



Metodologie analitiche e approcci simulativi per la determinazione della capacità della linea “Direttissima” Roma-Firenze

Analytical methods and simulation approaches for determining the capacity of the Rome-Florence “Direttissima” line

Francesco Paolo PRENCIPE^(*)
Marco PETRELLI^(*)

Sommario - Nel presente articolo vengono affrontate e confrontate fra di loro diverse metodologie analitiche per la determinazione della capacità pratica oraria di una linea ferroviaria ad alta velocità. Inoltre, per la valutazione del consumo di capacità basata sul metodo UIC 406 e sulla simulazione della circolazione ferroviaria, sono sfruttate le funzionalità offerte dal software di simulazione ferroviaria OpenTrack©.

Il caso di studio riguarda la linea ad alta velocità “Direttissima” Roma-Firenze, primo esempio di infrastruttura ferroviaria ad alta velocità a livello europeo e raro esempio di utilizzo promiscuo con la circolazione di differenti categorie di treni. Ciò contraddistingue tale linea rispetto alle più moderne linee ad alta velocità italiane ed interconnesse ad essa.

1. Introduzione

Al giorno d’oggi si sta assistendo ad un incremento sempre più forte di domanda di traffico ferroviario in Italia. Diventa importante per il gestore della rete ferroviaria conoscere i limiti delle proprie infrastrutture al fine di stabilire la quota di treni che possono circolare sulle linee e fornire risposte alle richieste da parte delle imprese ferroviarie operanti sulla possibilità di inserire ulteriori servizi al fine di soddisfare la domanda di trasporto passeggeri.

Questo aspetto è noto come capacità di circolazione (o potenzialità) di una linea ferroviaria e rappresenta il cuore centrale di un’attenta pianificazione e gestione del trasporto ferroviario.

Obiettivo del presente articolo è, quindi, la stima della capacità di circolazione facendo ricorso a differenti metodologie consolidate per valutarne l’efficacia e la robu-

Summary - In this paper, different analytical methods for the determination of the hourly practical capacity of a high speed railway line are addressed and compared. Furthermore, for the assessment of capacity consumption based on the UIC 406 method and on the simulation of rail traffic, the features offered by the OpenTrack© railway simulation software are exploited.

The case study concerns the Rome-Florence “Direttissima” high speed railway line, the first example of high speed railway infrastructure in Europe and a rare example of mixed use with the circulation of different categories of trains. Such characteristics distinguish this line compared to the more modern Italian high speed lines interconnected with it.

1. Introduction

Nowadays there is an ever-increasing demand for rail traffic in Italy. It becomes important for the railway network operator to know the limits of its infrastructures in order to establish the share of trains that can circulate on the lines and provide answers to requests from operating railway companies on the possibility of introducing additional services in order to meet the passenger transport demand.

This aspect is known as carrying capacity of a railway line and represents the central core of careful planning and management of rail transport.

The aim of this article is therefore to estimate the carrying capacity using different consolidated methodologies to evaluate its effectiveness and robustness in relation to a real study case of significant complexity and addressed to a lesser extent such as a high speed line.

^(*) Università degli Studi Roma Tre, Dipartimento di Ingegneria.

^(*) University of Roma Tre, Department of Engineering.

stezza in relazione ad un caso di studio reale di rilevante complessità e affrontato in misura minore quale una linea ad alta velocità.

In particolare, il caso di studio riguarda la linea “Direttissima” Roma-Firenze. Essa rappresenta il fulcro del sistema nazionale italiano ad alta velocità connettendo le più moderne linee ad alta velocità a nord di Firenze e a sud di Roma. Il presente articolo si propone di indagarne la potenzialità di traffico e il consumo di capacità alle attuali condizioni di circolazione del traffico. Tale caso risulta particolarmente interessante in quanto tale linea, nonostante sia di datata concezione, è caratterizzata da una circolazione eterotachica con predominanza di treni passeggeri ad alta velocità e, su tratte parziali, di treni intercitty e regionali.

In tale contesto, come la capacità ferroviaria sia determinata e come venga utilizzata diventa una questione fondamentale per poter soddisfare i principi di sicurezza, regolarità e continuità del servizio di trasporto ferroviario.

Nell'ambiente ferroviario è comune operare una prima distinzione fra capacità teorica (*theoretical capacity*) e capacità pratica (*practical capacity*).

La capacità teorica di una linea è il numero di treni che possono circolare su una linea in uno specifico intervallo di tempo ipotizzando valori di distanziamento minimi tra i treni e assenza di perturbazioni. Essa rappresenta il limite superiore in quanto descrive le condizioni ideali di esercizio, ignorando effetti provocati da eventuali imprevisti o disturbi che avvengono nella realtà.

La capacità pratica è il limite effettivo del volume di traffico che può essere gestito su una linea o in un nodo a determinati livelli di regolarità riflettendo la reale composizione eterogenea del traffico.

Nella letteratura sul campo ferroviario sono presenti diverse metodologie empiriche o analitiche per la valutazione della potenzialità di linee ferroviarie e della capacità dei nodi, rappresentati dalle stazioni principali [1], [2], [3].

Si sottolinea come l'analisi viene condotta in maniera separata per le linee e per le stazioni, in quanto non è possibile determinare un valore unico per l'intera rete: la complessità e la diversità delle parti che compongono la rete, quali linee e stazioni, è tale da richiedere la definizione di un valore di capacità distinto per ognuna di esse.

I metodi per il calcolo della potenzialità di una linea ferroviaria possono essere raggruppati in tre categorie:

- *metodi analitici*, designati per modellizzare il sistema ferroviario attraverso formule matematiche. La loro applicazione permette di ottenere valori di capacità teorica e determinare la capacità pratica come percentuale della capacità teorica o includendo margini di regolarità nel calcolo della capacità teorica. I metodi analitici, a loro volta, possono essere di tipo *statico*, come quello proposto da BONORA e GIULIANI nel 1982 [4] o quello adottato da RFI [5] che adotta formule di

In particular, the case study concerns the Rome-Florence “Direttissima” line. It is the hub of the Italian national high speed system connecting the most modern high speed lines north of Florence and south of Rome. This article aims to investigate the carrying capacity of traffic and capacity consumption at current traffic conditions. This case is particularly interesting because this line, despite its dated design, is characterised by a heterotachy circulation with a predominance of high speed passenger trains and of intercitty and regional trains, on partial sections.

In this context, how railway capacity is determined and how it is used becomes a fundamental issue in order to meet the principles of safety, regularity and continuity of the railway transport service.

In the railway environment it is common to make a first distinction between theoretical capacity and practical capacity.

The theoretical capacity of a line is the number of trains that can circulate on a line in a specific time interval assuming minimum distancing values between trains and the absence of disturbances. It represents the upper limit as it describes the ideal operating conditions, ignoring the effects caused by eventual unforeseen events or disturbances that occur in reality.

Practical capacity is the actual limit of the volume of traffic that can be managed on a line or in a node at certain levels of regularity, reflecting the actual heterogeneous composition of traffic.

In literature on railway there are various empirical or analytical methodologies for the evaluation of the carrying capacity of railway lines and the capacity of the nodes, represented by the main stations [1], [2], [3].

It is emphasised that the analysis is conducted separately for the lines and stations, as it is not possible to determine a single value for the entire network: the complexity and diversity of the parts that make up the network, such as lines and stations, is such as to require the definition of a different capacity value for each of them.

The methods for calculating the carrying capacity of a railway line can be grouped into three categories:

- *analytical methods, designed to model the railway system through mathematical formulas. Their application allows obtaining theoretical capacity values and determining the practical capacity as a percentage of the theoretical capacity or including regularity margins in the calculation of the theoretical capacity. The analytical methods, in turn, can be static, like the one proposed by BONORA and GIULIANI in 1982 [4] or the one adopted by RFI [5] that adopts deterministic formulas; probabilistic, like those proposed by the UIC in 1983 (UIC 405 calculation method [6]) and by SCHWANHÄUSSER (STRELE formula) [7], [8] that introduces parameters calculated with stochastic criteria and consider, in probabilistic terms, the occurrence of certain conditions of service;*

tipo deterministico; di tipo probabilistico, come quelli proposti dall'UIC nel 1983 (metodo di calcolo UIC 405 [6]) e da SCHWANHÄUSSER (formula di STRELE) [7], [8] che introducono parametri calcolati con criteri stocastici e considerano, in termini probabilistici, il verificarsi di determinate condizioni di servizio;

- *metodi di ottimizzazione*, designati per ricavare soluzioni migliori rispetto alle formule puramente analitiche. Un metodo di ottimizzazione è la compressione dell'orario, come quello proposto dall'UIC (metodo della compattazione UIC 406, 2013 [9]);
- *metodi di simulazione*, basati sull'utilizzo di software che rappresentano, dopo un'accurata fase di inserimento dei dati, il comportamento del sistema ferroviario in determinate condizioni sulla base di regole definite a priori.

L'articolo è strutturato in 10 paragrafi comprendendo anche l'introduzione. Le prime sezioni descrivono alcuni metodi analitici per la stima della capacità pratica oraria quali il metodo RFI, il metodo UIC 405 e il metodo basato sulla formula di STRELE. Successivamente, la questione viene analizzata dal punto di vista del consumo di capacità con l'illustrazione del metodo analitico-ottimizzazione basato sulla compattazione dell'orario come previsto dalla *fiche* UIC 406. I successivi due paragrafi sono invece utilizzati, rispettivamente, per la descrizione delle caratteristiche della linea ferroviaria oggetto di studio e per l'implementazione di tali dati nel software di simulazione ferroviaria OpenTrack© permettendo così di ottenere un'altra valutazione del consumo di capacità, basata sulla quota del tempo di occupazione complessivo rispetto all'intervallo temporale considerato.

Infine, gli ultimi tre paragrafi contengono l'analisi ed il confronto dei risultati derivanti dalle varie metodologie utilizzate evidenziando le criticità della linea ferroviaria in termini di congestione. Da un lato, le osservazioni sono relative alla capacità pratica, sulla base del dato concernente il numero di treni circolanti nell'ora di punta della mattina. Dall'altro lato, adoperando il metodo UIC 406 e il supporto della simulazione ferroviaria, sono comparate le valutazioni sul consumo di capacità, in particolare sul tempo di occupazione.

2. Il metodo di calcolo RFI

Si tratta di un metodo analitico di tipo statico, definito dal gestore dell'infrastruttura, Rete Ferroviaria Italiana (RFI) [5].

Esso si basa sulla ricerca di un primo valore di capacità teorica, successivamente ridotto opportunamente mediante un certo coefficiente in capacità commerciale per tener conto dell'eterotachicità della linea. L'unico dato in ingresso richiesto è il distanziamento temporale tra i treni.

La capacità teorica viene delineata come il numero massimo di tracce possibili basato su una rigida omota-

- *optimisation methods, designed to derive better solutions than purely analytical formulas. An optimisation method is time compression, like the one proposed by the UIC (compaction method UIC 406, 2013 [9]);*
- *simulation methods, based on the use of software that represent, after an accurate data entry phase, the behaviour of the railway system under certain conditions on the basis of rules defined a priori.*

The article is structured in 10 paragraphs including the introduction. The first sections describe some analytical methods for the estimate of hourly practical capacity such as the RFI method, the UIC 405 method and the method based on the STRELE formula. Subsequently, the matter is analysed from the point of view of capacity consumption with illustration of the analytical-optimisation method based on time compaction as foreseen by the fiche UIC 406. The following two paragraphs are instead used, respectively, to describe the characteristics of the railway line under study and for the implementation of such data in the OpenTrack© railway simulation software thus allowing to obtain another evaluation of capacity consumption, based on the share of the total occupancy time with respect to the time interval considered.

Finally, the last three paragraphs contain the analysis and comparison of the results deriving from the various methodologies used, highlighting the criticalities of the railway line in terms of congestion. On the one hand, the observations relate to practical capacity, on the basis of the data concerning the number of trains circulating in the morning rush hour. On the other hand, using the UIC 406 method and the support of railway simulation, evaluations on capacity consumption, in particular on the occupancy time, are compared.

2. The RFI calculation method

This is a static type analytical method, defined by the infrastructure manager, Rete Ferroviaria Italiana (RFI) [5].

It is based on the search for a first theoretical capacity value, subsequently appropriately reduced by means of a certain coefficient in commercial capacity in order to take into account the heterotachicity of the line. The only data required is the headway between the trains.

The theoretical capacity is outlined as the maximum number of possible train paths based on a rigid homotachy and a distance equal to that prescribed by the Technical Scenari⁽¹⁾. It is determined as:

$$C_{\text{daily theoretical}} = N \cdot \left(\frac{1320}{D_n}\right)$$

$$C_{\text{hourly theoretical}} = N \cdot \left(\frac{60}{D_n}\right)$$

where:

- *N = is the number of tracks;*

chia e distanziamento pari a quello prescritto dallo Scenario Tecnico⁽¹⁾. Viene determinata come:

$$C_{\text{teorica giornaliera}} = N \cdot \left(\frac{1320}{D_n} \right)$$

$$C_{\text{teorica oraria}} = N \cdot \left(\frac{60}{D_n} \right)$$

dove:

- N = è il numero di binari;
- D_n = è il tempo di distanziamento, espresso in minuti, in linea indicato come "normale" nello Scenario Tecnico.

La capacità commerciale dipende dalle caratteristiche dell'infrastruttura, dalla qualità desiderata e dalle esigenze del mercato e rappresenta la quantità massima delle tracce possibili con una struttura di offerta coerente con l'eterogeneità della domanda in termini di velocità commerciali e con distanziamento pari a quello prescritto dallo Scenario Tecnico⁽¹⁾:

$$C_{\text{commerciale giornaliera}} = \frac{C_{\text{teorica giornaliera}}}{K}$$

$$C_{\text{commerciale oraria}} = \frac{C_{\text{teorica oraria}}}{K_1}$$

dove:

- K = 1,2 in presenza di 1 livello significativo di velocità;
- K = 1,4-1,5 in presenza di 2-3 livelli di velocità;
- K = 1,8-1,9 in presenza di 4-5 livelli di velocità;
- $K_1 = 1$ in presenza di 1 livello significativo di velocità;
- $K_1 = 1,3$ in presenza di 2-3 livelli di velocità;
- $K_1 = 1,5$ in presenza di 4-5 livelli di velocità.

Non avendo a disposizione lo Scenario Tecnico della linea DD, il distanziamento in linea D_n può essere derivato dal tempo di occupazione della sezione di blocco rilevante considerandone, in prima approssimazione, il tempo percorso alla velocità di rango A [10].

Allo stesso risultato vi si può giungere considerando la specifica di distanziamento pari al tempo di bloccamento della sezione per il treno di riferimento, aggiunto al margine di regolarità [11].

Il valore, così ottenuto, può essere considerato affidabile, in prima approssimazione, per una valutazione preliminare della potenzialità di una linea ferroviaria. Tuttavia esso si basa su condizioni di esercizio ideali e abbastanza differenti dalle condizioni di esercizio reali. È di immediata individuazione e richiede solamente il distanziamento temporale, ricavabile dallo Scenario Tecnico, fra due treni della stessa categoria nell'ipotesi di esercizio

- D_n = is the distancing time, expressed in minutes, on line indicated as "normal" in the Technical Scenario.

The commercial capacity depends on the characteristics of the infrastructure, the desired quality and the needs of the market and represents the maximum quantity of possible train paths with a supply structure consistent with the heterogeneity of the demand in terms of commercial speed and with a distance equal to that prescribed by the Technical Scenario⁽¹⁾:

$$C_{\text{daily commercial}} = \frac{C_{\text{daily theoretical}}}{K}$$

$$C_{\text{hourly commercial}} = \frac{C_{\text{hourly theoretical}}}{K_1}$$

where:

- K = 1.2 in the presence of 1 significant level of speed;
- K = 1.4-1.5 in the presence of 2-3 levels of speed;
- K = 1.8-1.9 in the presence of 4-5 speed levels;
- $K_1 = 1$ in the presence of 1 significant level of speed;
- $K_1 = 1.3$ in the presence of 2-3 levels of speed;
- $K_1 = 1.5$ in the presence of 4-5 speed levels.

There not being the Technical Scenario of the DD line available, the distancing in the D_n line can be derived from the occupation time of the relevant block section considering, as a first approximation, its time travelled at the speed of rank A [10].

The same result can be achieved by considering the spacing specification equal to the blocking time of the section for the reference train, added to the regularity margin [11].

The value thus obtained can be considered reliable, as a first approximation, for a preliminary evaluation of the carrying capacity of a railway line. However, it is based on ideal operating conditions and quite different from the actual operating conditions. It is immediately identified and requires only the temporal distance, which can be obtained from the Technical Scenario, between two trains of the same category in the case of homotachy operation. In the absence of this internal RFI standard, this distance must be obtained manually following some considerations, as described above.

Two other methods, not used in the case study, for the identification of the capacity of a railway line are adopted by RFI [5]:

- the compaction method, similar to the UIC 406 method. It is based on time compression using the minimum values of the distance specifications reported in the Technical Scenario;

⁽¹⁾ Lo Scenario Tecnico RFI è una norma interna che contiene tutte le caratteristiche e le specifiche tecniche di ogni linea sotto la gestione di RFI.

⁽²⁾ The RFI Technical Scenario is an internal standard that contains all the features and technical specifications of each line under the management of RFI.

omotachico. In assenza di questa norma interna di RFI, tale distanziamento va ricavato in maniera manuale seguendo alcune considerazioni, come descritto in precedenza.

Sono adottati da RFI anche altri due metodi, non utilizzati nel caso di studio, per l'individuazione della capacità di una linea ferroviaria [5]:

- il *metodo della compattazione*, simile al metodo UIC 406. Esso si basa sulla compressione dell'orario utilizzando i valori minimi delle specifiche di distanziamento riportate nello Scenario Tecnico;
- il *metodo a saturazione*, adatto per la gestione operativa. Esso consiste nell'aggiunta di nuove tracce mantenendo inalterata la struttura dell'orario attuale e sfruttando la capacità disponibile.

3. Il metodo di calcolo UIC 405

Un metodo di tipo probabilistico è quello proposto dall'UIC nel 1983 nella pubblicazione della fiche UIC 405-1 "Method to be used for the determination of the capacity of lines" che tiene conto dell'effettiva impostazione d'orario e si basa sulla teoria delle code [6].

La potenzialità di una sezione di linea ferroviaria viene espressa con la seguente formula:

$$P = \frac{T}{t_{fm} + t_r + t_{zu}}$$

dove:

- P = potenzialità della sezione espressa in numero di treni nell'unità di tempo;
- T = periodo di riferimento espresso in minuti;
- t_{fm} = intervallo medio di distanziamento minimo dei treni espresso in minuti;
- t_r = margine di ampliamento espresso in minuti;
- t_{zu} = tempo supplementare dipendente dal numero di sezioni di blocco intermedie ed espresso in minuti.

Si analizza, ora, nel dettaglio ciascun termine dell'espressione su indicata.

Il termine t_{fm} può essere ricavato facendo una media ponderata dei distanziamenti temporali esistenti fra i treni sulla base delle loro frequenze di accadimento:

$$t_{fm} = \sum (t_{h,ij} \cdot f_{ij})$$

dove:

- $t_{h,ij}$ = è il minimo distanziamento temporale sulla linea per il treno j che segue il treno i, espresso in minuti;
- f_{ij} = è la frequenza relativa della successione treno i - treno j e può essere determinata come segue:

$$\frac{F_{ij}}{N - 1}$$

- *the saturation method, suitable for operational management. It consists of adding new train paths while maintaining the current timetable structure and taking advantage of the available capacity.*

3. The UIC 405 calculation method

A probabilistic method is that proposed by the UIC in 1983 in the publication of the fiche UIC 405-1 "Method to be used for the determination of the capacity of lines" which takes into account the actual time setting and is based on the queuing theory [6].

