

Tecniche e metodologie per la determinazione della capacità ferroviaria: analisi comparata e prospettive d'integrazione

Techniques and methodologies for carrying capacity evaluation: comparative analysis and integration perspectives

Dott. Ing. Evangelia KONTAXI(*) - Prof. Ing. Stefano RICCI(*)

SOMMARIO - L'articolo fornisce un'analisi di metodi e tecniche per la qualificazione della capacità di circolazione, classificati in riferimento ai fattori che presentano un rapporto diretto con i risultati ottenuti. Sono confrontati metodi sintetici e analitici, metodi di ottimizzazione, metodi di simulazione e loro ambienti di sviluppo.

1. Premessa

In un'epoca in cui si guarda con estremo interesse all'utilizzo ottimale, al mantenimento in efficienza ed all'adeguamento tecnologico delle risorse disponibili, assume un'importante rilievo il calcolo della capacità nella circolazione ferroviaria.

La continua crescita della domanda di trasporto ferroviario porta ad un crescente aumento dell'utilizzo delle infrastrutture ferroviarie.

Esse, intese sia come impianti sia come linee, presentano una disponibilità limitata connessa alla configurazione topologica. In particolare negli ultimi anni si presenta sempre più attuale il problema della quantificazione delle prestazioni degli impianti in modo da definire margini di capacità e tracce residue disponibili.

L'impostazione del problema, molto complessa a causa di diversi fattori, è stata oggetto di analisi sotto molteplici punti di vista.

Le metodologie esistenti si sono sviluppate dal 1950 e sono state continuamente aggiornate fino ai nostri tempi.

Molteplici fattori hanno dato spunto alla presente analisi, con l'obiettivo di offrire uno spettro delle scelte e un'integrazione dei diversi metodi.

La capacità ferroviaria, tuttavia, è un concetto difficile da definire e computare.

Le difficoltà si misurano nell'interazione numerosa dei

SUMMARY - The article provides with an analysis of methods and techniques for the qualification of the railway capacity, classified by reference to factors having a direct relationship with the obtained results. Synthetic and analytical methods, methods of optimization, simulation methods and their environments are compared and developed.

1. Introduction

In an age where particular attention is focused on the best use, the maintenance and the technological adaptation of available resources, an important emphasis is played on the calculation of capacity in rail traffic.

The continued growth of the rail transport demand leads to an increasing use of rail infrastructure, which often has a limited availability related to the topological configuration.

Especially in the recent years the importance of quantifying the performance of the network in order to define the margins of railway capacity and the paths availability has become an important theme.

The approach of the problem, very complicated because of several factors, has been analyzed in several ways.

The existing methodologies have been developed since 1950 and have been progressively updated to current times. Several factors have given inspiration to this analysis, with the aim of offering a spectrum of choices and integration of different methods. Rail capacity, however, is a difficult concept to define and compute.

The difficulties are measured in a number of factors related to the complex structure of the rail system and the conceptual and terminological variety existing.

In the present study all types of railway capacity are considered: Theoretical Capacity (TC), Practical Capacity (PC), Used Capacity (UC) and Available Capacity (AC).

(*) Sapienza Università di Roma – DITS – Area Trasporti.

(*) Sapienza Università di Roma – DITS – Area Trasporti.

fattori correlati, la struttura complessa del sistema ferroviario e la varietà concettuale e terminologica preesistenti.

Nella presente ricerca sono considerati tutti i tipi di capacità ferroviaria: Capacità Teorica (TC), Capacità Pratica (PC), Capacità Utilizzata (UC), Capacità Residua (AC).

In tale contesto l'obiettivo finale della ricerca, della quale si presentano i primi risultati consolidati, è di offrire un manuale tecnico basato sui metodi elaborati dagli anni '50 ad oggi.

2. Impostazione dello studio

I temi proposti dall'articolo sono tuttora in fase di evoluzione poiché l'argomento scelto di per sé è molto vasto e trova svariati sviluppi ed applicazioni in tutto il mondo.

