSSO A. (1987), "Gli impianti di stazione e la loro analisi topologica", Ingegneria Ferroviaria, vol. 11.
- [9] CORAZZA G.R., MUSSO A. (1991), "La circolazione ferroviaria e gli impianti di stazione", Ingegneria Ferroviaria, vol. 7-8.
- [10] CURCURUTO S., ATZORI D., BETTI R., MARSICO G., MAZZOCCHI E., MONACO E., AMOROSO F., LIMONE V., LOPRENCIPE G., DE FELICE F. (2012), "Propagation of vibration induced on track: Implementation of previsional models for low and high speed trains and comparison with experimental measurements", 19th International Congress on Sound and Vibration 2012, ICSV 2012 (Vol. 4, pp. 3033-3040).
- [11] DE ANGELIS L., MALAVASI G., RICCI S. (2003), "An integrated methodology for the analysis of a terminal station", 19th International Conference on Traffic and Transportation Sciences.
- [12] DI MASCIÒ P., LOPRENCIPE G., MORETTI L. (2014a), "Competition in rail transport: methodology to evaluate economic impact of new trains on track", ICTI2014 - Sustainability, Eco-efficiency and Conservation in Transportation Infrastructure Asset Management. Taylor & Francis Group.

- [13] DI MASCIÒ P., LOPRENCIPE G., MAGGIONI (2014b), *“Modellazione del comportamento visco-elastico degli strati della sede ferroviaria”*, Ingegneria Ferroviaria, vol. 3.
- [14] International Energy Agency (2014), *“CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion – Highlights”*, International Energy Agency, Paris, France
- [15] MALAVASI G., MOLKOVA T., RICCI S., ROTOLI F. (2014), *“A synthetic approach to the evaluation of the carrying capacity of complex railway nodes”*, Journal of Rail Transport Planning & Management. Doi: 10.1016/j.jrtpm.2014.06.001
- [16] MICCOLI S., FINUCCI F., MURRO R. (2014), *“Assessing Project Quality: A Multidimensional Approach”*, Advanced Materials Research Vols. 1030-1032, pp 2519-2522, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1030-1032.2519, ISSN: 1662-8985.
- [17] MICCOLI S., FINUCCI F., MURRO R. (2015a), *“A Direct Deliberative Evaluation Procedure to Choose a Project for Via Giulia in Rome”*, Pollack Periodica An International Journal for Engineering and Information Sciences, Vol. 10, No. 1, pp. 143–153. doi:10.1556/Pollack.10.2015.1.14.
- [18] MICCOLI S., FINUCCI F., MURRO R. (2015b), *“Measuring Shared Social Appreciation of Community Goods: An Experiment for the East Elevated Expressway of Rome”*, Sustainability 2015, 7(11), 15194-15218; doi:10.3390/su71115194.
- [19] POTTHOFF G. (1965), *“Verkehrsströmungslehre. Transpress 1”*, Transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, Berlin.
- [20] Provincia di Roma (2011), *“Piano Regionale dei trasporti passeggeri per l'area metropolitana di Roma”*.
- [21] RICCI S. (2011), *“Tecnica ed economia dei trasporti”*, Hoepli, Milano.
- [22] World Health Organization (2004), *“World Report on Road Traffic Injury Prevention”*, Geneva: World Health Organization.
- [23] ZELLER L. (2015), *“Potential changes in transportation patterns of New York Islanders fans due to stadium relocation”*, Transportation, 42. DOI 10.1007/s11116-015-9652-8.
- [24] ZOCCALI P., CANTISANI G., LOPRENCIPE G. (2015), *“Ground-vibrations induced by trains: filled trenches mitigation capacity and length influence”*, Construction and Building Materials, 74, 1-8.

## **IL SEGNALAMENTO DI MANOVRA NELLA IMPIANTISTICA FS STANDARD FUNZIONALI E APPLICAZIONE CONVENZIONALE**

Con questo volume il CIFI intende colmare la lacuna relativa alla mancanza nella letteratura di testi sul segnalamento di manovra, spesso considerato complementare al segnalamento “alto” pur non essendo meno importante.

Questo primo volume sugli apparati convenzionali, insieme al secondo in preparazione sugli apparati statici, è indirizzato ai progettisti del segnalamento e ai cultori di impianti ferroviari che vi troveranno una completa “biblioteca” storica e tecnica in materia, per il numero e l'eshaustività degli argomenti trattati.

Contenuti del libro: standard del segnalamento di manovra; la logica circuitale; piani schematici di riferimento; tabelle delle condizioni; circuiti elettrici; condizioni operative.

296 pagine in formato A4, ricco di schemi e circuiti. Prezzo di copertina € 30,00. Per sconti, spese di spedizione e modalità di acquisto consultare la pagina “Elenco di tutte le pubblicazioni CIFI” sempre presente nella Rivista.