The carrying capacity of a railway route is expressed with the following formula:

$$P = \frac{T}{t_{fm} + t_r + t_{zu}}$$

where:

- P = carrying capacity of the section expressed in number of trains in the unit of time;
- T = reference period expressed in minutes;
- t_{fm} = average interval for minimum train distances expressed in minutes;
- t_r = expansion margin expressed in minutes;
- t_{zu} = additional time depending on the number of intermediate block sections and expressed in minutes.

Now let us analyse in detail each term of the expression indicated above.

The term t_{fm} can be obtained by calculating a weighted average of the temporal distances existing between the trains on the basis of their frequency of occurrence:

$$t_{fm} = \sum (t_{h,ij} \cdot f_{ij})$$

where:

- $t_{h,ij}$ = is the minimum time distancing on the line for train j that follows train i, expressed in minutes;
- f_{ij} = is the relative frequency of train i - train j sequence and can be determined as follows:

$$\frac{F_{ij}}{N - 1}$$

with F_{ij} representing the number of cases of class i succession followed by class j and N identifies the total number of trains succeeding in the timetable.

The addend t_r represents the buffer time to be added to the temporal distances in order to reduce chain delays and to obtain an acceptable quality of service. It is calculated with the queuing theory, assimilating the line segment to a queue system, such as in the case of a road intersection [3].

In the road case the requested service is the access to the intersection, while in the railway case the requested ser-

con F_{ij} rappresentante il numero dei casi di successione di classe i seguito dalla classe j e N individua il numero totale di treni succeduti nell'orario.

L'addendo t_r rappresenta il tempo cuscinetto da aggiungere ai distanziamenti temporali al fine di ridurre i ritardi a catena e per ottenere una qualità di servizio accettabile. Viene calcolato con la teoria delle code, assimilando il tratto di linea ad un sistema a coda, come ad esempio nel caso di un'intersezione stradale [3].

Nel caso stradale il servizio richiesto è l'accesso all'intersezione, mentre nel caso ferroviario il servizio richiesto è l'accesso alla sezione di linea che viene presa come sezione di riferimento. Tale sezione di riferimento può essere considerata come una stazione di servizio alla quale si presentano gli utenti, in questo caso i convogli, che chiedono di essere serviti ovvero di percorrere la sezione.

La coda, cioè il numero di utenti da servire, si forma se i tempi di servizio, per un certo intervallo di tempo, sono superiori ai tempi di arrivo. Pertanto, per poter smaltire la coda completamente e far funzionare correttamente il sistema è necessario che l'intensità di traffico (o fattore di utilizzazione o tasso di occupazione del singolo canale) sia inferiore all'unità:

$$\Psi = \rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\frac{1}{t_{fm} + t_r}}{\frac{1}{t_{fm}}} = \frac{t_{fm}}{t_{fm} + t_r}$$

con λ rappresentante il tasso medio degli arrivi e μ il tasso medio di servizio.

Si assume un sistema M/M/1, dove, secondo la notazione di Kendall, si indica con M una distribuzione di probabilità esponenziale (o markoviana) sia per la legge degli arrivi (prima posizione nella notazione) che per la distribuzione dei tempi di servizio (seconda posizione nella notazione). Il valore in terza posizione nella notazione indica, invece, l'esistenza di un unico canale di servizio, in questo caso la sezione rilevante di linea. Sulla base di queste premesse si può definire la lunghezza media della coda L_q come segue:

$$L_q = \frac{\rho}{(1-\rho)}$$

Sono individuati dall'UIC i seguenti valori di soglia per il fattore di utilizzazione :

- $\rho \leq 0,6$ per $t_r \geq 0,67 \cdot t_{fm}$. Si tratta di una relazione valida per un periodo molto esteso di tempo corrispondente al funzionamento a regime del sistema ed equivale a rinunciare a più della metà della capacità della linea. Il numero medio di utenti in coda è pari a 1,5;
- $\rho \leq 0,75$ per $t_r \geq 0,33 \cdot t_{fm}$. Si tratta di una relazione valida per un breve periodo di tempo, come le ore di punta, e corrispondente a 3,1 utenti in coda.

Infine, il termine supplementare t_{zu} viene ricavato in questo modo:

$$t_{zu} = 0,25 \cdot a$$

vice is the access to the section of line that is taken as a reference section.

This reference section can be considered as a service station to which users present themselves, in this case trains, which ask to be served or to travel through the section.

The queue, that is the number of users to be served, is formed if the service times, for a certain time interval, are higher than the arrival times. Therefore, in order to be able to clear the queue completely and make the system work properly, traffic intensity (or utilisation factor or single channel occupancy rate) must be less than one unit:

$$\Psi = \rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\frac{1}{t_{fm} + t_r}}{\frac{1}{t_{fm}}} = \frac{t_{fm}}{t_{fm} + t_r}$$

with λ representing the average rate of arrivals and μ the average service rate.

We assume an M/M/1 system, where, according to Kendall's notation, we indicate with M an exponential probability distribution (or Markovian) both for the rule of arrivals (first position in the notation) and for the distribution of the service times (second position in the notation). The value in third position in the notation indicates, instead, the existence of a single service channel, in this case the relevant line section. Based on these premises, the average length of the L_q queue can be defined as follows:

$$L_q = \frac{\rho}{(1-\rho)}$$

The following threshold values for the utilisation factor are identified by the UIC:

- $\rho \leq 0.6$ for $t_r \geq 0.67 \cdot t_{fm}$. This is a valid relation for a very long period of time corresponding to the steady operation of the system and is equivalent to renouncing to more than half of the capacity of the line. The average number of users in the queue is 1.5;
- $\rho \leq 0.75$ per $t_r \geq 0.33 \cdot t_{fm}$. This is a valid relation for a short period of time, such as peak hours, and corresponding to 3.1 users in the queue.

Finally, the additional term t_{zu} is obtained in this way:

$$t_{zu} = 0.25 \cdot a$$

with a representing the number of intermediate block sections on the line.

This allows the influence of the whole line to be taken into account. The relevant section for the distancing of trains, even if divided into several intermediate block sections, must be occupied by a single train in order to guarantee regular and safe circulation.

However, during normal traffic conditions, a train may be delayed. The train that follows, if it has a higher speed than the delayed train, can be slowed down until it is eventually stopped. This happens due to the presence of intermediate block signals.

con a rappresentante il numero di sezioni di blocco intermedie sulla linea.

Ciò permette di tener conto dell'influenza dell'insieme della linea. La sezione rilevante per il distanziamento dei treni, anche se suddivisa in più sezioni di blocco intermedie, deve essere occupata da un solo treno al fine di garantire una circolazione regolare oltre che sicura.

Tuttavia, durante le normali condizioni di circolazione un treno può essere ritardato. Il treno che segue, se avente una velocità maggiore del treno ritardato, può essere rallentato fino ad essere eventualmente fermato. Ciò accade a causa della presenza di segnali di blocco intermedi.

Se la sezione successiva, invece, viene liberata durante il rallentamento di codesto treno, esso può riprendere la sua marcia ad una certa velocità di rilascio nel caso non siano presenti sistemi che scambiano informazioni tra il sistema di bordo e il sistema di terra.

Si genera, così, un perditempo stimato in maniera sperimentale come sopra. Questo parametro tiene conto, quindi, del fatto che l'aumento della capacità sulla sezione critica è meno che proporzionale alla riduzione del tempo di viaggio [12].

Si possono avere tre tipologie di successioni importanti ai fini della determinazione del distanziamento minimo t_{fm} tra i treni:

- successione treno veloce - treno veloce;
- successione treno veloce - treno lento;
- successione treno lento - treno veloce.

La successione treno lento-lento non viene analizzata in quanto assente nell'orario di servizio considerato.

Con il termine *linea* si identifica un'infrastruttura ferroviaria di collegamento fra due nodi o importanti località di diramazione. Essa è, di norma, suddivisa in tratte nelle quali le caratteristiche di traffico e di infrastruttura si mantengono costanti.

La *sezione rilevante* rappresenta la sezione di distanziamento che, in ciascuna tratta, determina il maggior intervallo di tempo fra il passaggio di due treni in successione.

La *sezione critica*, invece, è la sezione di blocco avente il più alto tempo di occupazione.

Il primo caso di successione, treno veloce - treno veloce, presenta la sezione critica in corrispondenza della sezione di blocco avente il maggior tempo di bloccamento con riferimento all'intera linea, in quanto il servizio alta velocità viene effettuato per tutta l'estensione della linea. La sezione rilevante per l'orientamento pari corrisponde alla sezione delimitata tra il posto di comunicazione Alleron (n. 460) e il segnale di blocco P462 con un tempo di occupazione pari a 3,69 minuti. Ciò corrisponde al distanziamento minimo t_{vv} per tale caso di successione.

Per l'orientamento dispari, invece, essa corrisponde alla sezione delimitata tra il posto di comunicazione Re-

If the next section, on the other hand, is freed during the slowing down of this train, it can resume its operation at a certain release speed in case there are no systems that exchange information between the on-board system and the ground system.

In this way, an experimentally estimated time loss is generated as above. This parameter therefore takes into account the fact that the increase in capacity on the critical section is less than proportional to the reduction in travel time [12].

There are three types of successions that are important for determining the minimum distance t_{fm} between the trains:

- *succession of fast train - fast train ;*
- *succession of fast train - slow train;*
- *succession of slow train - fast train.*

The slow-slow train sequence is not analysed because it is absent in the service timetable considered.

With the term line a railway infrastructure connecting two nodes or important branch lines is identified. It is usually divided into sections in which the traffic and infrastructure characteristics remain constant.

The relevant section represents the spacing section which, in each stretch, determines the greatest time interval between the passage of two trains in succession.

There critical section, instead, is the block section with the highest occupancy time.

The first case of succession, fast train - fast train, presents the critical section at the block section with the greatest blocking time with reference to the entire line, as the high speed service is carried out throughout the whole line. The relevant section for the up direction corresponds to the section delimited between the Alleron communication place (n. 460) and the P462 block signal with an occupancy time of 3.69 minutes. This corresponds to the minimum distance t_{vv} for this case of succession.

For the down direction, instead, it corresponds to the section delimited between the Renacci communication place (n. 501) and the P499 block signal with an occupancy time of 3.72 minutes. This corresponds to the minimum distance t_{vv} for this case of succession.

The second case of succession, fast train - slow train, has the relevant section at the first block section of the line section analysed, since the slow train will never be able to reach the fast train with a lower speed compared to it. Therefore the minimum distance t_{vl} is equal to the occupation time of the first block section of the line stretch by the fast train. This is true only in the first approximation, in the hypothesis that the travel speeds allowed, for each rank considered, are constant on the entire route.

The third and last case of succession, slow train - fast train, presents as critical section the one having the highest

nacci (n. 501) e il segnale di blocco P499 con un tempo di occupazione pari a 3,72 minuti. Ciò corrisponde al distanziamento minimo t_{vv} per tale caso di successione.

Il secondo caso di successione, treno veloce - treno lento, presenta la sezione rilevante in corrispondenza della prima sezione di blocco della tratta di linea in analisi, in quanto il treno lento non sarà mai in grado di raggiungere il treno veloce avendo una velocità più bassa rispetto ad esso. Pertanto il distanziamento minimo t_{vl} è pari al tempo di occupazione della prima sezione di blocco del tratto di linea da parte del treno veloce. Ciò è vero solo in prima approssimazione, nell'ipotesi che le velocità di percorrenza ammesse, per ogni rango considerato, siano costanti sull'intera tratta.

Il terzo ed ultimo caso di successione, treno lento - treno veloce, presenta come sezione critica quella avente il più alto tempo di occupazione da parte del treno lento fra le sezioni di blocco presenti nel tratto di linea. Nella parte finale della tratta il servizio del treno lento cessa ed il treno veloce può sopraggiungere alla minima distanza raggiungibile soltanto in questo punto finale della linea.

Il distanziamento minimo t_{lv} per tale caso di successione, può essere scritto come segue:

$$t_{lv} = \frac{\sum_i L_i}{V_l} - \frac{\sum_i L_i - d_m}{V_v}$$

dove:

- L_i = è la lunghezza della sezione di blocco i -esima facente parte del tratto di linea considerato;
- V_l = è la velocità di linea del treno lento;
- V_v = è la velocità di linea del treno veloce;
- d_m = è il distanziamento spaziale minimo permesso fra i due treni.

In conclusione, si tratta di un metodo piuttosto immediato, adatto a rappresentare la capacità di sezioni critiche e individuare i colli di bottiglia in una linea ferroviaria, ma che è fortemente dipendente dalla struttura d'orario esistente, in particolare dalla sequenza e dal numero di casi di successione del generico treno i che segue il treno j .

Deve essere nota, anche, la struttura della linea in termini di sezioni di blocco al fine di determinare i tempi di bloccamento necessari per definire i distanziamenti tra i treni.

Inoltre il margine di ampliamento t_r da adottare viene ricavato sulla base di valori consigliati dall'UIC per garantire un certo livello di servizio e non sulla base delle condizioni reali di circolazione sull'intera linea.

4. Il metodo di Schwanhäüßer (Formula di STRELE)

L'applicazione della teoria delle code permette di analizzare la correlazione diretta tra la qualità della circolazione e la capacità dell'infrastruttura ferroviaria [13].

occupation time by the slow train between the block sections present in the stretch of line. In the final part of the route the service of the slow train stops and the fast train can arrive at the minimum distance reachable only at this end point of the line..

The minimum distance t_{lv} for this case of succession, can be written as follows:

$$t_{lv} = \frac{\sum_i L_i}{V_l} - \frac{\sum_i L_i - d_m}{V_v}$$

where:

- L_i = *is the length of the i -eth block section forming part of the considered stretch of line;*
- V_l = *is the line speed of the slow train;*
- V_v = *is the line speed of the fast train;*
- d_m = *is the minimum spatial distancing allowed between the two trains.*

In conclusion, this is a rather immediate method, suitable for representing the capacity of critical sections and identifying bottlenecks in a railway line, but which is strongly dependent on the existing timetable structure, in particular on the sequence and the number of cases of succession of the generic train i that follows train j .

The structure of the line in terms of block sections must also be known in order to determine the blocking times necessary to define the distances between the trains.

Furthermore, the expansion margin t_r to be adopted is based on values recommended by the UIC to guarantee a certain level of service and not on the basis of real circulation conditions on the entire line.

4. The Schwanhäüßer method (STRELE formula)

The application of the queueing theory allows analysing the direct correlation between the quality of circulation and the capacity of the railway infrastructure [13].

Defining the theoretical capacity N_{max} as the maximum number of trains that can circulate on the railway line, it is noted that waiting times and delays tend to infinity in a scenario characterised by N_{max} . Therefore, it is possible to circulate only a smaller number of trains on the railway line.

At this point, the N_{opt} optimal capacity is introduced, defined as the ideal number of train paths able to reduce average waiting times and average delays within a value that complies with the service level $ET_{w,zul}$ expected for the given railway infrastructure, as shown in Fig. 1.

Average waiting times are quality indicators in the planning and scheduling phase of operations, with reference to the capacity of a railway line.

One can think of expressing the capacity of the service timetable or the capacity of circulation in the form of capacity of traffic flows. The models deriving from the theory

Definendo la capacità teorica N_{max} come il numero massimo di treni che possono circolare sulla linea ferroviaria, si nota che i tempi di attesa e i ritardi tendono all'infinito in uno scenario caratterizzato da N_{max} . Pertanto, è possibile far circolare soltanto un numero minore di convogli sulla linea ferroviaria.

Si introduce, a questo punto, la capacità ottimale N_{opt} , definita come il numero ideale di tracce orarie in grado di ridurre i tempi medi di attesa e i ritardi medi entro un valore conforme al livello di servizio $ET_{w,zul}$ previsto per la data infrastruttura ferroviaria, come mostrato nella Fig. 1.

I tempi medi di attesa sono degli indicatori di qualità nella fase di pianificazione di un orario e di gestione delle operazioni, in riferimento alla capacità di una linea ferroviaria.

Si può pensare di esprimere la capacità dell'orario di servizio o la capacità di circolazione in forma di capacità dei flussi di traffico. I modelli derivanti dalla teoria delle code permettono di stabilire un collegamento tra le caratteristiche quantitative (treni per unità di tempo) e le caratteristiche qualitative (tempi di attesa) delle prestazioni di una linea ferroviaria. Ovvero, la capacità fornisce anche indicazioni relative alle modalità di circolazione dei treni in linea, in merito alla velocità media e sua variabilità; ai parametri di regolarità richiesti in termini di puntualità e stabilità dell'orario programmato [14]. Le formule utilizzate, tuttavia, rappresentano un approccio di calcolo molto semplificato.

Un modello del genere riguarda la formazione di code e di congestioni ed è costituito da quattro parti principali: processo di arrivo, processo di servizio, stazione di servizio e area di attesa.

Il processo di arrivo descrive la struttura del flusso di domanda in ingresso caratterizzato dall'intervallo di tempo t_A tra due serventi. Tale intertempo di arrivo può essere considerato come una variabile casuale.

Il processo di servizio è caratterizzato, invece, dal tempo medio di servizio t_B che è, ancora una volta, una variabile casuale.

I tempi di servizio, nel caso ferroviario, sono rappresentati dagli *headways* minimi permessi dall'infrastruttura delle sezioni di linea. L'intertempo minimo si riferisce alla traccia del treno i e del treno j in una sezione di linea, chiamata sezione di sorpasso e delimitata dalle stazioni o dalle località di servizio, dove è possibile che cambi la sequenza dei treni i e j attraverso le precedenza. È possibile scrivere una matrice Z degli intervalli di tempo che separano due generici treni i e j :

$$Z = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & \dots & z_{nn} \end{pmatrix}$$

dove:

z_{ij} = minimo intertempo tra il treno i e il treno j .

of the queues allow to establish a link between the quantitative characteristics (trains per unit of time) and the qualitative characteristics (waiting times) of the performance of a railway line. That is, the capacity also provides information on how the trains run on line, with regard to the average speed and its variability; to the regularity parameters required in terms of punctuality and stability of the scheduled timetable [14]. The formulas used, however, represent a very simplified calculation approach.

Such a model concerns the formation of queues and congestion and consists of four main parts: arrival process, service process, service station and waiting area.

The arrival process describes the structure of the incoming demand flow characterised by the time interval t_A between two servers. This arrival inter-time can be considered as a random variable.

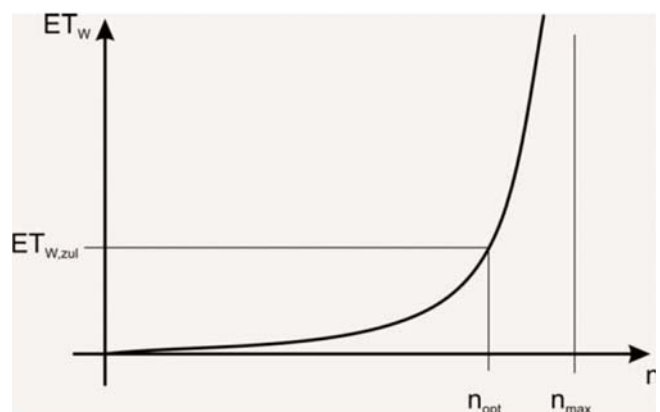
The service process is characterised, instead, by the average service time t_B that is, again, a random variable.

The service times, in the railway case, are represented by the minimum headways allowed by the infrastructure of the line sections. The minimum inter-time refers to the path of the train i and train j in a section of line, called overtaking section and delimited by stations or service locations, where the sequence of trains i and j can change through the rights of way. It is possible to write a matrix Z of the time intervals that separate two generic trains i and j :

$$Z = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & \dots & z_{nn} \end{pmatrix}$$

where:

z_{ij} = minimum inter-time between train i and train j .



(Fonte - Source: UIC, 2008 [13])

Fig. 1 - Relazione tra il numero di treni e i tempi medi di attesa.

Fig. 1 - Relation between the number of trains and average waiting times.