La parte della ricerca inerente le metodologie di calcolo della capacità di circolazione sviluppate in Italia è stata completata e quindi si è ritenuto che proporre uno spettro di quest'analisi potesse dare un contributo alla conoscenza tecnica nel settore.

Quest'analisi avrà la sua naturale prosecuzione con l'approfondimento delle metodologie utilizzate all'estero.

La totalità dei metodi trattati supera 60 ed analogamente gli strumenti di simulazione ammontano ad un totale di 40.

Sono state anche studiate quelle tecniche di calcolo che, basandosi su precedenti lavori, apportano comunque contenuti innovativi.

La bibliografia sulla quale questa ricerca è basata è quella propria di Ingegneria Ferroviaria, con tutti gli articoli che dagli anni '50 fino ad oggi hanno trattato i temi della nostra ricerca.

Sono stati proprio questi articoli a fornire le maggiori informazioni, in particolare, sui dati in ingresso ed in uscita delle singole metodologie.

Basandosi quindi su di essi è stata creata una base dati, evidentemente non esaustiva, ma che ha permesso di "comparare" tra loro tutti gli aspetti racchiusi nel termine "capacità di circolazione".

Laddove possibile sono anche stati contattati gli autori per approfondire quanto necessitasse di maggiori chiarimenti.

A valle dell'analisi di ciascun metodo si è proceduto all'applicazione di questi su una porzione campione di rete ferroviaria per l'ottenimento di risultati che di seguito saranno oggetto di un'analisi comparata.

In particolare sono stati considerati i metodi sintetici e analitici, i metodi di ottimizzazione ed i metodi di simulazione, compresi gli ambienti di simulazione (sistemi automatizzati).

I metodi analitici modellano l'infrastruttura ferroviaria

In this context, the ultimate goal of the present research, of which the first consolidated results are presented, is to provide with a technical manual based on methods developed from the beginning of the 50's till today.

2. Study start-up

The themes proposed in this article are continuously evolving as the subject is wide and meets many developments and applications around the world.

The part of this research inherent to the methodologies developed in Italy on railway capacity calculation has been completed and, therefore, it was considered that to present a spectrum of this analysis could contribute to the technical knowledge in this field.

This analysis will have its natural continuation with the deepening of the methods used abroad.

The totality of the methods amount to 40 and similarly the simulation tools treated are over 60.

Also the techniques of calculation based on previous works which, however, provided innovative contents, have been studied.

The literature this research is based on is mainly including Ingegneria Ferroviaria, with all the items that have been treated since the '50s.

These articles provided with much information, particularly data input and output data of individual methodologies. Therefore, relying on them, a database has been created, which is clearly not exhaustive, but has allowed "comparing" all the aspects that are covered by the term "railway capacity".

Where possible, the authors were also contacted to deepen the knowledge or request more clarifications.

The technical benchmark is completed by the application of the methods to a sample portion of the rail network.

In particular, synthetic and analytical methods, methods of optimization and simulation methods, including simulation environments (automated systems) have been considered.

Analytical methods model the railway infrastructure by means of mathematical expressions in a simple way that provides results of a first approximation, the optimization methods are based on research and best saturated schedules, while simulation methods provide models capable of representing the reality in order to validate the timetable data.

Referring to these, multiple products, which normally generate timetables by simulation using the laws of motion of trains are developed and then marketed.

The analytical computation is usually performed to obtain a first indication on the railway capacity in a preliminary state.

per mezzo di espressioni matematiche in modo semplice, tale da determinare agevolmente soluzioni di prima approssimazione, i metodi di ottimizzazione sono basati sulla ricerca degli orari saturati ottimali ed i metodi di simulazione forniscono modelli capaci di rappresentare la realtà per convalidare i dati di orario.

In quest'ambito molteplici sono i prodotti sviluppati e in seguito commercializzati, i quali generano normalmente gli orari tramite simulazione usando le leggi del moto dei convogli.

La computazione analitica di solito viene eseguita per ottenere una prima indicazione sulla capacità di circolazione in uno stato preliminare. Essa avviene attraverso l'applicazione di formule matematiche e/o espressioni algebriche.