La stima del consumo di capacità delle sezioni della linea ferroviaria si basa sul processo di servizio, visto come una connessione tra il numero dei treni e i tempi di sosta non programmati.

Un'espressione matematica per calcolare i ritardi medi secondari ET_w sulle sezioni di linea, equivalenti ai tempi di attesa non programmati ed espressi in forma adimensionale come min/min, è data dalla formula di Schwanhäusser, nota anche come formula di STRELE [7], [8]:

$$ET_w = \left(p_{VE} \cdot \frac{P_{VE}}{2} \right) \cdot \left[p_g \cdot \left(1 - e^{-\frac{z_g}{t_{VE}}} \right)^2 + \dots \right. \\ \left. + (1 - p_g) \cdot \frac{z_v}{t_{VE}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2z_v}{t_{VE}}} \right) + \frac{z}{t_p} \cdot \left(1 - e^{-\frac{z}{t_{VE}}} \right)^2 \right] \cdot \frac{1}{\left(\frac{z}{t_{VE}} \right)^2 \cdot \left(1 + \frac{t_p}{z} \right) \cdot \left[\frac{t_p}{z} + \left(1 - e^{-\frac{z}{t_{VE}}} \right) \cdot \frac{t_{VE}}{z} \right]}$$

dove:

- t_p = tempo cuscinetto medio (*buffer time*) identificante un margine di tempo additivo al minimo distanziamento temporale (*signal headway*) tra i treni. L'intervallo di successione tra un treno e l'altro viene, quindi, incrementato riducendo, di fatto, la capacità disponibile;
- z = minimo intertempo medio;
- z_g = minimo intertempo medio della successione di treni della stessa categoria;
- z_v = minimo intertempo medio della successione di treni di diversa categoria;
- t_{VE} = ritardo medio in ingresso, stimato come rapporto tra la somma dei ritardi e il numero di treni aventi ritardo;
- p_{VE} = probabilità del ritardo in ingresso o ritardo primario, determinato come il rapporto tra il numero di treni aventi ritardo e il numero totale di treni circolanti;
- p_g = probabilità che si verifichi una successione di treni della stessa categoria.

La somma dei tempi di attesa è il prodotto dei ritardi medi secondari ET_w e del periodo di riferimento T :

$$\sum T_w = ET_w \cdot T$$

In seguito all'analisi di una vasta gamma di dati statistici, è possibile determinare un valore accettabile dei tempi di attesa non previsti. Ad esempio in Germania, un valore plausibile di tale somma dei tempi di attesa non programmati che conduce ad una soddisfacente qualità della circolazione è [13]:

$$ET_{w,zul} = 0,257 \cdot e^{-1,3 \cdot p_{RZ}}$$

dove:

p_{RZ} = è la quota di treni passeggeri.

La precedente equazione può essere risolta in t_p , attraverso metodi numerici, per ricavare il tempo cuscinetto t_p necessario per il raggiungimento di una soddisfacente qualità della circolazione.

The estimate of the capacity consumption of the sections of the railway line is based on the service process, seen as a connection between the number of trains and the unplanned stop times.

A mathematical expression to calculate secondary average delays ET_w on line sections, equivalent to unplanned waiting times and expressed in a dimensionless form as min/min, is given by the formula of SCHWANHÄUSSER, also known as the STRELE formula [7], [8]:

$$ET_w = \left(p_{VE} \cdot \frac{P_{VE}}{2} \right) \cdot \left[p_g \cdot \left(1 - e^{-\frac{z_g}{t_{VE}}} \right)^2 + \dots \right. \\ \left. + (1 - p_g) \cdot \frac{z_v}{t_{VE}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2z_v}{t_{VE}}} \right) + \frac{z}{t_p} \cdot \left(1 - e^{-\frac{z}{t_{VE}}} \right)^2 \right] \cdot \frac{1}{\left(\frac{z}{t_{VE}} \right)^2 \cdot \left(1 + \frac{t_p}{z} \right) \cdot \left[\frac{t_p}{z} + \left(1 - e^{-\frac{z}{t_{VE}}} \right) \cdot \frac{t_{VE}}{z} \right]}$$

where:

- t_p = average buffer time identifying an additional time margin to the minimum time span (*signal headway*) between trains. The succession interval between one train and the next is therefore increased, reducing, in fact, the available capacity;
- z = minimum average inter-time;
- z_g = minimum average inter-time for the succession of trains of the same category;
- z_v = minimum average inter-time for the succession of trains of different categories;
- t_{VE} = average incoming delay, estimated as the ratio between the sum of the delays and the number of delayed trains;

p_{VE} = probability of incoming delay or primary delay, determined as the ratio between the number of delayed trains and the total number of trains in circulation;

p_g = probability that a succession of trains of the same category will occur.

The sum of waiting times is the product of secondary average delays ET_w and of the reference period T :

$$\sum T_w = ET_w \cdot T$$

Following the analysis of a wide range of statistical data, it is possible to determine an acceptable value of unforeseen waiting times. For example in Germany, a plausible value of this sum of unplanned waiting times leading to satisfactory traffic quality is [13]:

$$ET_{w,zul} = 0,257 \cdot e^{-1,3 \cdot p_{RZ}}$$

where:

p_{RZ} = is the share of passenger trains.

The previous equation can be solved in t_p through numerical methods, to obtain the buffer time t_p necessary to achieve satisfactory traffic quality.

Finally, the N_{opt} optimal number of trains can be calculated as:

$$N_{opt} = \frac{T}{z + t_p}$$

Infine, si può calcolare il numero ottimale N_{opt} di treni come:

$$N_{opt} = \frac{T}{z + t_p}$$

Si tratta di un'espressione analoga a quella utilizzata nel metodo di calcolo UIC 405.

Le informazioni relative alle successioni dei treni e ai loro distanziamenti minimi possono essere riprese dal precedente capitolo relativo al metodo UIC 405.

Inoltre, si ipotizza di assumere come valore accettabile del tempo di attesa non programmato quello utilizzato dalle ferrovie tedesche, pari a 0,07 min/min con una proporzione del 100% di treni passeggeri corrispondente al valore unitario di p_{RZ} . Ciò corrisponde ad un ritardo complessivo ammesso di 8,4 minuti.

È un metodo che richiede una grande quantità di dati, alcuni dei quali analoghi a quelli necessari per il metodo UIC 405, come la struttura d'orario esistente e la struttura della linea in termini di sezioni di blocco. In aggiunta a ciò è indispensabile effettuare un'analisi sugli orari di passaggio rispetto all'orario programmato, al fine di delineare il valore del ritardo medio in ingresso e la probabilità del verificarsi di un ritardo all'ingresso della tratta considerata.

Infine, l'applicazione della formula di STRELE permette di individuare il valore del tempo cuscinetto t_p sulla base delle condizioni reali di circolazione sull'intera linea e sulla base di un adeguato livello di servizio, fissato secondo il criterio tedesco. Ciononostante, l'elaborazione dei dati richiesti dalla formula di STRELE risulta molto complessa producendo valori più approssimati rispetto a quelli valutati con altri metodi.

5. Il metodo della compattazione UIC 406

La *fiche* UIC Code 406 "Capacity", pubblicata nel 2013 nella sua seconda edizione, descrive un metodo per misurare il consumo di capacità ferroviaria per una data infrastruttura [15].

Questo metodo definisce la potenzialità ferroviaria come il numero totale di tracce che si possono inserire in una finestra temporale, considerando l'attuale configurazione delle tracce.

Si tratta di un approccio analitico-ottimizzazione che usa un modello basato sui tempi di occupazione (*blocking time*) e fornisce una descrizione dettagliata dell'utilizzo dell'infrastruttura in termini di tracce.

Il principio di base del *blocking time* t_b riguarda il tempo in cui una sezione di blocco è occupata da un convoglio e, quindi, interdetta all'accesso da parte di qualsiasi altro convoglio. Tale tempo termina con il passaggio della coda del treno al segnale situato a valle della sezione occupata, più un margine di tempo accessorio necessario agli apparati di controllo e di sicurezza per la predisposizione a via libera del segnale situato a monte della sezione prima occupata [12].

This is an expression similar to that used in the UIC 405 calculation method.

Information on train sequences and their minimum distances can be taken from the previous chapter on the UIC 405 method.

Furthermore, it is assumed that the unused travel time used by German railways can be assumed as unplanned waiting time acceptable value, equal to 0.07 min/min with a proportion of 100% of passenger trains corresponding to the unit value of p_{RZ} . This corresponds to an overall delay of 8.4 minutes.

It is a method that requires a large amount of data, some of which are similar to those needed for the UIC 405 method, such as the existing time structure and the structure of the line in terms of block sections. In addition to this it is essential to carry out an analysis of the transit times with respect to the scheduled time, in order to outline the value of the average incoming delay and the probability of occurrence of a delay at the entrance of the considered stretch.

Finally, the application of the STRELE formula allows identifying the value of the buffer time t_p on the basis of real traffic conditions on the entire route and on the basis of an appropriate level of service, established according to the German criterion. Nevertheless, the processing of the data required by the STRELE formula is very complex, producing values that are more approximate than those evaluated by other methods.

5. The UIC 406 compaction method

The fiche UIC Code 406 "Capacity", published in 2013 in its second edition, describes a method to measure rail capacity consumption for a given infrastructure [15].

This method defines the railway carrying capacity as the total number of train paths that can be inserted in a time frame, considering the current configuration of the train paths.

This is an analytical-optimisation approach that uses a model based on occupation times (blocking time) and provides a detailed description of the use of the infrastructure in terms of train paths.

The basic principle of blocking time t_b concerns the time in which a block section is occupied by a convoy and, therefore, with prohibited access by any other convoy. This time ends with the passage of the queue of the train at the signal located downstream of the occupied section, plus an accessory time margin necessary for the control and safety devices for the preparation of the green light signal located upstream of the section occupied before [12].

The occupation time t_p is longer than the actual travel time of the section by a train. It consists of (Fig. 2):

- route formation time t_{ie} , assumed equal to 10 s;
- warning signal watching time t_{vis} of the warning signal,

Il tempo di occupazione t_p è più lungo del tempo effettivo di percorrenza della sezione da parte di un treno. Esso è costituito da (Fig. 2):

- tempo di formazione dell'itinerario t_{ite} , ipotizzato pari a 10 s;
- tempo di avvistamento t_{vis} , da parte del personale di condotta, del segnale di avviso, se presente. Tale tempo si ipotizza nullo nel caso di presenza della ripetizione dei segnali in cabina;
- tempo di avvicinamento t_{avv} , cioè il tempo di percorrenza tra il segnale di avviso e il segnale di protezione della sezione di blocco precedente a quella da percorrere, avente lunghezza pari a L_{b-1} .

Nel caso della linea DD ove è presente il blocco elettrico automatico a correnti codificate (BAcc) che, grazie alla la ripetizione dei segnali in cabina, anticipa al macchinista l'informazione relativa al segnale di avviso, il tempo di avvicinamento è relativo al tempo di percorrenza della sezione di blocco precedente a quella considerata a partire dall'istante in cui si capta il codice più restrittivo [16], [17]. Esso è differente a seconda che si tratti di un treno AV (alta velocità), IC (Intercity) o RV (Regionale Veloce) in virtù delle diverse velocità con le quali percorrono la linea DD [18].

Ipotizzando una lunghezza del circuito di binario pari a 1.350 m, la captazione del primo codice restrittivo per un treno AV avviene con il codice 270*, pertanto il tempo di avvicinamento è pari all'intero tempo di percorrenza della sezione di blocco precedente.

Inoltre, per un treno IC il primo codice più restrittivo è il 270, pertanto il tempo di avvicinamento è pari al tempo di percorrenza della sezione di blocco precedente depurata di 1.350 m, spazio nel quale non si ricevono informazioni limitative.

Infine, per un treno RV il primo codice più restrittivo è il 180, pertanto il tempo di avvicinamento è pari al tempo di percorrenza della sezione di blocco precedente depurata di 2.700 m, spazio nel quale non si ricevono informazioni restrittive;

- tempo di percorrenza t_p della sezione di blocco, avente lunghezza L_b ;
- tempo di liberazione t_l della sezione di blocco, dipendente dalla lunghezza del treno. Nello studio in questione si adotta un franco di sicurezza f pari a 20 m e una lunghezza media del treno L_t pari a 230 m, avendo complessivamente una lunghezza da liberare uguale a 250 m;
- tempo di scioglimento t_{isu} o riassetto degli impianti, ipotizzato pari a 10 s.

by the conductors, if present. This time is assumed null in the case of the presence cab signalling;

- approach time t_{avv} , i.e. the travel time between the warning signal and the protection signal of the block section preceding the one to be travelled, with a length equal to L_{b-1} .

In the case of the DD line where there is a coded current automatic block (BAcc) with which, thanks to the repetition of the signals in the cabin, anticipates to the driver the information related to the warning signal, the approach time is relative to the travel time of the block section preceding the one considered starting from the instant in which the most restrictive code is detected [16], [17].

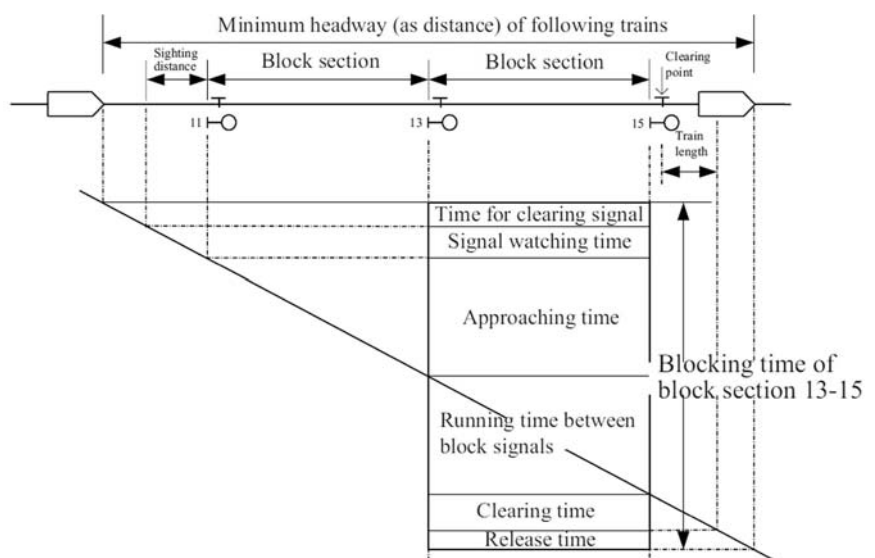
It is different depending on whether it is a HS train (high speed), IC (Intercity) or RV (Regional Fast) by virtue of the different speeds with which they travel the DD line [18].

Assuming a length of the track circuit equal to 1,350 m, the capture of the first restrictive code for a HS train takes place with the code 270*, therefore the approach time is equal to the entire travel time of the previous block section.

Moreover, for an IC train the first most restrictive code is 270, therefore the approach time is equal to the travel time of the previous block section not counting 1,350 m, a space in which no limitative information is received.

Finally, for an RV train, the first most restrictive code is 180, so the approach time is equal to the travel time of the previous block section without counting 2,700 m, a space in which no restrictive information is received;

- running time t_p of the block section, with length L_b ;
- clearing time t_l of the block section, depending on the



(Fonte - Source: Medeossi, 2010 [19])

Fig. 2 - Tempo di occupazione di una sezione di blocco.
Fig. 2 - Occupation time of a block section.

Il distanziamento minimo tra i convogli è la distanza consentita dal sistema di segnalamento (*signal headway*), in termini temporali, senza che ci sia alcuna ostruzione tra essi. Viene determinato in maniera tale da spostare il tempo di blocco del secondo treno j fino a che esso tocca il grafico del treno i precedente.

Il distanziamento minimo di linea (*minimum line headway*) fra due treni, invece, viene definito considerando la sequenza dei tempi di blocco per l'intera linea o una parte di essa. Le sequenze dei tempi di blocco di due successivi treni si toccano, senza alcun *buffer time*, in una sezione di blocco definita come sezione di blocco critica. Da ciò si può definire l'istante di partenza del secondo convoglio affinché non ci siano conflitti lungo la linea. Si individua, così, la sezione di blocco rilevante (Fig. 3).

Per determinare il tempo complessivo di occupazione dell'infrastruttura, in un determinato orario di servizio, e, in tal modo, una stima del consumo di capacità, si applica il metodo della compressione di orario. Ovvero si avvicinano virtualmente tra loro al massimo tutte le tracce senza modificare l'ordine di successione dei treni e rendendo i tempi cuscinetto nulli (*buffer times*), dati dalla distanza temporale tra l'istante di fine occupazione di una sezione e l'istante successivo di occupazione della stessa sezione di linea da parte di un altro convoglio.

Negli orari di servizio reali i tempi cuscinetto sono necessari per ridurre la propagazione dei ritardi. Si aggiunge un tempo cuscinetto al distanziamento minimo realizzabile per assorbire eventuali ritardi di lieve entità.

La compressione, in definitiva, considera il *signal headway* che dipende dal sistema di segnalamento e dalle caratteristiche del treno.

Il contenuto della *fiche* UIC 406 articola la procedura di compressione dell'orario nei seguenti passi [9]:

1) *Definizione dell'infrastruttura e dell'orario*, individuando quelle che sono le aree di interesse per lo studio, in questo caso la linea ferroviaria che collega due località generiche A e B rispettando un determinato orario di servizio.

2) *Definizione delle sezioni di linea da valutare*. Esse possono essere suddivise in due sottocategorie:

- porzioni di linea relative agli itinerari dei treni, riferite a collegamenti ferroviari tra due località dove è presente una certa quota di domanda di trasporto passeggeri. Si tratta di linee servite da treni a lunga percorrenza;
- sezioni di linea vere e proprie, utilizzate per misurare il consumo di

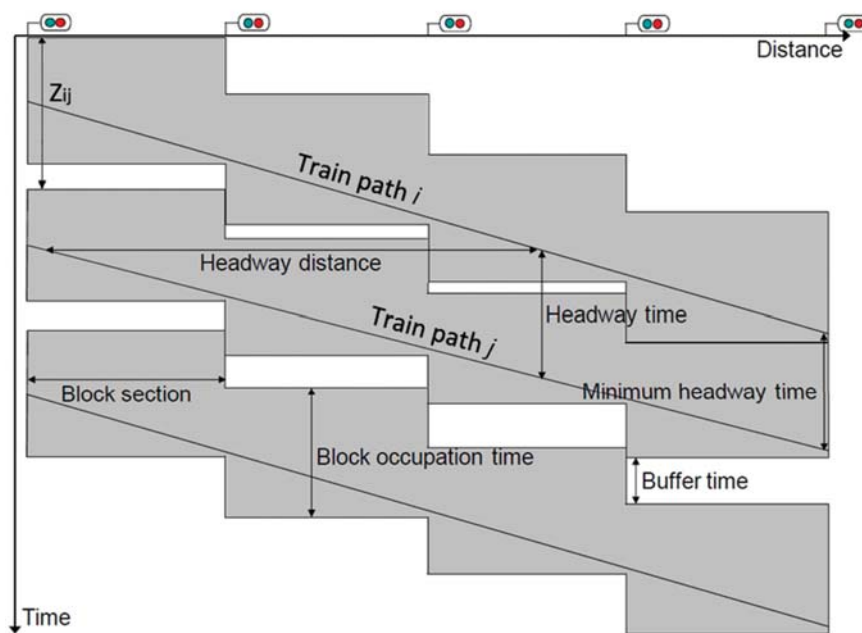
length of the train. A security margin f equal to 20 m is adopted in the study in question and an average train length L_t equal to 230 m, with a total length to be cleared equal to 250 m;

- release time t_{itu} or reorganisation of the systems, assumed to be 10 s.

The minimum distance between trains is the distance allowed by the signalling system (*signal headway*), in terms of time, without any obstruction between them. It is determined in such a way as to move the blocking time of the second train j till it touches the graph of previous train i .

The minimum line train spacing (*minimum line headway*) between two trains, on the other hand, is defined considering the sequence of block times for the entire line or a part of it. The sequences of the block times of two subsequent trains touch each other, without any buffer time, in a block section defined as a critical block section. From this we can define the starting moment of the second convoy so that there are no conflicts along the line. Thus, the relevant block section is identified (Fig. 3).

The time compression method is applied to determine the total time of infrastructure occupancy, at a given time of service, and thus an estimate of capacity consumption. In other words, virtually all train paths are close to each other without changing the order of succession of the trains and making buffer times zero, given by the temporal distance between the moment of end of occupation of a section and the subsequent moment of occupation of the same line section by another train.



(Fonte - Source: PACHL, 2002 [20])

Fig. 3 - Illustrazione dei distanziamenti temporali.
Fig. 3 - Illustration of the temporal distances.

capacità attraverso la compressione dell'orario. Esse vanno individuate nelle zone dove si hanno condizioni omogenee sia dal punto di vista infrastrutturale che dal punto di vista dell'orario. Devono essere interrotte nei punti dove si hanno cambiamenti nell'infrastruttura con riferimento al sistema di segnalamento, al numero di binari, alle linee di diramazione oppure dove si hanno variazioni nell'orario di servizio come l'inizio/fine delle corse, un differente numero di treni in circolazione, una diversa sequenza di treni (Fig. 4).

3) *Calcolo del consumo di capacità*, misurato in un determinato intervallo temporale, normalmente non più piccolo di due ore, basato su una giornata rappresentativa delle più comuni condizioni di traffico sulla linea. Il consumo di capacità viene determinato come segue:

$$\text{Consumo di capacità [\%]} = \frac{\text{Tempo di occupazione} + \text{Margini aggiuntivi di tempo}}{\text{Periodo temporale di riferimento}} \cdot 100$$

Il tempo di occupazione della tratta di linea (*infrastructure occupation*) dipende dall'insieme dei tempi di occupazione delle singole sezioni di blocco relative ad ogni treno. Esso può essere misurato lungo l'asse dei tempi tra la prima e l'ultima traccia dei treni presenti, dopo aver effettuato la compressione dell'orario che, per motivi pratici, prevede l'inserimento dell'ultima traccia dopo la sequenza di treni esistente in orario come traccia corrispondente alla prima.

I supplementi di tempo aggiuntivi sono necessari tra una traccia e l'altra, al fine di assicurare uno specifico livello di servizio mediante il tempo cuscinetto (*buffer time*). Essi devono essere aggiunti anche nei casi in cui sono previsti incroci in linea (*crossing buffer*), lavori di manutenzione o passaggi da una fascia oraria di punta ad una di morbida. La loro determinazione viene descritta nel dettaglio nel successivo punto.

4) *Valutazione del consumo di capacità*, fase importante per stabilire le condizioni dell'infrastruttura e la necessità o meno di intervenire sull'orario o sull'infrastruttura allo scopo di migliorare la qualità della circolazione ferroviaria.

Sulla base del tempo di occupazione, descritto in precedenza, si può ricavare il tempo di occupazione percentuale:

In real service times, buffer times are necessary to reduce the diffusion of delays. A buffer time is added to the minimum spacing achievable to absorb any slight delays.

Compression, ultimately, considers the signal headway which depends on the signalling system and the characteristics of the train.

The content of fiche UIC 406 expresses the time compression procedure in the following steps [9]:

1) *Definition of the infrastructure and timetable, identifying what are the areas of interest for the study, in this case the railway line connecting two generic locations A and B respecting a specific service timetable.*

2) *Definition of the line sections to be evaluated. They can be divided into two sub-categories:*

- *train part section of line relating to train routes, referring to rail links between two locations where there is a certain share of passenger transport demand. These are lines served by long-distance trains;*
- *real line sections, used to measure capacity consumption through time compression. They must be identified in areas where there are homogeneous conditions both from the infrastructural point of view and from the point of view of the timetable.*

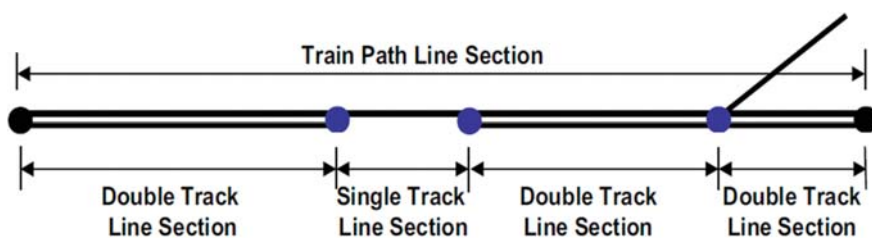
They must be interrupted at points where there are changes in the infrastructure with reference to the signalling system, the number of tracks, the branch lines or where there are variations in the service timetable such as the start/end of trips, a different number of trains in circulation, a different train sequence (Fig. 4).

3) *Calculation of capacity consumption, measured in a given time interval, normally no more than two hours, based on a day representative of the most common traffic conditions on the line. Capacity consumption is determined as follows:*

$$\text{Capacity consumption [\%]} = \frac{\text{Occupancy time} + \text{Additional time margins}}{\text{Reference time period}} \cdot 100$$

The occupation time of the line section (infrastructure occupation) depends on the set of occupation times of the individual block sections relating to each train. It can be measured along the axis of time between the first and last train path of trains present, after compression of time that, for practical purposes, involves the introduction of the last train path after the sequence of existing trains on timetable as train path corresponding to the first.

Additional time supplements are needed between one train path and another, in order to ensure a specific service level through buffer time. They must also be added in cases where on-line crossings (crossing buffers), maintenance works or passages from a peak hour to a soft time range are planned. Their determination is described in detail in the next point.



(Fonte - Source: UIC, 2013 [9])

Fig. 4 - Definizione delle sezioni di linea dovute a differenze infrastrutturali.
Fig. 4 - Defining line sections due to infrastructure differences.

$$\text{Tempo occupazione [\%]} = \frac{\text{Tempo occupazione}}{\text{Periodo temporale di riferimento}} \cdot 100$$

L'organismo internazionale UIC definisce delle linee guida riguardo i valori standard del tempo di occupazione dell'infrastruttura allo scopo di realizzare una soddisfacente qualità del servizio. Se il consumo di capacità eccede tali valori, l'infrastruttura può essere considerata al limite della saturazione. Viceversa, se i valori di consumo di capacità del piano orario programmato sono inferiori a tali limiti, risulta garantita anche la stabilità d'orario.

Questi valori, riportati nella Tabella 1, sono in funzione del tipo di linea e dell'uso dell'infrastruttura.

Per quanto riguarda i margini di tempo aggiuntivi, si può operare inserendoli singolarmente nelle corrispondenti posizioni nell'orario oppure considerarli globalmente come un unico blocco, stimato come percentuale del tempo di occupazione della sezione di linea:

$$\text{Supplemento di tempo aggiuntivo [\%]} = \left(\frac{100}{\text{Tempo occupazione percentuale}} - 1 \right) \cdot 100$$

Da tale equazione si possono ricavare i valori percentuali minimi consigliati delle quote di tempo da aggiungere al tempo di occupazione per ottenere un soddisfacente livello di servizio, riportati nella Tabella 2.

Pertanto, il valore finale del consumo di capacità può essere determinato come segue:

$$\text{Consumo di capacità [\%]} = \frac{\text{Tempo occupazione} \cdot (1 + \text{Supplemento di t. agg. \%})}{\text{Periodo temporale di riferimento}} \cdot 100$$

I valori del consumo di capacità fino al 100% incluso indicano un accettabile livello di servizio e la possibilità, per valori inferiori al 100%, di avere una capacità disponibile per l'aggiunta di nuove tracce di treni lungo la linea ferroviaria considerata.

Si ha, invece, un potenziale collo di bottiglia quando sono raggiunti valori superiori al 100% corrispondenti ad un basso livello di servizio e alla necessità di intervenire sull'orario di servizio o sull'infrastruttura. Confrontando i consumi di capacità di tutte le sezioni della linea considerata, quello avente il valore più alto può essere

4) Capacity consumption assessment, *important phase to determine the conditions of the infrastructure and the need or less to intervene on the timetable or on the infrastructure to improve the quality of rail traffic.*

Based on the occupancy time described above, the percentage occupation time can be obtained:

$$\text{Occupation time [\%]} = \frac{\text{Occupation time}}{\text{Reference time period}} \cdot 100$$

The international UIC body defines guidelines regarding the standard values of the occupation time of the infrastructure in order to achieve a satisfactory quality of service.

If capacity consumption exceeds these values, the infrastructure can be considered at saturation limit. Vice versa, if the capacity consumption values of the scheduled time plan are lower than those limits, the stability of time is also guaranteed.

These values, shown in Table 1, depend on the type of line and the use of the infrastructure.

With regard to the additional time margins, one can operate by inserting them individually in the corresponding positions in the timetable or considering them globally as a single block, estimated as a percentage of the occupation time of the line section:

$$\text{Additional time supplement [\%]} = \left(\frac{100}{\text{Percentage occupation time}} - 1 \right) \cdot 100$$

From this equation we can obtain the minimum recommended percentage values of the time shares to be added to the occupation time to obtain a satisfactory level of service, shown in Table 2.

Therefore, the final value of capacity consumption can be determined as follows

$$\text{Capacity consumption [\%]} = \frac{\text{Occupation time} \cdot (1 + \text{Add. t. supplement \%})}{\text{Reference time period}} \cdot 100$$

Capacity consumption values up to 100% included indicate an acceptable level of service and the possibility, for values below 100%, of having a capacity available for the addition of new train paths along the railway line considered.

Tabella 1 – Table 1

Valori raccomandati per il tempo di occupazione percentuale

Recommended values for the percentage occupancy time

Tipo di linea Type of line	Ora di punta Rush hour	Periodo giornaliero Daily period
Linea suburbana Suburban line	85%	70%
Linea ad alta velocità high speed line	75%	60%
Linee a traffico misto Mixed traffic lines	75%	60%

(Fonte - Source: UIC, 2013 [9])

Tabella 2 – Table 2

Valori raccomandati per i margini di tempo aggiuntivi

Recommended values for additional time margins

Tipo di linea Type of line	Ora di punta Rush hour	Periodo giornaliero Daily period
Linea suburbana Suburban line	18%	43%
Linea ad alta velocità High speed line	33%	67%
Linee a traffico misto Mixed traffic lines	33%	67%

(Fonte - Source: UIC, 2013 [9])

posto come rappresentativo di tutta la linea ferroviaria, indicando, di fatto, un vero e proprio collo di bottiglia del sistema.

5) *Valutazione della capacità disponibile*, effettuata solamente sui segmenti interi di linea in una rete ferroviaria che presentano un consumo di capacità inferiore del 100%. La capacità disponibile (*available capacity*) è la quota potenziale di tracce aggiuntive che possono essere inserite lungo la linea nella finestra temporale di riferimento, in seguito all'operazione di compressione. Essa può essere chiamata anche capacità inutilizzata (*unused capacity*) e viene vista come la somma della capacità utilizzabile e della capacità perduta.

Se tale aggiunta risulta possibile, in quanto il valore aggiornato del consumo di capacità risulta minore del 100%, la rimanente capacità prende il nome di capacità utilizzabile (*usable capacity*).

Se tale aggiunta non risulta possibile, in quanto il valore aggiornato del consumo di capacità risulta maggiore del 100%, la rimanente capacità prende il nome di capacità perduta (*lost capacity*).

Il consumo di capacità che viene determinato attraverso la procedura UIC 406 definisce la capacità pratica (*practical capacity*). Si possono, così, illustrare le condizioni di una rete ferroviaria e le rispettive capacità disponibili, in maniera tale da avere un quadro completo sul grado di utilizzazione del sistema, constatando anche quali siano le unità più critiche. Diventa, così, possibile individuare gli eventuali interventi di miglioramento per permettere la circolazione di più treni e per assicurare una soddisfacente qualità delle operazioni.

La procedura di compressione dell'orario viene effettuata anche attraverso il supporto del software di simulazione OpenTrack®, descritto nel § 7. I distanziamenti minimi fra i vari casi di successione dei treni vengono individuati mediante OpenTrack®. Il valore così trovato, arrotondato all'estremo superiore in un intervallo di 30 secondi, è rappresentativo di una condizione di marcia sicura e regolare, senza conflitti fra i treni.

Tale metodo necessita dell'orario attuale e di una dettagliata descrizione della linea in termini di sezioni di blocco al fine di rappresentare i gradini di occupazione, necessari per l'avvicinamento delle tracce dei treni fra loro.

6. Caso di studio: la linea "Direttissima" Roma-Firenze

L'infrastruttura oggetto di analisi è la linea ferroviaria ad alta velocità Roma-Firenze denominata *linea Direttissima* e comunemente abbreviata nella denominazione DD. Tale definizione si rende necessaria per distinguerla dalla linea di più antica costruzione e denominata *linea Lenta* (LL) per via del suo tracciato tortuoso che collega le stesse città, frutto dell'unione di diversi tronchi progettati in maniera disorganica.

On the other hand, there is a potential bottleneck when values exceeding 100% are reached corresponding to a low level of service and to the need to intervene on the service timetable or on the infrastructure. Comparing the capacity consumption of all sections of the line considered, the one with the highest value can be placed as representative of the entire railway line, indicating, in fact, a real bottleneck of the system.

5) *Evaluation of available capacity, performed only on the entire line segments in a railway network which have a capacity consumption of less than 100%. The available capacity is the potential share of additional train paths that can be inserted along the line in the reference time frame, following the compression operation. It may also be called unused capacity and is seen as the sum of usable capacity and lost capacity.*

If this addition is possible because the updated capacity consumption is less than 100%, the remaining capacity is called usable capacity.

If this addition is not possible, because the updated capacity consumption value is greater than 100%, the remaining capacity is called lost capacity.

The capacity consumption that is determined through the UIC 406 procedure defines practical capacity. It is thus possible to illustrate the conditions of a railway network and the respective available capacities, so as to have a complete picture of the degree of utilisation of the system, also ascertaining which are the most critical units. In this way any improvement interventions to allow the circulation of several trains and to ensure a satisfactory quality of the operations can be identified.

The time compression procedure is also performed through the support of the OpenTrack® simulation software, described in § 7. The minimum distances between the various train succession cases are identified using OpenTrack®. The value so found, rounded up to the maximum in an interval of 30 seconds, is representative of a safe and regular operation condition, without conflicts between trains.

This method requires the current time and a detailed description of the line in terms of block sections in order to represent the blocking time stairway, necessary for the approach of train paths between them.

6. Case study: the Rome-Florence "Direttissima"

The infrastructure being analysed is the Rome-Florence Direct high speed railway line named Direttissima line and commonly abbreviated in DD. This definition is necessary to distinguish it from the oldest line built and known as the Linea Lenta (Slow line) (LL) because of its winding path that connects the same cities, the result of the union of individual sections designed in a disorganised way.

The Milan-Bologna-Rome-Naples backbone axis has always been most of Italian rail traffic. Therefore, from the

L'asse dorsale Milano - Bologna - Roma - Napoli presenta, da sempre, la maggior parte del traffico ferroviario italiano. Pertanto, dai primi anni '60 si hanno i primi studi finalizzati alla costruzione di un collegamento diretto ad alta velocità tra Roma e Firenze, integrato con la linea esistente attraverso dieci interconnessioni con il tracciato esistente in modo da rendere flessibile l'utilizzo della nuova linea.

Nel 1970 viene posata la prima pietra della "Direttissima" nei pressi del fiume Paglia, all'altezza di Orvieto, da dove sarebbe sorto il viadotto più lungo della linea. Tale evento rende, di fatto, l'Italia il primo paese a livello europeo ad avviare la costruzione di una linea ad alta velocità. La realizzazione della linea, prevista in soli cinque anni, si è dilungata per molto più tempo con il compimento in fasi temporali successive di differenti tronchi di linea, terminato nel 1992 [21].

La linea ferroviaria DD è a doppio binario e connette il capoluogo laziale al capoluogo toscano mediante un tracciato di lunghezza pari a 253,6 km. L'infrastruttura ad alta velocità vera e propria si ha, però, da Settebagni a Firenze Rovezzano con una lunghezza complessiva di 237,5 km contro i 290,5 km della linea LL.

Trattandosi di una linea destinata all'alta velocità, è stata posta particolare cura nella fase di progettazione dell'infrastruttura e degli impianti per consentire una velocità di percorrenza pari a 250 km/h.

Le interconnessioni attualmente presenti vengono riportate nella Fig. 5

Il sistema di distanziamento è basato sul blocco elettrico automatico a correnti codificate (BACC) con la "Ripetizione dei Segnali Continua" (RSC) in cabina mediante una codifica a 9 codici e "Sistema di Controllo Marcia Treno" (SCMT).

L'alimentazione elettrica, infine, è costituita da una tensione nominale di 3 kV in corrente continua al fine di rendere compatibile e semplice l'utilizzo della linea rispetto al resto della rete italiana alimentata con il medesimo siste-

early 60's we have the first studies for the construction of a high speed "Direttissima" connection between Rome and Florence, integrated with the existing line through ten interconnections with the existing layout in order to make the use of the new line flexible.

In 1970 the foundation stone of the "Direttissima" was laid near the Paglia River, near Orvieto, where the longest viaduct on the line would rise. This event actually makes Italy the first European country to start the construction of a high speed line. The construction of the line, planned in just five years, lasted much longer with the fulfilment in later phases of different line sections, completed in 1992 [21].

The DD railway line has a double track and connects the chief town of Lazio to that of Tuscany by means of a 253.6 km long layout. The actual high speed infrastructure is, however, from Settebagni to Florence Rovezzano with an overall length of 237.5 km against 290.5 km of LL line.

Since this is a line designed for high speed, great care was taken in designing the infrastructure and systems to allow a speed of 250 km/h.

Interconnections currently present are shown in Fig. 5.

The distancing system is based on coded current automatic block with (BACC) with "Continuous Signal Repetition" (RSC) in the cabin using a 9 codes encoding and "Train Control and Monitoring System" (TCMS).

Finally, the power supply consists of a nominal voltage of 3 kV direct current in order to make the use of the line compatible and simple compared to the rest of the Italian network powered by the same electrification system thus allowing relay and movement of pre-existing motor vehicle.

It can be seen how the line represented the first step towards setting new standards for high speed lines, which differ of course in the construction policy for conventional lines with a maximum speed of 180 km/h.

Table 3 summarises the general characteristics of the "Direttissima" line, described above.

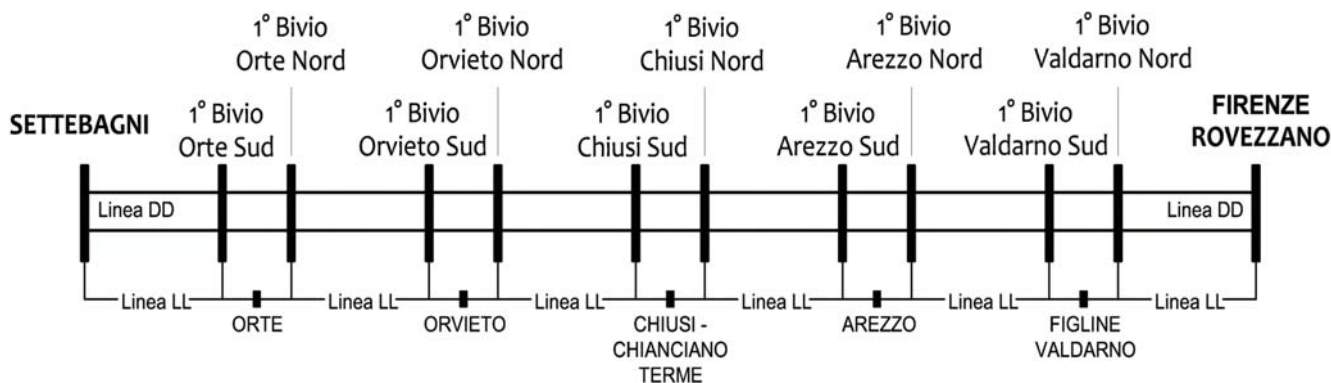


Fig. 5 - Le interconnessioni della linea DD con la linea LL.