Gli Ambienti di Simulazione sono strumenti commercializzati, che offrono un'interfaccia di dialogo con l'utente e simulano la circolazione ferroviaria.

Di solito generano gli orari grafici attraverso equazioni dinamicamente definite nel tempo ad intervalli finiti. Essi possono identificare i ritardi ed analizzare le interferenze in un orario assegnato.

L'analisi dettagliata conta un totale di venticinque ambienti di simulazione fino ad oggi esaminati.

Ulteriore passo della ricerca si avrà con la formulazione e la messa a punto di uno strumento integrato caratterizzato da diversi gradi di approfondimento, utile pertanto a scopi accademici, tecnico-scientifici ed operativi.

Nel presente articolo, si propone una prima parte dei risultati ottenuti relativamente alle sole metodologie sviluppate in Italia.

3. Inquadramento cronologico

Nell'ambito europeo la presenza di metodi e/o strumenti di simulazione è molto forte, non solo in ambito accademico ma soprattutto nelle società che gestiscono il traffico e l'infrastruttura ferroviaria nonché di quelle che hanno commercializzato l'esigenza di un strumento che possa dare risposta alle varie esigenze.

Un aspetto di tale evoluzione delle metodologie e tecniche "disponibili" per la determinazione della capacità ferroviaria è che quasi la totalità di esse sono perfettamente integrate con le necessità del tempo e del contesto operativo cui sono state sviluppate ma non sempre adattabili a situazioni generali (fig. 1).

Risulta pertanto utile fornire qualche accenno a questa evoluzione nel tempo e nello spazio della totalità dei metodi analizzati nel presente articolo.

Attraverso la ricerca bibliografica per ciascuna metodologia sono stati assegnati il paese di provenienza e l'anno in cui è stata sviluppata.

Nella prima si riporta la cumulata del numero di metodologie sviluppate nel corso degli anni, che sono state

It is applied through mathematical formulas and / or algebraic expressions.

The simulation environments are tools on the market that dialogue by the user interface and simulate rail traffic. Usually they generate timetable graphs dynamically defined through equations in which the time is a fixed variable in defined intervals.

They can identify delays and analyze the interference in a given time.

A detailed analysis was carried out on a total of twenty simulation environments so far.

Further steps of research will take place with the formulation and development of an integrated instrument characterized by different degrees of detail, therefore useful for academic, technical-scientific and operational scopes.

In this article we propose a first part of the results concerning only methodologies formulated in Italy.

3. Chronological framework

In Europe the development of methods and/or simulation tools is large, not only in academic frameworks but also in companies managing railway infrastructures and traffic and also in those marketing the need for tools capable to provide with answers to their multiple needs.

One aspect of the evolution of the methods and techniques "available" for the determination of railway capacity is that almost all of them are well responding to the needs and the business environment where they have been developed but not always adaptable to more general scopes.

It is therefore useful to provide references to this evolution in time and geography for all the methods discussed in this article (figure 1).

Through literature research, for each methodology the country of origin and the development period were found.

The first image shows the cumulative number of methods developed over the years that have been studied in this research.

This trend has only indicative nature since it takes into account the established and most used methodologies in the analysis of railway capacity.

The second one represents a geographic distribution of these methodologies.

Clearly, the prevalence of the methodologies developed in Italy depends on the easy way in recovering the original texts of the studies met by the authors.

Upon completion of this research, the distribution will better reflect the European context and will provide with a spectrum analysis for each country, by contributing to the dissemination of methods and thus, indirectly, to the liberalization of the railway market.

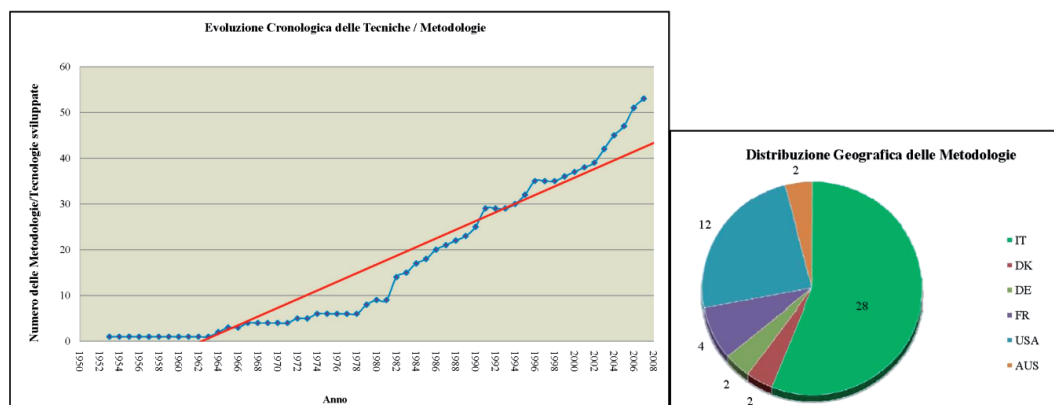


Fig. 1 - Evoluzione cronologica e distribuzione delle metodologie di calcolo della capacità ferroviaria. *Evolution and chronological distribution of the calculation methodologies for railway capacity.*

studiate nella presente ricerca.

Tale andamento ha solo un carattere indicativo poiché tiene conto delle metodologie consolidate e maggiormente utilizzate nell'analisi della potenzialità ferroviaria.

Nella seconda si vuole rappresentare una distribuzione geografica di tali metodologie. Evidentemente la prevalenza delle metodologie sviluppate in Italia dipende dalla maggiore facilità incontrata dagli autori nel recuperare i testi originali degli studi.

Al completamento della ricerca tale distribuzione rifletterà il panorama europeo, fornirà uno spettro di analisi per ciascun paese e contribuirà alla diffusione dei metodi e pertanto indirettamente alla liberalizzazione del mercato ferroviario.

4. Definizioni

4.1. Ipotesi adottate

Nel presente lavoro ci si riferisce al numero delle unità di traffico, ossia dei treni nell'unità di tempo.

Se si vuole esprimere il valore della capacità in termini di quantità di persone/oggetti trasportati sempre nell'unità di tempo, si deve introdurre il concetto di capacità nominale del sistema di trasporto, chiamata anche brevemente capacità di trasporto.

Per distinguere i due ambienti che costituiscono il sistema ferroviario, ossia le linee e gli impianti, si è deciso di utilizzare per la capacità di circolazione i termini corrispondenti di potenzialità di linea e potenzialità di impianto.

4.2. La potenzialità come capacità di circolazione

4.2.1. Rilevanza e problematiche di definizione

Nella tecnica della circolazione ferroviaria, le potenzia-

4. Definitions

4.1. Adopted assumptions

The present work refers to the number of traffic units, i.e. the number of trains running during the reference time.

In order to express the value of capacity in terms of the number of people / objects transported during the reference time, we must introduce the concept of a nominal capacity of the transport system, also called transport capacity.

This term may be referred to both the two environments making up the rail system: lines and nodes.

4.2. Carrying capacity as capability to let trains running

4.2.1. Relevance and definition

In the rail traffic technique, the capacity of lines and nodes is a key issue, since it summarizes, in numerical values, the set of functional characteristics of lines and stations themselves, combined with those of vehicles running on them.

Given the heterogeneous multitude of factors that affect that capability, it is not possible an unique definition.

4.2.2. Line Capacity

The capacity of a line is defined as the number of scheduled trains that can run on the line in the reference time.

Key elements that have a direct influence on the value of the capacity are:

- geometrical configuration of the track;
- line and stations lay-out;
- features of signalling systems;
- movement rules and corresponding minimum di-

lità delle linee e delle stazioni presentano un notevole rilievo, poiché esse riassumono in valori numerici l'insieme delle caratteristiche funzionali delle linee e delle stazioni stesse, integrate con quelle dei veicoli che vi circolano.

Data la molteplicità dei fattori eterogenei che influiscono sulla potenzialità, questa è una grandezza in genere non univocamente definibile.