Fig. 5 - DD line interconnections with the LL line.

ma di elettrificazione permettendo, in tal modo, l'inoltro e la circolazione dei mezzi di trazione preesistenti.

Si può evincere come tale linea abbia rappresentato il primo passo verso la definizione di nuovi standard per le linee ad alta velocità, che differiscono naturalmente dai criteri di costruzione per le linee convenzionali aventi una velocità massima di 180 km/h.

Nella Tabella 3 si riepilogano le caratteristiche generali della linea "Direttissima", descritte in precedenza.

Nella Fig. 6 viene illustrata la posizione geografica della "Direttissima" nella rete ad alta velocità italiana presente attualmente, mostrando la sua funzione strategica di collegamento per il Paese.

L'analisi dell'orario attuale permette di rilevare il numero e la tipologia dei treni che circolano sulla linea oggetto di studio. Particolare attenzione deve essere posta alla scelta del giorno da prendere come riferimento. Tale giornata deve essere rappresentativa di condizioni di circolazione che si ripetono con una certa frequenza per l'intera durata dell'orario di servizio. Si deve trattare, quindi, di un giorno feriale che non ricada, però, all'interno di periodi festivi come le feste natalizie o pasquali o all'interno di periodi di esodo come quelli estivi.

Sulla linea DD circolano treni che svolgono tre principali tipologie di servizi:

- alta velocità (nomi commerciali "Frecciarossa" (FR), "Frecciargento" (FA), ".italo" (ITA));
- intercity (denominato IC);
- regionale (denominato "Regionale Veloce" (RV)).

Con l'eccezione di pochissimi casi particolari, si possono stabilire tre sezioni di linea fondamentali per entrambe le direzioni della linea, nelle quali si hanno caratteristiche omogenee di circolazione dei treni, in termini di categorie e di utilizzo della linea DD, come si può evincere anche dalle Tabelle 4 e 5 riguardante il numero di treni circolati in una giornata:

- Settebagni - 1° Bivio Orte Sud e viceversa;
- 1° Bivio Orte Sud - 1° Bivio Valdarno Nord e viceversa;
- 1° Bivio Valdarno Nord-Firenze Rovezzano e viceversa.

Tali sezioni di linea saranno prese come riferimento per l'applicazione delle metodologie analitiche e la procedura analitico-ottimizzazione, discusse nel seguito.

Gli intervalli minimi da programmare tra due successivi utilizzi di un tratto di binario da parte di due convo-

Tabella 3 – Table 3

Caratteristiche generali della linea "Direttissima" Roma – Firenze
General characteristics of the Rome-Florence "Direttissima" line

Lunghezza del tracciato <i>Length of the layout</i>	237,5 km
Velocità massima di progetto <i>Maximum design speed</i>	250 km/h (300 km/h da Firenze Rovezzano a Chiusi Sud) 250 km/h (300 km/h from Florence Rovezzano to Chiusi Sud)
Velocità massima di esercizio <i>Maximum operating speed</i>	250 km/h
Pendenza massima <i>Maximum slope</i>	8‰ (7,5 ‰ in galleria) 8‰ (7.5% in gallery)
Interbinario <i>Space between tracks</i>	4 m (4,3 m da Firenze Rovezzano a Chiusi Sud) 4 m (4.3 m from Florence Rovezzano to Chiusi Sud)
Raggio di curvatura minimo <i>Minimum radius of curvature</i>	3.000 m (3.900 m da Firenze Rovezzano a Chiusi Sud) 3.000 m (3.900 m from Florence Rovezzano to Chiusi Sud)
Alimentazione <i>Power supply</i>	3 kV corrente continua 3 kV direct current
Sistema di segnalamento <i>Signalling system</i>	BAcc con RSC a 9 codici BAcc with 9 codes RSC
Tempo di percorrenza attuale <i>Current travel time</i>	1h 30' (da Roma Termini a Firenze S.M.N.) 1:30' (from Rome Termini to Florence S.M.N.)



(Fonte - Source: RFI - www.rfi.it)

Fig. 6 - La linea "Direttissima" nella rete ad alta velocità italiana.

Fig. 6 - The "Direttissima" line in the Italian high speed network.

Tabella 4 – Table 4

Numero e categorie di treni circolati in 24 h (orientamento pari)
 Number and classes of trains circulated in 24 h (up direction)

Settebagni - Firenze Rovezzano (orientamento pari) Settebagni-Florence Rovezzano (up direction)			
Tratta Route	Numero di treni giornaliero Number of daily trains		
	Treni AV HS Trains	Treni IC IC Trains	Treni RV RV Trains
Settebagni - 1° Bivio Orte Sud Settebagni - 1 st Orte Sud Junction	108	12	26
1° Bivio Orte Sud - 1° Bivio Valdarno Nord 1 st Orte Sud Junction - 1 st Valdarno Nord Junction	108	0	0
1° Bivio Valdarno Nord - Firenze Rovezzano 1 st Valdarno Nord Junction - Florence Rovezzano	108	7	19

gli sono denominati specifiche tecniche d'orario. È una metodologia utilizzata in Italia da RFI per la stesura dell'orario. Si tratta di elementi fondamentali per l'individuazione della capacità infrastrutturale [22].

La specifica di distanziamento S dipende dal tempo di occupazione della sezione di blocco, chiamato anche tempo di bloccamento t_b (blocking time, descritto in precedenza) nel quale la sezione è impegnata esclusivamente da un solo treno, e dal margine di regolarità m :

$$S = t_b + m$$

In definitiva, si possono ricavare per ogni categoria di treno i tempi di bloccamento in minuti, riportati nelle Tabelle 6 e 7 con riferimento ad ogni sezione di blocco costituente la linea DD, rispettivamente per l'orientamento pari e dispari. Per i treni IC e RV sono stati de-

Fig. 6 shows the geographical location of the "Direttissima" in the current Italian high speed network, showing its strategic connection role for the country.

The analysis of the current timetable allows tracking the number and types of trains running on the line being studied. Particular attention must be paid to the choice of the day to be taken as a reference. This day must be representative of traffic conditions that are repeated frequently throughout the duration of the service timetable. This must therefore be a working day that does not fall, however, in holiday periods such as Christmas or Easter or within the summer exodus.

On the DD line there are trains circulating that carry out three main types of services:

- high speed (commercial names "Frecciarossa" (FR) "Frecciargento" (FA), ".italo" (ITA));
- intercity (called IC);
- regional (called "Regionale Veloce" (RV)).

With the exception of a few special cases, three fundamental line sections can be established for both directions of the line, where we have homogeneous characteristics of train circulation in terms of categories and use of the DD line, as can be seen from Tables 4 and 5 regarding the number of trains that have circulated on a day:

- Settebagni - 1st Orte Sud Junction and viceversa;
- 1st Orte Sud Junction - 1st Valdarno Nord Junction and viceversa;
- 1st Valdarno North Junction - Florence Rovezzano and vice versa.

Tabella 5 – Table 5

Numero e categorie di treni circolati in 24 h (orientamento dispari)
 Number and classes of trains circulated in 24 h (down direction)

Firenze Rovezzano - Settebagni (orientamento dispari) Florence Rovezzano - Settebagni (down direction)			
Tratta Route	Numero di treni giornaliero Number of daily trains		
	Treni AV HS Trains	Treni IC IC Trains	Treni RV RV Trains
Firenze Rovezzano - 1° Bivio Valdarno Nord Florence Rovezzano-1 st Valdarno Nord Junction	107	9	17
1° Bivio Valdarno Nord - 1° Bivio Orte Sud 1 st Valdarno Nord Junction - 1 st Orte Sud Junction	107	0	0
1° Bivio Orte Sud - Settebagni 1 st Orte Sud Junction - Settebagni	107	12	25

These sections of the line will be taken as reference for the application of analytical methods and the analytical-optimisation procedure, discussed below.

Minimum intervals to be programmed between two subsequent uses of a track section by two trains are called timetable technical specifications. It is a methodology used in Italy by RFI for drawing up the timetable. It is fundamental to identify the infrastructural capability [22].

Distance S specification depends on the occupation time of the block section, also called blocking time t_b (blocking time, described above) in

terminati i tempi solamente per le sezioni presenti da Settebagni a 1° Bivio Orte Sud e da 1° Bivio Valdarno Nord a Firenze Rovezzano, in entrambe le direzioni. Si sottolinea che la prima ed ultima riga non fanno riferimento ad una sezione di blocco vera e propria, ma fittizia e necessaria per la partenza e l'arrivo del treno nel software di simulazione OpenTrack®.

which the section is engaged solely by a single train, and regularity margin m:

$$S = t_b + m$$

Ultimately, blocking times in minutes may be determined for each train type, shown in Tables 6 and 7 with reference to each block section of the DD line and up and down line, respectively. Times were determined for IC and

Tabella 6 – Table 6

Tempi di occupazione delle sezioni di blocco (orientamento pari)
Occupation times of block sections (up direction)

Settebagni - Firenze Rovezzano (orientamento pari) - Settebagni - Florence Rovezzano (up direction)							
Sezione di Blocco Block section		Progressiva chilometrica origine Origin progressive distance	Lunghezza Length [km]	Treno AV (rango P) HS Train (rank P)	Treno AV (rango C) HS Train (rank C)	Treno IC (rango C) IC Train (rank C)	Treno RV (rango B) RV Train (rank B)
da - from	a - to			Blocking time [min]	Blocking time [min]	Blocking time [min]	Blocking time [min]
Settebagni	P422	16,227	/	/	/	/	/
P422	P424	20,477	4,623	2,99	3,15	2,86	2,80
P424	Capena (426)	25,100	6,024	3,15	3,15	3,22	3,41
Capena (426)	P428	31,124	5,795	3,29	3,29	3,55	3,85
P428	P430	36,919	6,760	3,41	3,41	3,77	4,12
P430	P432	43,679	6,037	3,46	3,46	3,84	4,21
P432	P434	49,716	6,081	3,30	3,30	3,64	3,96
P434	PC Gallese (436)	55,797	4,513	2,94	2,94	3,18	3,39
PC Gallese (436)	1° Bivio Orte Sud (438)	60,310	4,154	2,47	2,47	3,28	2,95
1° Bivio Orte Sud (438)	P440	64,464	5,015	2,59	2,59		
P440	1° Bivio Orte Nord (442)	69,479	4,383	2,65	2,65		
1° Bivio Orte Nord (442)	P444	73,862	3,216	2,22	2,22		
P444	P446	77,078	4,396	2,22	2,22		
P446	P448	81,474	6,416	2,99	2,99		
P448	PC Civitella d'Agliano (450)	87,890	4,814	3,09	3,09		
PC Civitella d'Agliano (450)	P452	92,704	7,152	3,27	3,27		
P452	1° Bivio Orvieto Sud (454)	99,856	4,248	3,13	3,13		
1° Bivio Orvieto Sud (454)	P456	104,104	3,865	2,34	2,34		
P456	1° Bivio Orvieto Nord (458)	107,969	6,419	2,86	2,86		
1° Bivio Orvieto Nord (458)	PC Allerona (460)	114,388	6,205	3,42	3,42		
PC Allerona (460)	P462	120,593	7,513	3,69	3,69		
P462	1° Bivio Chiusi Sud (464)	128,106	6,184	3,68	3,68		
1° Bivio Chiusi Sud (464)	P466	134,290	3,315	2,67	2,67		
P466	P468	137,605	5,728	2,56	2,56		
P468	P470	143,333	6,018	3,21	3,21		
P470	1° Bivio Chiusi Nord (472)	149,351	4,529	2,92	2,92		
1° Bivio Chiusi Nord (472)	PC Montallese (474)	153,880	1,867	1,93	1,93		
PC Montallese (474)	P476	155,747	5,522	2,17	2,17		
P476	P478	161,269	4,509	2,80	2,80		
P478	P480	165,778	2,992	2,19	2,19		
P480	P482	168,770	5,379	2,40	2,40		

(segue... - follows...)

(...)

P482	P484	174,149	4,296	2,72	2,72		
P484	PC Rigutino (486)	178,445	4,286	2,45	2,45		
PC Rigutino (486)	1° Bivio Arezzo Sud (488)	182,731	6,064	2,88	2,88		
1° Bivio Arezzo Sud (488)	P490	188,795	4,728	2,98	2,98		
P490	P492	193,523	2,732	2,18	2,18		
P492	1° Bivio Arezzo Nord (494)	196,255	2,758	1,71	1,71		
1° Bivio Arezzo Nord (494)	P496	199,013	6,759	2,68	2,68		
P496	PC Ascione (498)	205,772	5,935	3,44	3,44		
PC Ascione (498)	1° Bivio Valdarno S. (500)	211,707	2,828	2,50	2,50		
1° Bivio Valdarno S. (500)	P502	214,535	6,523	2,64	2,64		
P502	PC Renacci (504)	221,058	5,690	3,32	3,32		
PC Renacci (504)	1° Bivio Valdarno N. (506)	226,748	7,676	3,60	3,60		
1° Bivio Valdarno N. (506)	PC S. Donato (508)	234,424	5,569	3,57	3,57	3,98	2,94
PC S. Donato (508)	P510	239,993	7,273	3,48	3,48	3,86	4,44
P510	512	247,266	4,436	3,57	3,67	3,78	3,99
512	Prot. PM Rovezzano	251,702	1,350	2,44	2,63	2,23	1,87
Prot. PM Rovezzano	Firenze Rovezzano	253,052	/	/	/	/	/

Tabella 7 – Table 7

Tempi di occupazione delle sezioni di blocco (orientamento disparti)
Occupation times of block sections (down direction)

Firenze Rovezzano - Settebagni (orientamento disparti) - Florence Rovezzano - Settebagni (down direction)							
Sezione di Blocco Block section		Progressiva chilometrica origine Origin progressive distance	Lunghezza Length [km]	Treno AV (rango P) HS Train (rank P)	Treno AV (rango C) HS Train (rank C)	Treno IC (rango C) IC Train (rank C)	Treno RV (rango B) RV Train (rank B)
da - from	a - to			Blocking time [min]	Blocking time [min]	Blocking time [min]	Blocking time [min]
Firenze Rovezzano	PM Rovezzano (509)	254,083	/	/	/	/	/
PM Rovezzano (509)	P507	252,903	5,597	3,15	3,35	3,35	3,32
P507	PC S. Donato (505)	247,306	6,223	4,39	4,57	4,17	3,97
PC S. Donato (505)	1° Bivio Valdarno Nord (503)	241,083	6,115	3,64	3,69	3,78	4,33
1° Bivio Valdarno Nord (503)	PC Renacci (501)	234,968	6,510	3,45	3,45		
PC Renacci (501)	P499	228,458	7,355	3,72	3,72		
P499	1° Bivio Valdarno Sud (497)	221,103	5,878	3,57	3,57		
1° Bivio Valdarno Sud (497)	PC Ascione	215,225	1,998	2,28	2,28		
PC Ascione	P493	213,227	7,411	2,65	2,65		
P493	1° Bivio Arezzo Nord (491)	205,816	5,810	3,57	3,57		
1° Bivio Arezzo Nord (491)	P489	200,006	2,327	2,35	2,35		
P489	P487	197,679	4,112	1,94	1,94		
P487	1° Bivio Arezzo Sud (485)	193,567	4,131	2,37	2,37		
1° Bivio Arezzo Sud (485)	PC Rigutino (483)	189,436	4,968	2,58	2,58		
PC Rigutino (483)	P481	184,468	5,979	3,02	3,02		
P481	P479	178,489	4,296	2,86	2,86		
P479	P477	174,193	4,577	2,52	2,52		
P477	P475	169,616	2,838	2,17	2,17		
P475	P473	166,778	5,465	2,39	2,39		

(segue... - follows...)

(...)

P473	PC Montallese (471)	161,313	4,144	2,70	2,70		
PC Montallese (471)	1° Bivio Chiusi Nord (469)	157,169	2,751	2,05	2,05		
1° Bivio Chiusi Nord (469)	P467	154,418	5,023	2,26	2,26		
P467	P465	149,395	6,020	3,04	3,04		
P465	P463	143,375	4,309	2,87	2,87		
P463	1° Bivio Chiusi Sud (461)	139,066	4,238	2,44	2,44		
1° Bivio Chiusi Sud (461)	P459	134,828	6,678	3,01	3,01		
P459	PC Allerona (457)	128,150	6,102	3,46	3,46		
PC Allerona (457)	1° Bivio Orvieto Nord (455)	122,048	6,991	3,54	3,54		
1° Bivio Orvieto Nord (455)	P453	115,057	5,488	3,39	3,39		
P453	1° Bivio Orvieto Sud (451)	109,569	4,907	2,89	2,89		
1° Bivio Orvieto Sud (451)	P449	104,662	4,762	2,71	2,71		
P449	PC Civitella d'Agliano (447)	99,900	5,713	2,91	2,91		
PC Civitella d'Agliano (447)	P445	94,187	6,253	3,27	3,27		
P445	P443	87,934	6,382	3,43	3,43		
P443	P441	81,552	4,434	2,99	2,99		
P441	1° Bivio Orte Nord (439)	193,523	2,710	2,11	2,11		
1° Bivio Orte Nord (439)	P437	196,255	4,889	2,22	2,22		
P437	1° Bivio Orte Sud (435)	199,013	4,419	2,63	2,63		
1° Bivio Orte Sud (435)	PC Gallese (433)	205,772	3,397	2,27	2,27	1,64	1,97
PC Gallese (433)	P431	211,707	5,862	2,62	2,62	2,90	2,94
P431	P429	214,535	6,081	3,26	3,26	3,59	3,89
P429	P427	221,058	6,037	3,30	3,30	3,64	3,96
P427	P425	226,748	6,760	3,46	3,46	3,84	4,21
P425	PC Capena (423)	234,424	4,388	3,07	3,07	3,35	3,60
PC Capena (423)	P421	239,993	7,431	3,23	3,23	3,55	3,85
P421	P419	247,266	4,627	3,29	3,29	3,62	3,94
P419	Prot. Settebagni	251,702	4,049	2,48	2,48	2,61	2,67
Prot. Settebagni	Settebagni	253,052	/	/	/	/	/

7. La simulazione della circolazione ferroviaria con il software OpenTrack©

Il software di simulazione ferroviaria OpenTrack©, in dotazione al Laboratorio di Trasporti dell'Università degli Studi Roma Tre, viene sviluppato alla fine degli anni novanta come progetto di ricerca all'interno dello *Swiss Federal Institute of Technology* di Zurigo [23]. È, quindi, concepito come uno strumento di supporto alla pianificazione ferroviaria per individuare soluzioni alle problematiche di circolazione ferroviaria attraverso la sua simulazione.

Si tratta di un software di simulazione sincrona che offre una rappresentazione dettagliata del traffico di treni sull'infrastruttura mediante l'interazione di essi istante per istante di tempo. Si indica, quindi, una simulazione che aggiorna nello stesso istante di tempo tutte le componenti del sistema e le riproduce nello stesso ordine con il quale sono presenti nella realtà.

RV trains only for the sections from Settebagni to 1st Orte Sud Junction and from 1st Valdarno Nord Junction to Florence Rovezzano, in both directions. It should be noted that the first and last line do not refer to a real block section but fictitious and necessary for the departure and the arrival of the train in the OpenTrack © simulation software.

7. Simulation of rail traffic with OpenTrack© software

The OpenTrack© Train simulation software, supplied to the Transport Laboratory of the Roma Tre University, was developed in the late '90s as a research project within the Swiss Federal Institute of Technology in Zurich [23]. It is, therefore, conceived as a support tool to railway planning to identify solutions to the problems of rail traffic through its simulation.