4.2.2. Potenzialità di linea

La potenzialità di linea s'intende come il numero dei treni che possono circolare sulla linea nell'unità di tempo di riferimento.

Elementi fondamentali che hanno un'influenza diretta sul valore della potenzialità sono:

- configurazione plano-altimetrica del tracciato;
- configurazione del piano del ferro di linee e stazioni;
- caratteristiche degli impianti di segnalamento e sicurezza;
- regime di circolazione adottato e conseguenti intervalli di distanziamento tra i treni;
- programmi d'esercizio e di manutenzione.

4.2.3. Potenzialità di impianto

La potenzialità dell'impianto si intende come l'attitudine dell'impianto a ricevere treni nel tempo sui binari di circolazione senza attese ai segnali di protezione, costituenti di fatto le porte di ingresso della stazione.

Essa dipende dalla struttura dell'orario o meglio dalle frequenze degli arrivi, a loro volta determinate dalle condizioni tecnologiche che regolano il distanziamento sulle linee afferenti, dalla topologia dell'impianto che determina le incompatibilità e dalle caratteristiche dell'apparato.

4.3. Tipologie di capacità di circolazione

La capacità teorica è definita come il numero di treni che potrebbero percorrere una determinata sezione di linea in un intervallo prestabilito nell'ipotesi di sistema non perturbato, cioè considerando un tempo minimo di distanziamento uguale per tutte le classi di treni ed un determinato programma d'esercizio.

La capacità commerciale rappresenta la porzione reale della capacità e si calcola tenendo in considerazione il reale esercizio ferroviario e la sua interazione con lo stato della rete.

La capacità utilizzata è la capacità realmente impegnata da un determinato sistema ferroviario in definite condizioni di esercizio, ossia

stance between trains;

- operation and maintenance planning.

4.2.3. Capacity of Nodes

The capacity of a node must be considered as the capability of the node itself to receive trains on the tracks in the reference time without delays at traffic signals.

It depends on the structure of the timetable or rather by the frequency of arrivals, which regulate the minimum lines headway, the topology of the system which determines the incompatibility and the interlocking system features.

4.3. Typologies of railway capacity

The Theoretical Capacity is defined as the number of trains that could run on a certain line section in a defined reference time in case of unperturbed operation, corresponding to the headway for all classes of trains and operational programmes.

The Commercial Capacity represents the portion of the actual capacity calculated taking into account the actual operation of the railway and its interaction with the network.

The Used Capacity is the actual capacity committed by a particular rail system under certain operating conditions that is absorbed by a timetable.

The Residual Capacity is the portion of the capacity still available to meet new demands in a timetable and/or under perturbed operation.

Figure 2 shows a diagram representative of the different types of capacity.

Definizione di Capacità Ferroviaria

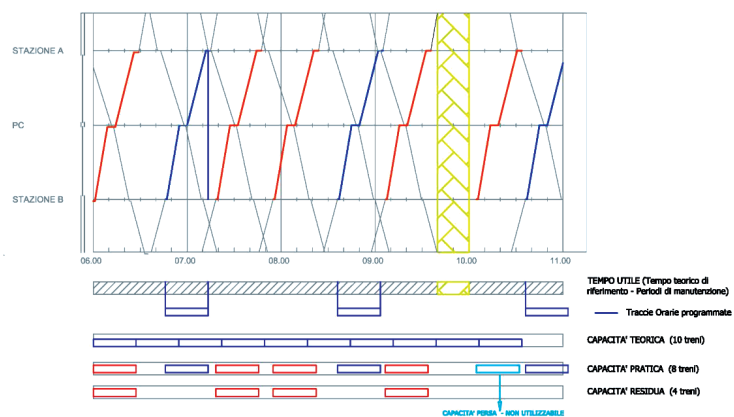


Fig. 2 - Visualizzazione grafica delle tipologie di capacità di circolazione. Graphical display of the railway capacity types.

assorbita da un programma di tracce orarie.

La capacità residua è la porzione della capacità ancora libera, disponibile per soddisfare nuove richieste in corso d'orario e/o per inoltrare in gestione operativa eventuali treni in ritardo.