This is a synchronous simulation software that provides a detailed representation of circulation of trains on

L'architettura logica si compone di tre moduli di *Input* (infrastruttura, materiale rotabile e orario) che interagendo fra loro mediante la *Simulazione* restituiscono differenti moduli di *Output*, tra i quali l'orario grafico, i diagrammi per l'analisi cinematica, i diagrammi di occupazione dei binari, le statistiche relative ai ritardi e un'ampia varietà di dati sotto forma di tabulati per effettuare analisi a seconda della problematica che si vuole approfondire. Il cuore centrale del software è dato dalla simulazione mista discreta/continua dei treni attraverso la risoluzione numerica continua dell'equazione differenziale del moto per tutti i convogli e i processi discreti relativi allo stato dei segnali. La Fig. 7 descrive l'intero processo di funzionamento del software.

8. L'infrastruttura

Il primo passo per la costruzione del modello del sistema ferroviario prevede la definizione del layout della rete sotto forma di sezioni di blocco, deviatoti, segnali e stazioni. Per la ricostruzione dell'infrastruttura in analisi ci si basa sulla consultazione dei "Fascicoli Circolazione Linee" redatti da RFI nei quali sono specificate alcune delle informazioni necessarie al macchinista per la condotta del treno lungo una particolare linea. Il Fascicolo Linea afferente al compartimento di Roma è il n. 114 [24], mentre quello relativo al compartimento di Firenze è il n. 92 [25].

Sulla linea DD le sezioni di blocco sono non concatenate [24], [25], ovvero il segnale di prima categoria può assumere soltanto due aspetti, rosso o verde, mentre il segnale di avviso può assumere soltanto gli aspetti giallo o verde. Si tratta, quindi, di segnali di avviso isolati e tale configurazione viene riprodotta in OpenTrack®.

the infrastructure through their interaction moment by moment of time. A simulation is therefore indicated that updates all system components at the same moment in time and reproduces them in the same order in which they actually exist.

The logical architecture consists of three Input modules (infrastructure, rolling stock and schedule) that interacting between each other through Simulation return different Output modules, among which the time graph, diagrams for motion analysis, track occupation diagrams, statistics on delays and a wide variety of data in the form of printouts for more analyses depending on the problem that one wishes to investigate further. The core of the software is given by the mixed discrete/continuous simulation of trains through the continuous numerical solution of the differential equation of motion for all trains and the discrete processes relating to the status of the signals. Fig. 7 describes the entire process of software operation.

8. Infrastructure

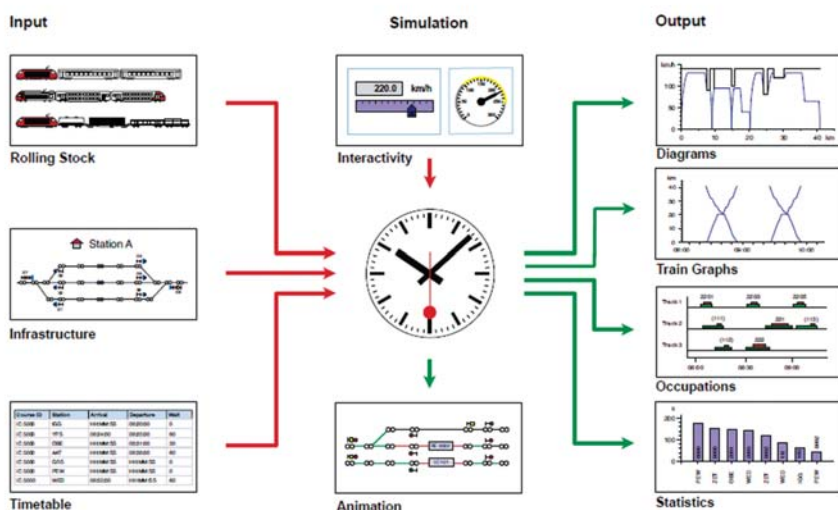
The first step in the construction of the model of the rail system provides for the laying out of the network in the form of block sections, switches, signals and stations. The reconstruction of the infrastructure under study is based on the consultation of the "Lines Circulation Dossiers" prepared by RFI that specify some of the necessary information to the driver for the conduct of the train along a particular line. The Line Dossier regarding the compartment of Rome is n. 114 [24], while that relating to the compartment of Florence is n. 92 [25].

On the DD line block sections are not linked [24], [25] or rather the main signal can take on only two aspects, red or green, while the warning signal may take on only the yellow or green aspects. It therefore concerns isolated warning signals and this configuration is reproduced in OpenTrack®.

Finally, in the case study there are only two stations for passenger services: Settebagni and Florence Rovezzano. Trains running on the high speed line do not stop in these. Other passenger stations represented in the model cover "Intercity" and "Fast Regional" services circulating partially on the DD line. These stations are Orte and Figline Valdarno that receive most of the trips reproduced in the model.

9. Rolling stock

Once the infrastructure is rebuilt the second module in the OpenTrack® software is implemented: the rolling stock.



(Fonte - Source: HUERLIMANN, NASH, 2003 [23])

Fig. 7 - L'architettura logica di OpenTrack®: Input-Simulazione-Output.
 Fig. 7 - Logical architecture of OpenTrack®: Input-Simulation-Output.

Infine, nel caso di studio si hanno soltanto due stazioni adibite a servizio passeggeri: Settebagni e Firenze Roverzano. In esse, però, non vi effettuano fermata i treni che circolano sulla linea ad alta velocità. Altre stazioni passeggeri rappresentate nel modello riguardano i servizi “Intercity” e “Regionale Veloce” che circolano parzialmente sulla linea DD. Esse sono le stazioni di Orte e Figline Valdarno che accolgono la maggior parte delle corse riprodotte nel modello.

9. Il materiale rotabile

Una volta ricostruita l'infrastruttura si procede all'implementazione del secondo modulo nel software OpenTrack©: il materiale rotabile.

I treni sono considerati come composti dall'unione di locomotive, denominate *engines*, e carrozze, denominate *trailers*. Per ogni locomotiva deve essere inserita manualmente la caratteristica meccanica di trazione, disegnando su un grafico i punti più importanti della relazione che lega la forza di trazione massima alle ruote con la velocità.

L'implementazione delle caratteristiche dei materiali rotabili è fondamentale al fine di permettere al software OpenTrack© di ricostruire i diagrammi di marcia e simulare nella maniera più fedele possibile la circolazione dei treni durante la simulazione in presenza sia di condizioni di regolarità sia in condizioni perturbate.

I convogli che circolano sulla “Direttissima” sono numerosi andando a rappresentare un'offerta di trasporto molto ampia e variegata che mette in relazione diverse località del Paese utilizzando, tutto o in parte, questo arco in comune quale è l'infrastruttura ad alta velocità.

Vengono elencati, qui di seguito, i mezzi di trazione riprodotti nella simulazione ferroviaria:

- treni AV (ETR 500, ETR 1000, ETR 600, ETR 485, ETR 575);
- treni IC (E.402B + 7 carrozze);
- treni RV (E.464 + differenti composizioni delle carrozze).

10. L'orario di servizio

Il terzo ed ultimo modulo di ingresso, necessario per lo svolgimento di una corretta simulazione, riguarda la definizione del database dell'orario di servizio.

La linea DD, in quanto infrastruttura ferroviaria, è subordinata alle attività di gestione e manutenzione da parte di RFI. L'infrastruttura è interessata dalla circolazione di treni appartenenti a due operatori ferroviari, Trenitalia e NTV. Nel prospetto di servizio degli arrivi e delle partenze dei treni, stilato da RFI per ogni stazione e comunemente chiamato M53, è possibile trovare dati riguardanti il numero del treno, la sua classificazione, la stazio-

Trains are considered to be composed of the union of locomotives, called engines, and carriages, called trailers. The mechanical traction characteristic must be manually inserted for each locomotive, by drawing the most important points on the graph of the relation binding the maximum traction force to the wheels with the speed.

The implementation of the characteristics of the rolling stock is essential in order to allow the OpenTrack© software to reconstruct the circulation diagrams and simulate as closely as possible the movement of trains during the simulation in the presence of both regularity conditions and disturbed conditions.

Trains circulating on the “Direttissima” are numerous representing a very broad and varied transport offer that connects several locations of the country using, wholly or partly, this common bow that is the high speed infrastructure.

Below is a list of traction means reproduced in the railway simulation:

- HS trains (ETR 500, ETR 1000, ETR600, ETR 485, ETR 575);
- IC trains (E.402B + 7 carriages);
- RV trains (E.464 + different compositions of the carriages).

10. Service timetable

The third and final entry module, which is necessary for conducting a successful simulation, concerns the definition of the database of the service timetable.

The DD line, as rail infrastructure, is subject to management and maintenance operations by RFI. The circulation of trains belonging to two rail operators, Trenitalia and NTV, affects the infrastructure. On the train arrivals and departures prospect, drafted by RFI for each station and commonly called M53, data concerning the train number, its classification, origin and destination station, arrival and departure time in the case of a train which is scheduled to stop at that given station, the programmed track and other information relating to the frequency of that train can be found.

Once the necessary information is gathered, the timetable can be created, called Timetable in OpenTrack©. It is based on the creation of a database that lists all the trips that one wants to simulate.

The following parameters must be defined for each trip:

- name, assigned as a category classification (FR, FA, ITA, IC, RV) followed by its number;
- itinerary or the set of routes in case there is a scale of priorities of the routes;
- rolling stock, which must be chosen among the trains previously entered;
- rank of speed;

ne di origine e di destinazione, l'orario di arrivo e di partenza nel caso di un treno del quale è prevista la fermata in quella data stazione, il binario programmato ed altre annotazioni concernenti la periodicità di quel treno.

Una volta raccolte le informazioni necessarie, si può procedere alla creazione dell'orario, denominato *Timetable* in OpenTrack®. Esso si basa sulla creazione di un database nel quale sono elencate tutte le corse che si desidera simulare.

Per ogni corsa si devono definire i seguenti parametri:

- il nome, assegnato come classificazione di categoria (FR, FA, ITA, IC, RV) seguita dal suo numero;
- l'itinerario o l'insieme di itinerari nel caso ci sia una scala di priorità degli itinerari;
- il materiale rotabile, che va scelto tra i treni inseriti in precedenza;
- il rango di velocità;
- il valore percentuale di *performance*, se il treno viaggia in orario;
- il valore percentuale di *performance*, se il treno viaggia in ritardo;
- la velocità di ingresso, se la corsa non parte da ferma. Si tratta di una funzione che viene adottata per le partenze da Settebagni e Firenze Rovezzano, dove si hanno i passaggi dei treni a differenti velocità a seconda dei ranghi ai quali sono impostati.

Il parametro di performance indica la percentuale della velocità massima ammessa su un generico tratto di linea, a seconda del rango assegnato alla singola corsa. Si può definire, così, un valore di velocità da rispettare nel caso il treno viaggi in orario o in ritardo.

Con riferimento al parametro di performance se il treno viaggia in orario, esso viene valutato con attenzione per i treni AV sulla base dell'analisi dei tempi di percorrenza deducibili dai rapporti sul movimento dei treni (moduli M42 di RFI) degli impianti di Settebagni e di Firenze Rovezzano.

Viene, infatti, individuata una distribuzione dei tempi di percorrenza per ogni direzione (pari e dispari). Il valor medio di tale distribuzione identifica il tempo da prendere come riferimento. Attraverso il software OpenTrack® vengono eseguite diverse corse prova corrispondenti a differenti valori di performance, al fine di individuare il più idoneo parametro. Ne conseguono i seguenti risultati:

- valore di performance del 91% per i treni AV percorrenti la direzione pari della linea DD, da Settebagni a Firenze Rovezzano;
- valore di performance del 97% per i treni AV percorrenti la direzione dispari della linea DD, da Firenze Rovezzano a Settebagni.

Mentre, per i treni IC e RV, data la loro velocità più bassa rispetto ai treni AV e per non penalizzare eccessiva-

- *percentage of performance, if the train travels on time;*
- *percentage of performance, if the train travels with delay;*
- *entry speed, if the trip does not start when stationary. This is a function that is adopted for departures from Settebagni and Florence Rovezzano, where trains transit at different speeds depending on their rank setting.*

The performance parameter indicates the percentage of the maximum speed allowed on a generic stretch of line, depending on the rank assigned to the single trip. A speed value to be respected if the train travels on time or late can thus be defined.

With reference to the performance parameter if the train travels on time, it is evaluated carefully for HS trains based on the analysis of travel times inferred from reports on the circulation of trains (RFI M42 modules) of the Settebagni and Florence Rovezzano stations.

A travel time distribution is in fact identified for each direction (up and down line). The mean value of this distribution identifies the time to be taken as reference. A number of test runs are performed through the OpenTrack® software corresponding to different values of performance, in order to identify the most suitable parameter. This entails the following results:

- *91% performance value for HS trains travelling on the up DD line direction, from Settebagni to Florence Rovezzano;*
- *97% performance value for HS trains travelling on the down DD line direction, from Florence Rovezzano to Settebagni.*

While, for IC and RV trains, given their lower speed compared to HS trains and in order not to penalise train circulation excessively, it is assumed they are travelling at a maximum speed allowed of 200 km/h and 160 km/h, respectively. These trains have a performance parameter equal to 100%, in both directions.

11. Summary and comparison of the results obtained of practical capacity

The RFI calculation method, as seen, leads to two individual values of practical capacity, one valid for the whole day and one relating to the rush hour, overall in the two directions of the railway line.

A "normal" distancing value on line D_n is obtained equal to 6 minutes for both directions of the DD line.

For the purposes of this study reference is made to the rush hour. We can therefore proceed to determine the theoretical hourly capacity for the DD line consisting of two tracks with unidirectional flows, as provided for in the procedure adopted by RFI:

$$C_{\text{theoretical hourly}} = 2 \cdot \left(\frac{60}{6}\right) = 20 \text{ trains/h (in the two directions)}$$

mente la circolazione ferroviaria, si ipotizza che viaggino alla massima velocità ammessa di, rispettivamente, 200 km/h e 160 km/h. A tali convogli corrisponde un parametro di performance, in entrambe le direzioni, pari al 100%.

11. Riepilogo e confronto dei risultati ottenuti di capacità pratica

Il metodo di calcolo RFI, come si è visto, conduce a due singoli valori di capacità pratica, uno valido per l'intera giornata e uno relativo all'ora di punta, complessivamente nelle due direzioni della linea ferroviaria.

Viene ricavato un valore del distanziamento "normale" in linea D_n pari a 6 minuti per entrambe le direzioni della linea DD.

Per gli scopi del presente studio si fa riferimento all'ora di punta. Si può proseguire, quindi, a determinare la capacità teorica oraria per la linea DD costituita da due binari aventi flussi unidirezionali, come prevede la procedura adottata da RFI:

$$C_{\text{teorica oraria}} = 2 \cdot \left(\frac{60}{6}\right) = 20 \text{ treni/h (nelle due direzioni)}$$

Assumendo K_f pari a 1,3 (3 livelli di velocità), si ottengono i seguenti valori di capacità commerciale:

$$C_{\text{commerciale oraria}} = \frac{20}{1,3} \text{ treni/h} = 15,4 \text{ treni/h (nelle due direzioni)}$$

$$C_{\text{commerciale oraria}} = \frac{15,4}{2} \text{ treni/h} = 7,7 \text{ treni/h (in una delle due direzioni)}$$

Nelle Tabelle 8 e 9 vengono riportati, per ogni direzione della linea, i risultati dei valori di potenzialità ottenuti con il metodo UIC 405. Il collo di bottiglia si può individuare nella tratta avente il valore di capacità pratica più basso e può essere assunto come riferimento per l'intera linea.

L'analisi dei moduli M42 di rapporto sul movimento dei treni in alcune giornate dei mesi di aprile e maggio, relativi agli impianti di Settebagni, 1° Bivio Orte Sud, 1° Bivio Valdarno Nord e Firenze Rovezzano, permette di ricavare i dati necessari a stimare il ritardo medio in ingresso e la probabilità del verificarsi di un ritardo in ingresso, elementi necessari per l'applicazione della formula di STRELE.

I dati vengono filtrati per orientamento (pari o dispari) e per categoria (treno AV, treno IC, treno RV). La procedura si articola come segue:

- gli anticipi, aventi un valore numerico negativo, vengono assunti come nulli al fine di non sottostimare l'entità del ritardo medio in ingresso;
- la media dei ritardi viene determinata, per ogni categoria, come

Assuming K_f equal to 1.3 (3 speed levels), the following commercial capacity values are obtained:

$$C_{\text{commercial hourly}} = \frac{20}{1,3} \text{ trains/h} = 15.4 \text{ trains/h (in the two directions);}$$

$$C_{\text{commercial hourly}} = \frac{15.4}{2} \text{ trains/h} = 7.7 \text{ trains/h (in one of the two directions).}$$

Tables 8 and 9 show the results of carrying capacity values obtained with the UIC 405 method, for each direction of the line. The bottleneck can be identified in the section with the lowest practical capacity value and can be taken as reference for the entire line.

The analysis on the M42 report modules on train movements in some days of April and May, related to Settebagni, 1st Orte Sud Junction, 1st Valdarno Nord Junction and Florence Rovezzano, allows obtaining the data needed to estimate the average inbound delay and the probability of occurrence of an inbound delay, elements necessary for the application of the STRELE formula.

The data is filtered according to direction (up or down line) and by category (HS train, IC train, RV train). The process is divided as follows:

- advances, with a negative numerical value, are considered as "nulls" in order not to underestimate the amount of the average inbound delay;
- the average delay is determined, for each category, as the ratio between the sum of delays and the number of trains with delay;
- the average inbound delay is calculated by weighing the average delays of individual categories, based on the number of trains delayed in each category;
- the probability of the inbound delay is calculated, for each category, as the ratio between the number of trains with delay and the total number of trains circulating in that category;
- the overall probability of the inbound delay is derived from a weighted average of the individual probabilities based on the number of trains in circulation of each category.

Tabella 8 – Table 8

Risultati ottenuti con il metodo UIC 405 (orientamento pari)
Results obtained with the UIC 405 method (up direction)

Settebagni - Firenze Rovezzano (orientamento pari) Settebagni - Florence Rovezzano (up direction)	
Tratta Route	Capacità oraria Hourly capacity
Settebagni - 1° Bivio Orte Sud Settebagni - 1 st Orte Sud Junction	10,5 treni/h 10.5 trains/h
1° Bivio Orte Sud - 1° Bivio Valdarno Nord 1 st Orte Sud Junction - 1 st Valdarno Nord Junction	12,2 treni/h 12.2 trains/h
1° Bivio Valdarno Nord - Firenze Rovezzano 1 st Valdarno Nord Junction - Firenze Rovezzano	10,3 treni/h 10.3 trains/h

- rapporto tra la somma dei ritardi e il numero di treni aventi ritardo;
- il ritardo medio complessivo in ingresso viene calcolato pesando i ritardi medi delle singole categorie, sulla base del numero di treni ritardati di ogni categoria;
 - la probabilità del ritardo in ingresso viene computata, per ogni categoria, come rapporto tra il numero di treni aventi ritardo e il numero di totale di treni circolanti di quella categoria;
 - la probabilità globale del ritardo in ingresso è ricavata da una media ponderata delle singole probabilità sulla base del numero di treni circolanti di ogni categoria.

Nelle Tabelle 10 e 11 vengono riportati, per ogni direzione della linea, i risultati dei valori di potenzialità ottenuti con il metodo basato sulla formula di STRELE. Il collo di bottiglia si può individuare, come al solito, nella tratta avente il valore di capacità pratica più basso e può essere assunto come riferimento per l'intera linea.

Nelle Figg. 8 e 9 si possono confrontare, rispettivamente per l'orientamento pari e dispari della linea, i risultati ottenuti in maniera da evidenziare le differenze nei valori ottenuti di capacità pratica e compararli con il numero di treni in circolazione previsti dall'orario attuale (Tabelle 12 e 13), nelle rispettive fasce temporali analizzate per le due direzioni della linea.

Si può notare come i risultati basati sulla formula di STRELE siano particolarmente restrittivi, in virtù dell'elevato livello di servizio richiesto essendo il ritardo complessivo tollerato pari a 8,4 minuti. Ciò conduce ad un differente tempo cuscinetto t_p basato sulla somma dei tempi di attesa non programmati; mentre il metodo UIC 405 permette la circolazione di un più elevato numero di treni basandosi sul massimo fattore di utilizzazione ammesso e pari al 75%.

Entrambi i metodi, applicati per ogni tratta nelle quali è suddivisa la linea, mostrano un valore maggiore di capacità nella tratta centrale che va da 1° Bivio Orte Sud a 1° Bivio Valdarno Nord e viceversa, dal momento che in questa sezione di linea si ha una circolazione omotachica di soli treni ad alta velocità.

Tabella 9 – Table 9

Risultati ottenuti con il metodo UIC 405 (orientamento dispari)
Results obtained with the UIC 405 method (down direction)

Firenze Rovezzano - Settebagni (orientamento dispari) <i>Florence Rovezzano - Settebagni (down direction)</i>	
Tratta <i>Route</i>	Capacità oraria <i>Hourly capacity</i>
Firenze Rovezzano - 1° Bivio Valdarno Nord <i>Firenze Rovezzano - 1st Valdarno Nord Junction</i>	11,5 treni/h <i>11.5 trains/h</i>
1° Bivio Valdarno Nord - 1° Bivio Orte Sud <i>1st Valdarno Nord Junction - 1st Orte Sud Junction</i>	12,1 treni/h <i>12.1 trains/h</i>
1° Bivio Orte Sud - Settebagni <i>1st Orte Sud Junction - Settebagni</i>	11,4 treni/h <i>11.4 trains/h</i>

Tables 10 and 11 show the results of carrying capacity values obtained with the method based on the STRELE formula for each direction of the line. The bottleneck can be identified, as usual, in the route with the lowest practical capacity value and can be taken as reference for the entire line.

In Figs. 8 and 9 the results obtained can be compared, respectively for the up and down direction of the line, in or-

Tabella 10 – Table 10

Risultati ottenuti con il metodo basato sulla formula di STRELE
 (orientamento pari)
Results obtained with the method based on the STRELE formula (up direction)

Settebagni - Firenze Rovezzano (orientamento pari) <i>Settebagni - Florence Rovezzano (up direction)</i>	
Tratta <i>Route</i>	Capacità oraria <i>Hourly capacity</i>
Settebagni - 1° Bivio Orte Sud <i>Settebagni - 1st Orte Sud Junction</i>	5,7 treni/h <i>5.7 trains/h</i>
1° Bivio Orte Sud - 1° Bivio Valdarno Nord <i>1st Orte Sud Junction - 1st Valdarno Nord Junction</i>	6,4 treni/h <i>6.4 trains/h</i>
1° Bivio Valdarno Nord - Firenze Rovezzano <i>1st Valdarno North Junction - Florence Rovezzano</i>	4,8 treni/h <i>4.8 trains/h</i>

Tabella 11 – Table 11

Risultati ottenuti con il metodo basato sulla formula di STRELE
 (orientamento dispari)
Results obtained with the method based on the STRELE formula (down direction)

Firenze Rovezzano - Settebagni (orientamento dispari) <i>Florence Rovezzano - Settebagni (down direction)</i>	
Tratta <i>Route</i>	Capacità oraria <i>Hourly capacity</i>
Firenze Rovezzano - 1° Bivio Valdarno Nord <i>Florence Rovezzano - 1st Valdarno Nord</i>	5,3 treni/h <i>5.3 trains/h</i>
1° Bivio Valdarno Nord - 1° Bivio Orte Sud <i>1st Valdarno Nord Junction - 1st Orte Sud Junction</i>	5,9 treni/h <i>5.9 trains/h</i>
1° Bivio Orte Sud - Settebagni <i>1st Orte Sud Junction - Settebagni</i>	5,6 treni/h <i>5.6 trains/h</i>

Infine, il metodo RFI si colloca in posizione intermedia tra i precedenti due metodi e fornisce un valore univoco per l'intera linea ferroviaria.

Si evince che il numero di treni circolanti attualmente sia particolarmente oneroso per realizzare una buona qualità delle operazioni di circolazione. Tuttavia, non si oltrepassano i valori forniti dal metodo UIC 405 che costituisce, di fatto, un limite superiore.

12. Riepilogo e confronto dei risultati ottenuti sul tempo di occupazione

Sulla base del numero di treni circolanti attualmente si possono condurre le successive valutazioni sul livello di congestione della linea ferroviaria.

I risultati ottenuti a valle del processo di compattazione dell'orario, come previsto dalla procedura UIC 406, sono riportati nelle Tabelle 14 e 15. Si ottengono due valori percentuali: uno relativo al tempo di occupazione, che considera esclusivamente i tempi di blocco, e l'altro relativo al consumo di capacità allo stato attuale, il quale tiene conto anche dei margini di regolarità, al fine di valutare l'eventuale presenza di capacità disponibile.

Assumendo come riferimento consigliato dall'UIC il valore del 75% per il tempo di occupazione percentuale, si può evincere che la linea nella direzione pari presenta valori leggermente inferiori al 75% per ogni tratta considerata. Per avere un quadro completo del consumo di capacità di una linea ferroviaria e della relativa capacità di-

Tabella 12 – Table 12

Numero di treni previsti dall'orario attuale (orientamento pari)
Number of trains provided for by current timetable (up direction)

Settebagni - Firenze Rovezzano (orientamento pari) Settebagni - Florence Rovezzano (up direction)	
Tratta Route	Numero di treni programmati Number of scheduled trains
Settebagni - 1° Bivio Orte Sud Settebagni - 1 st Orte Sud Junction	9,5 treni/h 9.5 trains/h
1° Bivio Orte Sud - 1° Bivio Valdarno Nord 1 st Orte Sud Junction - 1 st Valdarno Nord Junction	8 treni/h 8 trains/h
1° Bivio Valdarno Nord - Firenze Rovezzano 1 st Valdarno North Junction - Florence Rovezzano	10,5 treni/h 10.5 trains/h

Tabella 13 – Table 13

Numero di treni previsti dall'orario attuale (orientamento dispari)
Number of trains provided for by current timetable (down direction)

Firenze Rovezzano - Settebagni (orientamento dispari) Florence Rovezzano - Settebagni (down direction)	
Tratta Route	Numero di treni programmati Number of scheduled trains
Firenze Rovezzano - 1° Bivio Valdarno Nord Florence Rovezzano - 1 st Valdarno Nord Junction	11,5 treni/h 11.5 trains/h
1° Bivio Valdarno Nord - 1° Bivio Orte Sud 1 st Valdarno Nord Junction - 1 st Orte Sud Junction	9,5 treni/h 9.5 trains/h
1° Bivio Orte Sud - Settebagni 1 st Orte Sud Junction - Settebagni	10,5 treni/h 10.5 trains/h

der to highlight the differences in the values obtained of practical capacity and compare them with the number of trains in circulation provided for by the current timetable (Tables 12 and 13), in their respective time slots analysed for the two directions of the line.

We can see how the results based on the STRELE formula are particularly restrictive, by virtue of the high level of service required since the overall tolerated delay is 8.4 minutes. This leads to a different t_p time buffer based on the sum of non scheduled waiting times; while the UIC 405 method allows the circulation of a higher number of trains based on the maximum utilisation factor allowed and equal to 75%.

Both methods, applied for each route in which the line is divided, show a greater capacity value in the central section which extends from the 1st Orte Sud Junction to the 1st Valdarno Nord Junction and vice versa, since this section of the line has a homotachy circulation of only high speed trains.

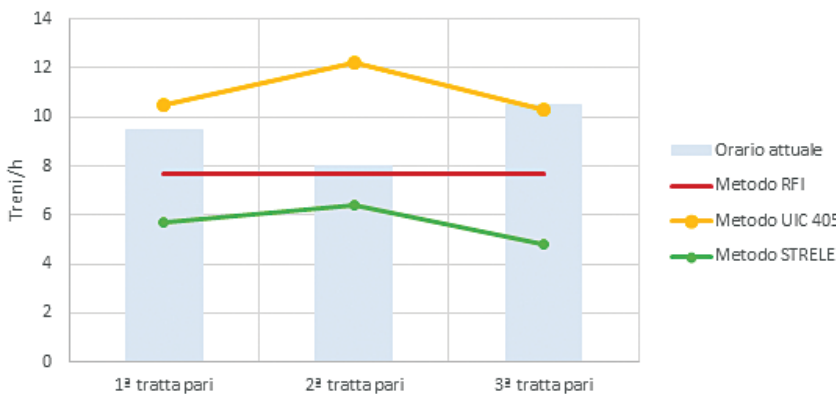


Fig. 8 – Confronto dei risultati di capacità pratica (orientamento pari).
 Fig. 8 – Comparison of the results of practical capacity (up direction).

sponibile, diventa fondamentale esaminare anche l'intera linea e non solo un'area più ristretta, al fine di evitare conclusioni errate sull'eventuale sufficienza della capacità disponibile di una linea.

La compattazione condotta globalmente presenta, invece, il raggiungimento di tale valore limite, dal momento che durante la fase di compressione si tiene conto simultaneamente della presenza di tracce relative a treni lenti nella prima e terza tratta della linea.

Nella direzione dispari, invece, si assiste a risultati più elevati e situati nell'intorno del valore consigliato per la prima e terza tratta considerata. Sull'intera linea si individua un tempo di occupazione percentuale che oltrepassa completamente quello raccomandato.

Quindi, per entrambe le direzioni, applicando il metodo UIC 406 a livello di intera linea, si raggiunge la condizione di capacità pratica.

La simulazione è una metodologia attraverso la quale è possibile riprodurre un fenomeno reale indagando quello che è il suo funzionamento e individuando le possibili strategie di miglioramento [26].

Nel caso ferroviario è possibile rappresentare la circolazione dei treni come prevista dall'orario attuale in maniera tale da determinare i valori percentuali dei tempi di occupazione delle singole sezioni di blocco che tengano conto delle differenti variabili che possono interagire con il sistema ferroviario.

Attraverso il software OpenTrack© si indaga il tempo di occupazione percentuale complessivo in ogni sezione di blocco presente sulla linea. Il software, a valle del processo di simulazione, restituisce in un file di testo i valori richiesti e calcolati sulla base dei tempi di occupazione derivanti dalla simulazione della successione di treni nella fascia temporale considerata.

Nelle Tabelle 16 e 17 si riportano i valori percentuali più alti dei tempi di occupazione per ogni tratta di linea considerata.

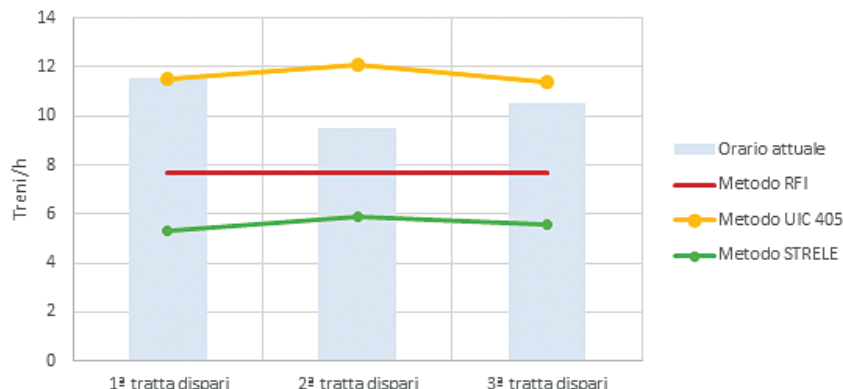


Fig. 9 – Confronto dei risultati di capacità pratica (orientamento dispari).
Fig. 9 – Comparison of the results of practical capacity (down direction).

Tabella 14 – Table 14

Risultati ottenuti con il metodo UIC 406 (orientamento pari)
Results obtained with the UIC 406 method (up direction)

Settebagni - Firenze Rovezzano (orientamento pari) Settebagni-Florence Rovezzano (up direction)		
Tratta Route	Tempo di occupazione Occupation time	Consumo di capacità Capacity consumption
Settebagni - 1° Bivio Orte Sud Settebagni - 1 st Orte Sud Junction	70%	93,1%
1° Bivio Orte Sud - 1° Bivio Valdarno Nord 1 st Orte Sud Junction - 1 st Valdarno Nord Junction	54%	71%
1° Bivio Valdarno Nord - Firenze Rovezzano 1 st Valdarno Nord Junction - Florence Rovezzano	69%	91%
Intera linea Entire line	76%	101,5%

Tabella 15 – Table 15

Risultati ottenuti con il metodo UIC 406 (orientamento dispari)
Results obtained with the UIC 406 method (down direction)

Firenze Rovezzano - Settebagni (orientamento dispari) Florence Rovezzano- Settebagni (down direction)		
Tratta Route	Tempo di occupazione Occupation time	Consumo di capacità Capacity consumption
Firenze Rovezzano - 1° Bivio Valdarno Nord Florence Rovezzano - 1 st Valdarno Nord Junction	77%	102,5%
1° Bivio Valdarno Nord - 1° Bivio Orte Sud 1 st Valdarno Nord Junction - 1 st Orte Sud Junction	63%	84%
1° Bivio Orte Sud – Settebagni 1 st Orte Sud Junction - Settebagni	74%	98%
Intera linea Entire line	84%	111%

Tabella 16 – Table 16

Risultati ottenuti mediante la simulazione della circolazione ferroviaria (orientamento pari)

Results obtained by simulating rail traffic (up direction)

Settebagni - Firenze Rovezzano (orientamento pari) Settebagni - Florence Rovezzano (up direction)		
Tratta Route	Tempo di occupazione Occupation time (8:00-10:00)	Consumo di capacità Capacity consumption (6:00-14:00)
Settebagni - 1° Bivio Orte Sud Settebagni - 1 st Orte Sud Junction	74,7%	66,7%
1° Bivio Orte Sud - 1° Bivio Valdarno Nord 1 st Orte Sud Junction - 1 st Valdarno Nord Junction	67%	53,9%
1° Bivio Valdarno Nord - Firenze Rovezzano 1 st Valdarno Nord Junction - Florence Rovezzano	77,6%	63,9%

Tabella 17 – Table 17

Risultati ottenuti mediante la simulazione della circolazione ferroviaria (orientamento dispari)

Results obtained by simulating rail traffic (down direction)

Firenze Rovezzano - Settebagni (orientamento dispari) Florence Rovezzano - Settebagni (down direction)		
Tratta Route	Tempo di occupazione Occupation time (9:00-11:00)	Consumo di capacità Capacity consumption (6:00-14:00)
Firenze Rovezzano - 1° Bivio Valdarno Nord Florence Rovezzano-1 st Valdarno Nord Junction	81,7%	58,9%
1° Bivio Valdarno Nord - 1° Bivio Orte Sud 1 st Valdarno Nord Junction - 1 st Orte Sud Junction	67,3%	43,4%
1° Bivio Orte Sud – Settebagni 1 st Orte Sud Junction - Settebagni	74,3%	54,1%

Si considera lo slot temporale che va dalle 8:00 alle 10:00 per la direzione pari e dalle 9:00 alle 11:00 per la direzione dispari per valutare il periodo di punta; per analizzare, invece, un periodo più ampio assimilabile quasi ad un periodo giornaliero, si considera la fascia temporale che va dalle 6:00 alle 14:00.

Anche in questo caso nella prima e terza tratta di entrambe le direzioni si hanno valori del tempo di occupazione percentuale prossimi al limite raccomandato dall’UIC per quanto riguarda il periodo di punta.

Mentre per il periodo definibile come giornaliero, l’UIC consiglia un valore limite pari al 60% che viene superato di poco nella prima e terza tratta, nella direzione pari. Nella direzione opposta, invece, si hanno valori leggermente inferiori sempre per la prima e terza tratta.

Nelle Figg. 10 e 11 si possono confrontare, rispettivamente per l’orientamento pari e dispari della linea, i valori ottenuti sul tempo di occupazione percentuale, con riferimento al

Finally, the RFI method is in the intermediate position between the previous two methods and provides a unique value for the entire railway line.

It is inferred that the number of circulating trains at present is particularly costly to achieve good quality of circulation operations. However, the values given by the UIC 405 method, which is in fact an upper limit, are not exceeded.

12. Summary and comparison of the results obtained on occupation time

Subsequent evaluations can be conducted on the level of congestion on the railway line on the basis of the number of trains currently circulating.

Tables 14 and 15 show the results obtained after the compaction process of the timetable, as provided for by procedure UIC 406. Two percentage values are obtained: one for the occupation time, which considers only the block times, and the other related to the current capacity consumption, which also takes into account the regularity margins, in order to assess whether there is any available capacity.

Taking the 75% value as reference recommended by the UIC for the percentage occupation time, we can see that the line in the up direction has values that are slightly lower than 75% for each section considered. To get a full picture of the capacity consumption of a railway line and its available capacity, it becomes critical to examine the entire line and not just a more restricted area, in order to avoid wrong conclusions about whether the available capacity of a line is sufficient.

Compaction conducted globally, instead, presents the achievement of this limit value, since during the compression phase the presence of train paths for slow trains in the first and third route is taken into account simultaneously.

In the down direction, however, there are higher results and around the recommended value for the first and third route considered. Along the line a percentage occupation time that completely exceeds the recommended time can be identified.

Therefore, for both directions, by applying the UIC 406 method on the entire line, the practical capacity condition is reached.

Simulation is a method through which a real phenomenon can be reproduced investigating what is its operation and identifying possible improvement strategies [26].

periodo di punta e al relativo numero di treni previsti dall'orario attuale.

Si può notare che sono presenti lievi differenze fra i due metodi adottati. I motivi possono essere ricercati nel fatto che i tempi di occupazione di ogni sezione di blocco sono stati calcolati analiticamente tenendo conto delle massime prestazioni dei treni, quindi delle massime velocità ammissibili da essi, mentre su OpenTrack® sono imputate delle percentuali di performance per tener conto delle differenti condizioni di marcia a seconda delle eventualità che si presentano lungo la linea. Pertanto, le velocità simulate possono essere di poco inferiori rispetto al limite massimo consentito sulla linea portando, quindi, a percentuali di occupazione reali maggiori di quelle teoriche.

Inoltre, la procedura di compattazione UIC 406 suggerisce di inserire come ultima traccia di chiusura della finestra temporale considerata la prima traccia inserita all'inizio di tale fascia temporale. Ciò è un motivo di discrepanza tra la procedura analitica-ottimizzazione e la simulazione.

Infine, tale metodo di compressione è basato su macrosezioni di linea valutando, così, il consumo di capacità a partire dalla prima sezione di blocco presente in tale tratta. Mentre nel software OpenTrack® si valuta, nella stessa fascia temporale, il consumo di capacità in tutte le sezioni di blocco e, successivamente, per ogni tratta di linea analizzata, si prende in considerazione la sezione di blocco avente la più alta percentuale del tempo di occupazione che comprende tutte le contingenze che possono avvenire durante la fase di simulazione.