Nella fig. 2 è riportato uno schema rappresentativo delle diverse tipologie di capacità.

4.4. Parametri determinanti la capacità di circolazione

4.4.1. Variabilità e parametri significativi

La capacità è dinamica e strettamente collegata con gli elementi che compongono il sistema ferroviario.

Essi hanno un'intrinseca variabilità, che si traduce in una differenziazione della capacità stessa in funzione della tipologia e delle prestazioni dei treni e dell'orario assegnato, dello stato dell'infrastruttura e delle modalità di esercizio.

Nella presente analisi sono stati considerati i parametri principali che influiscono sulla determinazione della capacità ferroviaria: parametri dell'infrastruttura, parametri operativi ed effetti dell'esercizio.

4.4.2. Parametri dell'infrastruttura

Numero dei binari di linea

Sulle linee a singolo binario si prende in esame la sezione caratterizzata dal maggiore tempo di percorrenza fra due stazioni attigue di precedenza ed incrocio.

Sulle linee a doppio binario si segue un metodo analogo a quello suesposto, con l'avvertenza di considerare separatamente i treni dell'uno e dell'altro senso di marcia e le relative sezioni di maggior percorrenza, che possono non essere coincidenti.

La prima distinzione fondamentale nelle metodologie sviluppate è dovuta alle linee a singolo e doppio binario.

L'approccio è sensibilmente diverso in quanto nel caso delle linee a singolo binario si tratta di una circolazione promiscua dei due sensi di marcia, che quindi richiede elevati margini di sicurezza.

Molte delle metodologie proposte e pubblicate su questa rivista, trattano soltanto il caso della linea a singolo binario tralasciando la relativa estensione sulle linee a doppio binario e viceversa.

Nasce così una discordanza tra i vari metodi ed una mancanza di applicazione degli stessi metodi sulle due tipologie di linee.

Distanza tra due località di servizio atte ad incroci o precedenze

La distanza tra due località atte alle operazioni d'incrocio e/o precedenza, comunemente indicate come posti di servizio è un parametro di importanza primaria.

Esso, infatti, caratterizza la sezione di blocco critica e di conseguenza condiziona tutta la linea.

4.4. Parameters determining the carrying capacity

4.4.1. Variability and relevant parameters

Capacity is dynamic and closely linked to the elements that make up the rail system.

They have an inherent variability, which is translated into a variation of the same capacity for different train typologies and performances and time allocated, the state of infrastructure and means of operation.

In this analysis the main parameters affecting the determination of capacity have been considered: infrastructure parameters, operational parameters and traffic effects.

4.4.2. Infrastructure parameters

Number of tracks

On single track lines, the section characterized by the highest travel time between two adjacent stations or intersections, is considered.

On double-track lines a similar approach may be followed, with the caution to consider separately the trains of both directions of travel and related sections of highest travel time that may not be coincident.

Therefore the first fundamental distinction in the methodologies developed is due to single/double track.

The calculation approach is nevertheless different because in the case of single-track lines the possible promiscuous movements on the two traffic directions requires higher safety margins.

Many of the proposed methodologies only address the case of single track lines neglecting its extension on double-track lines and viceversa.

The result is a discrepancy between the different methods and a lack of uniformity of these methods on two types of lines.

Distance between two crossing or passing stations

The distance between two stations with crossing or passing loops is a parameter of primary importance.

In fact it characterizes the section block and consequently affects the whole line.

The theoretical number of trains that can move through a line is defined by the block section.

Total reference time

Methodologies and techniques normally refers to the whole day or peak periods.

In the progressive evolution of these methods off-line time due to planned and unplanned maintenance was added.

Therefore the capacity over 24 hours is normally overestimated.

Theoretical speed and project speed

Theoretical speed is the one prescribed by the infra-

Il numero teorico di treni che possono circolare nell'intervallo prestabilito sulla linea è definito su questa sezione di blocco.

Tempo totale di riferimento

Nelle metodologie e tecniche sviluppate il tempo di riferimento della capacità di circolazione è sempre il giorno intero oppure il periodo di punta.