La simulazione basata su una fedele ricostruzione dell'infrastruttura permette di ottenere valori del tempo di occupazione percentuale più realistici e accurati rispetto

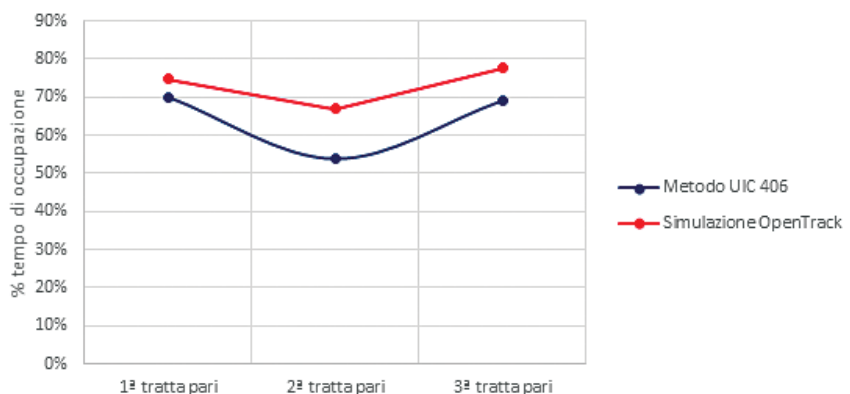


Fig. 10 – Confronto dei risultati relativi al tempo di occupazione percentuale (orientamento pari).

Fig. 10 – Comparison of results for the percentage occupation time (up direction).

In the case of rail, train circulation can be represented as provided for by the current timetable in order to determine the percentage values of the occupation times of individual block sections that take into account the different variables that can interact with the railway system.

The total percentage occupation time is investigated in each block section on the line through the OpenTrack® software. The software, downstream the simulation process, returns the required values in a text file and calculated on the basis of occupation times resulting from the simulation of succession of trains in the time range considered.

Tables 16 and 17 show the highest occupation times percentage values for each line section considered.

The time slot that ranges from 8:00 to 10:00 is considered for the up direction and from 9:00 to 11:00 for the down direction to assess the peak period; to analyse a broader period comparable almost to a daily period, the time range that goes from 6:00 to 14:00 is considered.

Even in this case in the first and third section of both directions there are percentage occupancy values close to the limit recommended by the UIC concerning the peak period.

While for the period defined as daily, the UIC recommends a limit value equal to 60% that is exceeded by a small amount in the first and third section, in the up direction. In the opposite direction, however, there are slightly lower values again for the first and third section.

In Figs. 10 and 11, respectively for the up and down direction of the line, the values obtained on the percentage occupation time can be compared, with reference to the peak period and

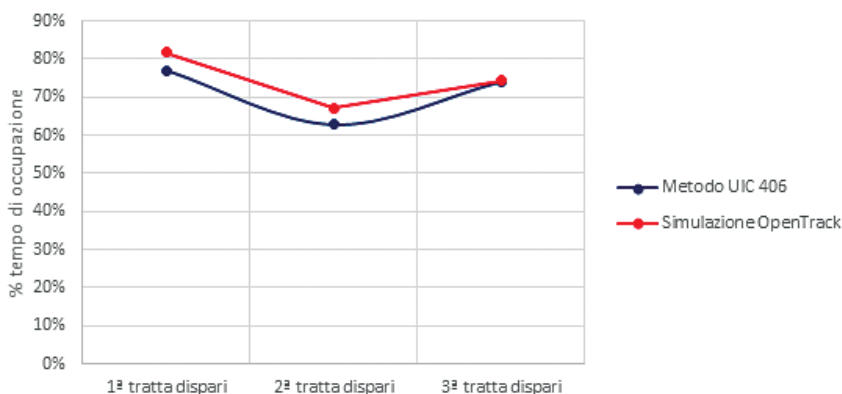


Fig. 11 – Confronto dei risultati relativi al tempo di occupazione percentuale (orientamento dispari).

Fig. 11 – Comparison of results for the percentage occupation time (down direction).

alla procedura prevista dal metodo UIC 406, dal momento che coinvolge un numero elevato di variabili. D'altro canto, la metodologia UIC 406 può rappresentare una strada diretta e veloce per la valutazione della capacità ferroviaria anche in assenza di informazioni dettagliate sull'infrastruttura e/o sull'orario di servizio.

In definitiva, si può affermare che la linea DD in entrambe le direzioni presenta un carico di treni circolanti prossimo al limite raccomandabile per assicurare un'adeguata qualità e regolarità della circolazione ferroviaria.

13. Conclusioni

La procedura UIC 406, sebbene preveda un dato in uscita riferibile al tempo di occupazione percentuale, può essere utilizzata per ottenere indirettamente il numero di treni circolanti che conduce a quel dato livello di conge-

the related number of trains provided for in the current timetable.

As can be seen there are slight differences between the two methods adopted. The reasons can be found in the fact that the occupation time of each block section were calculated analytically taking into account the maximum performance of trains, therefore their maximum permissible speeds, while on OpenTrack© performance ratios were attributed to take account of the different operating conditions depending on the possibilities that occur along the line. Therefore, simulated speeds may be slightly lower than the maximum limit allowed on the line thus leading to actual occupation percentages higher than theoretical ones.

Furthermore, the UIC 406 compacting procedure suggests introducing as last closure train path of the time frame considered the first train path introduced at the beginning of the time range. This is a cause for discrepancy between the analytical-optimisation procedure and simulation.

Finally, this compression method is based on line macro-sections thus considering the capacity consumption starting from the first block section on that section. While in the OpenTrack© software the capacity consumption in all block sections is assessed, in the same time range, and then for each line section analysed, the block section with the highest occupation time percentage that may occur during the simulation is taken into account.

The simulation based on a faithful reconstruction of the infrastructure allows obtaining more realistic and accurate percentage occupation time values compared to the procedure provided by the UIC 406 method, since it involves a large number of variables. On the other hand, the UIC 406 methodology may represent a direct and fast means for assessing rail capacity even in the absence of detailed information on the infrastructure and/or on the service timetable.

Ultimately, we can say that the DD line in both directions has a load of trains circulating close to the recommended limit to ensure adequate quality and regularity of rail traffic.

13. Conclusions

Although the UIC 406 procedure provides for a result referable to the percentage occupation time, it can

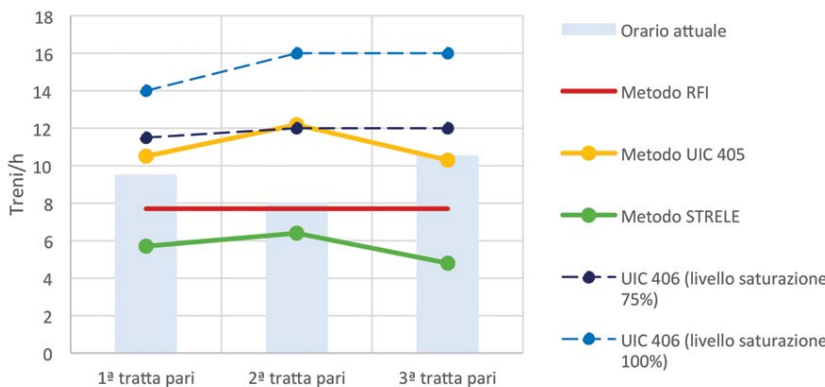


Fig. 12 – Confronto finale dei risultati ottenuti con le varie metodologie utilizzate (orientamento pari).

Fig. 12 – Final comparison of the results obtained with the various methodologies used (up direction).

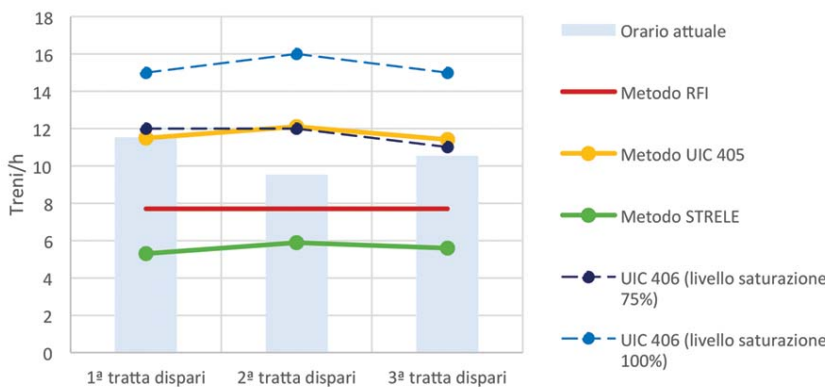


Fig. 13 – Confronto finale dei risultati ottenuti con le varie metodologie utilizzate (orientamento dispari).

Fig. 13 – Final comparison of the results obtained with the various methodologies used (down direction).

stione della linea. Si possono, così, mettere a confronto i risultati derivanti dalle metodologie analitiche che forniscono valori di capacità pratica con quelli derivanti dall'applicazione del metodo UIC 406 utilizzando il supporto del software OpenTrack©. Questi ultimi valori sono riferiti, l'uno ad un livello di saturazione del 75% per la definizione di capacità pratica, l'altro ad un livello di saturazione del 100% corrispondente ad una condizione di capacità teorica. Nelle Figg. 12 e 13 sono messi a confronto i dati in uscita delle metodologie analitiche con i due valori ottenuti attraverso la compattazione UIC 406 come appena descritto.

L'applicazione di differenti tecniche per l'individuazione della potenzialità e del consumo di capacità allo stato attuale della linea "Direttissima" Roma-Firenze ha messo in evidenza come la capacità dell'infrastruttura non derivi soltanto dall'insieme dei parametri tecnici come le caratteristiche geometriche dell'infrastruttura, le prestazioni, le strumentazioni di bordo dei convogli circolanti e il regime di circolazione con il quale è attrezzata la linea. Essa risulta influenzata anche dal modello di esercizio e dal livello di servizio che si vuole raggiungere su una linea ad alta velocità.

A tal proposito, si possono affiancare ai modelli analitici le potenzialità offerte da un software di simulazione ferroviaria. Per il caso studio si è adoperato il software OpenTrack©, attraverso il quale è stato possibile riprodurre in maniera fedele la circolazione ferroviaria sull'infrastruttura e valutare il consumo di capacità alle condizioni correnti.

La microsimulazione consente di affrontare, quindi, aspetti che dal punto di vista analitico non sarebbero trattabili agevolmente data la complessità del problema che dipende da numerose variabili. D'altronde, per eseguire correttamente la simulazione è necessario raccogliere una grande quantità di dati ed analizzarli successivamente per poter ricavare i più idonei parametri da applicare nel modello di simulazione ferroviaria.

Il confronto dei risultati conseguiti analiticamente mette in luce il fatto che si rende necessario puntare l'attenzione sui dati di input richiesti da ciascun modello. I modelli analitici sono molto sensibili alle variazioni dei parametri in ingresso e alla configurazione dei treni presente in orario.

Il metodo di calcolo RFI risulta di immediata applicazione, dal momento che si basa principalmente sul distanziamento minimo possibile tra i treni. Il modello UIC 405, invece, richiede informazioni più accurate fondate sull'orario attuale o che si desidera realizzare in relazione ad un certo livello di servizio accettabile basato sulla teoria delle code. Infine, il metodo basato sulla formula di STRELE è vincolante andando ad indagare a fondo la qualità della circolazione allo stato attuale e fornendo, così, un valore fortemente dipendente dalla regolarità che si vuole offrire.

A valle dei dati di output ottenuti è emerso come il numero di treni circolanti sulla linea DD sia prossimo al valore di capacità ottenuto con il metodo UIC 405, valore più

indirectly be used to obtain the number of trains circulating leading to that given level of congestion on the line. The results of analytical methodologies that provide practical capacity values can be compared with those resulting from the application of the UIC 406 method with the support of the OpenTrack© software. The latter values refer, one to a 75% saturation level for defining practical capacity, the other to a 100% saturation level corresponding to a theoretical capacity condition. In Figs. 12 and 13 results of analytical methodologies are compared with the two values obtained through UIC 406 compacting as just described.

The application of different techniques for the identification of carrying capacity and current state capacity consumption of the Rome-Florence "Direttissima" line has highlighted how the infrastructure capacity does not only derive from the set of technical parameters such as the geometric characteristics of the infrastructure, the performance, the instruments on board trains circulating and the traffic regulations with which the line is equipped. It is also affected by the operating model and the level of service that one wants to achieve on a high speed line.

In this regard, the carrying capacity offered by a train simulation software can be placed side by side with the analytical models. For the case study the OpenTrack© software was used through which it was possible to faithfully reproduce the rail traffic on the infrastructure and evaluate the capacity consumption at current conditions.

The microsimulation can therefore allow facing aspects that from the analytical point of view would not be easily manageable given the complexity of the problem that depends on many variables. On the other hand, to successfully run the simulation, a large amount of data must be collected and later analysed in order to obtain the most suitable parameters to be applied in the rail simulation model.

The comparison of the results obtained analytically highlights the fact that it is necessary to focus attention on the input data required by each model. Analytical models are very sensitive to changes in the input parameters and the train configuration on the timetable.

The RFI calculation method is immediately applicable, since it is based mostly on the smallest possible distance between trains. The UIC 405 model, however, requires more accurate information based on the current timetable or the one that one wants to achieve in connection with a certain level of acceptable service based on the queueing theory. Finally, the method based on the STRELE formula is binding as it investigates the quality of traffic at present and thus providing a value strongly dependent on the regularity that one would like to offer.

Downstream of the output data obtained it emerged that the number of trains running on the DD line is close to the capacity value obtained with the UIC 405 method, the

alto ottenuto tra i tre metodi analitici e correlabile ad un pessimo livello di servizio. Ciò trova conferma nei valori elevati del tempo di occupazione, con riferimento al modello di esercizio attuale. Essi sono ricavati sia con la metodologia analitica-ottimizzazione UIC 406 che attraverso la simulazione. Inoltre, il metodo UIC 406 ha mostrato un elevato consumo di capacità, sinonimo anche di un'insufficienza dei margini di tempo aggiuntivi e della mancanza di capacità disponibile per l'aggiunta di nuove tracce.

In conclusione, nel presente articolo si è visto che i metodi analitici possono essere un buon inizio per la valutazione della potenzialità di una linea ferroviaria ad alta velocità e devono essere affiancati da approcci simulativi. Questi ultimi, infatti, possono essere utilizzati, in ottica di uno studio futuro, per analizzare la risposta del sistema in presenza di una fonte di perturbazione, al fine di visualizzare la relazione intrinseca esistente tra la capacità e il livello di regolarità di una linea ferroviaria. Si tratta, quindi, di individuare il giusto compromesso tra l'offerta di trasporto e il livello di servizio desiderato per garantire la competitività del sistema di trasporto ferroviario rispetto alle altre modalità di trasporto.

highest value obtained from the three analytical methods and related to a bad service level. This is reflected in the high levels of occupation time, with reference to the current operating model. They are obtained both with the UIC 406 analytical-optimisation methodology and through simulation. In addition, the UIC 406 method showed high capacity consumption, synonymous with a lack of extra time margins and the lack of available capacity for the addition of new train paths.

In conclusion, this article has shown that analytical methods can be a good start for assessing the potential of a high speed rail line and must be supported by simulation approaches. The latter, in fact, may be used, in view of a prospective, to analyse the system response in the presence of a source of disturbance, in order to picture the intrinsic relationship between capacity and regularity level of a railway line. It therefore comes to finding the right balance between the transport offer and the service level desired to ensure the competitiveness of the rail transport system compared to other transport modes.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] ABRIL M., BARBER F., INGOLOTTI L., SALIDO M.A., TORMOS P., LOVA A., "An assessment of railway capacity", in "Transportation Research Part E", Volume 44, pp. 774-806, 2008.
- [2] KONTAXI E., RICCI S., "Tecniche e metodologie per la determinazione della capacità ferroviaria: analisi comparata e prospettive d'integrazione", in "Ingegneria Ferroviaria", a. LXIV, n.12, Dicembre 2009.
- [3] ROTOLI F., RICCI S., NAVAJAS CAWOOD E., MALAVASI G., "Procedure di valutazione di capacità/puntualità e misure di accessibilità per reti ferroviarie", in "Ingegneria Ferroviaria", a. LXX, n.12, Dicembre 2015.
- [4] BONORA G., GIULIANI L., "I criteri di calcolo di potenzialità delle linee ferroviarie", in "Ingegneria Ferroviaria", a. XXXVII, n.7, Luglio 1982.
- [5] RFI, "Metodi di calcolo della capacità delle linee ferroviarie", Dispense, Università di Pisa, 2011.
- [6] UIC Leaflet 405-1, "Method to be used for the determination of the capacity of Lines", International Union of Railways, 1983.
- [7] SCHULTZE K., GAST I., SCHWANHÄUSSER W., "SLS Plus – Einführung", Koblenz, Berlino, Germania, 2015.
- [8] SCHWANHÄUSSER W., "Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn", Tesi di dottorato, RWTH Aachen University, Aachen, Germania, 1974.
- [9] UIC Leaflet 406, "Capacity", International Union of Railways, 2^a ed., 2013.
- [10] ZENUCCHI F., "Modellazione del grado di utilizzazione dell'infrastruttura ferroviaria. Il nodo di Milano allargato", Tesi di Laurea Magistrale, Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale, Politecnico di Milano, 2013.
- [11] LORENZATO A., "Sviluppo di un indicatore congiunto di analisi della capacità e della regolarità ferroviaria", Tesi di Laurea Magistrale, Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale, Politecnico di Milano, 2014.
- [12] DICEMBRE A., "Studio della circolazione in linee e nodi complessi: l'esercizio dei corridoi ferroviari urbani", Tesi di Dottorato, Sapienza - Università di Roma, 2011.
- [13] UIC, "Influence of ETCS on the line capacity", International Union of Railways, 2008.
- [14] LANDEX A., "Methods to estimate railway capacity and passenger delays", Tesi di Dottorato, Technical University of Denmark, Copenhagen, Danimarca, 2008.
- [15] UIC Leaflet 406, "Capacity", International Union of Railways, 1^a ed., 2004.

- [16] GENOVESI P., RONZINO C.D., *"Flussi e capacità delle linee ferroviarie a doppio binario"*, in *"Ingegneria Ferroviaria"*, a. LXI, n.7-8, Luglio-Agosto 2006.
- [17] PACHL J., WHITE T., *"Analytical capacity management with blocking times"*, Transportation Research Board - 83rd Annual Meeting, Washington, DC, Stati Uniti, 2004.
- [18] RFI, *"Specifica dei requisiti di sistema SCMT - Volume 1 – Sistema"*, 2016.
- [19] MEDEOSSO G., *"Capacity and reliability on railway networks: a simulative approach"*, Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Trieste, 2010.
- [20] PACHL J., *"Railway Operation and Control"*, VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace, WA, Stati Uniti, 2002.
- [21] TOMAI F., *"Nascita e sviluppo del sistema alta velocità in Italia"*, Tesina, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcellona, Spagna, 2008.
- [22] VAGHI E., *"Le specifiche di distanziamento: il legame tra tecnologia e orario"*, in *"Ingegneria Ferroviaria"*, a. LXVIII, n.9, Settembre 2013.
- [23] HUERLIMANN D., NASH A.B., *"Railroad simulation using OpenTrack"*, Institute for Transport Planning and Systems, ETH Zurich, 2004.
- [24] RFI, Fascicolo Linea 114, capp. 6-7, 2017.
- [25] RFI, Fascicolo Linea 92, capp. 6.1-7.1, 2017.
- [26] CONFESSORE G., LIOTTA G., CICINI P., RONDINONE F., DE LUCA P., *"A simulation-based approach for estimating the commercial capacity of railways"*, Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, Austin, Texas, Stati Uniti, 2009.



InnoTrans 2018
18–21 SEPTEMBER · BERLIN
International Trade Fair for Transport Technology
Innovative Components · Vehicles · Systems
innotrans.com

LOOKING FOR RAIL INDUSTRY CAREER OPPORTUNITIES?

The future starts here at InnoTrans 2018!

- Career & Education Hall 7.1c including the Career Pavilion and the Jobwall as a central meeting point
- Direct contact with recruiters and Human Resources experts
- **Career Forum:** Theme related lectures about job profiles and career opportunities
- Guided **Career Tours** for students to the **Career Point** exhibitors in the exhibition halls
- Reduced entry for students for EUR 13.00 at www.innotrans.com/career

CP CAREER & EDUCATION

Creating a successful future together!

Contact: Lisa Simon · T +49 30 3038 2124
L.Simon@messe-berlin.de

 InnoTrans Career