Nel progressivo evolvere di tali metodi è stato inserito il tempo dovuto alla manutenzione programmata e straordinaria e alle conseguenti interruzioni di linea.

La capacità riferita alle 24 ore tende pertanto ad essere sovrastimata.

Velocità teorica e velocità di fiancata

Per velocità teorica si intende quella prescritta dal gestore dell'infrastruttura e riportata nei fascicoli di circolazione linea distinti nei quattro ranghi di velocità, ciascuno dei quali ammette precise caratteristiche dinamiche del materiale rotabile.

La velocità di fiancata, invece, è la velocità massima con la quale un treno può percorrere un tratto di linea in funzione delle caratteristiche geometriche e costruttive della linea nonché dello stato di manutenzione della stessa.

4.4.3. Parametri operativi

Modello di esercizio

Il modello di esercizio, inteso come programmazione delle tracce orarie occupate dai treni che circolano sulla linea, assieme alle specifiche tecniche riguardanti il distanziamento spaziale e temporale ed ai perditempo consentiti per le operazioni di incrocio e precedenza, determina il tempo di percorrenza effettivo del singolo treno.

Le metodologie e tecniche per la determinazione della capacità ferroviaria si distinguono sotto quest'aspetto in due grandi categorie: le metodologie che tengono conto del numero di treni programmati e forniscono la capacità residua oppure quelli in cui il tempo di percorrenza dei treni è soltanto la media di essi, dando a volte valori sovrastimati della capacità stessa.

Caratteristiche del materiale rotabile

Le caratteristiche di trazione e di frenatura nonché la composizione determinano la marcia del treno, il conseguente spazio di frenatura richiesto e pertanto il distanziamento e la velocità pratica consentiti; il tutto è a sua volta strettamente correlato alle caratteristiche plano altimetriche della linea, oltre che ad eventuali dispositivi per compensare a bordo parte dell'accelerazione centrifuga in curva.

Tipologia di traffico

La tipologia di traffico s'intende come la ripartizione delle diverse tipologie di materiale rotabile in circolazione su una linea ferroviaria.

Il tipo, le caratteristiche di potenza e di velocità dei

structure manager on the basis of traffic modules allowing accurate dynamic characteristics of rolling stock.

The project speed is the speed with which a train can travel along a line section according to geometric features and state of the maintenance of the line.

4.4.3. Operational parameters

Operational model

The operational model, intended as paths occupied by trains on the time-space frame, in addition to the technical specifications of temporal and spatial separations between trains required for crossing and overtaking operations, determines the travel time required by each train.

Methodologies and techniques for the determination of capacity are distinguished, in this respect, into two main categories: those taking into account the number of scheduled trains and calculating the remaining capacity and those calculating an average travel time for trains and, therefore, getting an overestimation of the capacity itself.

Rolling stock features

The characteristics of both traction and braking curves and the composition of the trains determine the running time, the resulting required stopping distance and, therefore, headways and allowed speed according to the geometrical features of the line and the possible ability to partially compensate onboard the transversal acceleration.

Traffic typology

The traffic typology is defined as the distribution of different rolling stock assets running on a line.

The different performances of trains reflect on the allowed speed, normally defined in speed classes.

Many authors considered this fundamental aspect by expressing the variation of the capacity depending upon the speed classes.

Headway

The spatial distance between two following trains and therefore the length of the block sections determines the maximum traffic intensity from which the capacity itself is depending.

Many authors dealt with the relationship between headway and capacity with the adoption of a system rather than another [21] [18].

The number of trains increases as short as the intervals between them are and on the lines with block systems allowing more than one train between two stations.

4.4.4. Operational effects

Generation and propagation of delays

The delay produced by any conflict may depend upon the following factors:

- difference between the speeds of conflicting trains;

mezzi di trazione, e le caratteristiche e capacità frenanti dei convogli condizionano in maniera univocamente determinata la velocità ammissibile sulla linea.

Si distinguono così la marcia omotachica da quella eterotachica.

Molteplici sono stati gli autori che hanno considerato questo aspetto fondamentale esprimendo la variazione della capacità di circolazione in funzione delle classi di velocità.

Sistema di distanziamento

Il sistema di distanziamento e di conseguenza la lunghezza delle sezioni di blocco determina la minima distanza ammissibile fra due treni in marcia e quindi la massima intensità di traffico da cui appunto dipende la potenzialità di una linea ferroviaria.

Sono molteplici gli autori che hanno trattato il problema della potenzialità in funzione dell'adozione di un sistema di distanziamento piuttosto che un altro [21] [18].

Il numero dei treni che si seguono aumenta quanto più brevi sono gli intervalli intercorrenti tra di essi e sulle linee col blocco; tale possibilità si realizza quando esistono fra una stazione e quella successiva, uno o più posti (o segnali) di blocco intermedi, che consentano l'ammissione dello spazio compreso in dette stazioni di più di un convoglio.

4.4.4. Effetti sull'esercizio

Generazione e propagazione dei ritardi

Il ritardo prodotto da ogni interferenza dipende dai seguenti fattori:

- differenza tra le velocità dei treni coinvolti nel conflitto;
- distanziamento minimo tra due treni;
- distanza tra due successive stazioni e numero disponibile di binari per le operazioni di incrocio e precedenza;
- regole di priorità adottate per la circolazione;
- tempi per le manovre di formazione e liberazione degli itinerari nelle stazioni.

Qualità del servizio richiesta ed attesa

La qualità del servizio richiesta di norma dipende dalla tipologia di traffico e dai requisiti fissati dagli accordi fra gestori e dei servizi e gestori delle infrastrutture.

In Italia ciò si traduce in regole di priorità da rispettare nella circolazione fissate dal gestore delle infrastrutture.

5. Tecniche e metodologie di calcolo

5.1. Classificazione

Le diverse tecniche di analisi e metodologie di calcolo della potenzialità si possono suddividere in tre macro-ca-

- minimum distance between two trains;
- distance between two following stations and number of tracks available for crossing and overtaking operations;
- priority rules for running;
- time for routes manoeuvring and releasing in the stations.

Required and expected quality of service

The required quality of service normally depends upon the traffic typology and the requirements fixed in the agreements between infrastructure managers and train operators.

In Italy these requirements reflect on priority rules for rail traffic management issued by the infrastructure manager.

5. Calculation techniques and methods

5.1. Classification

The different techniques and methodologies for calculating the capacity can be divided into three main categories according to the used methodology, the compiled data and the level of detail.

They are:

Synthetic: they use deterministic expressions, i.e. the variables contained in these cannot change its state and assume fixed values during the reference time; from the mathematical point of view they are equations where the unknown quantities are mutually independent, they are also called *static*;

Analytical: they use probabilistic expressions; from the mathematical point of view they are equations where the unknown quantities are mutually dependent, they are also called *dynamic*;

Analogical: can be further divided into *asynchronous* methods (this covers methods which provide the optimization of one or more variables) and *synchronous* methods (traffic simulation), for instance the optimization methods are based on procedures looking for delays minimization in the mixed speed traffic, as well as the simulation methods represent the evolution of advanced research and are often used to validate the results of other methods.

5.2. Line capacity

5.2.1. Methodological framework

One of the first formulation adopted by the Italian State Railways (1986) [11] considers travel times and stopping times for only two categories of trains.

It has been updated by a new expression (2004) [22] adopted by Italian Rail Infrastructure Manager (RFI),

tegorie in base alla metodologia utilizzata in funzione dei dati elaborati e del livello di approfondimento.

Esse sono:

- *Sintetiche*: usano espressioni di tipo deterministico, ossia non sono in esse contenute variabili che possano cambiare stato assumendo valori prefissati durante l'arco temporale di riferimento; dal punto di vista matematico sono equazioni con incognite tra loro indipendenti; sono definite anche Statiche;
- *Analitiche*: usano espressioni di tipo probabilistico; dal punto di vista matematico sono insiemi di equazioni con incognite dipendenti una dall'altra; sono definite anche Dinamiche;
- *Analogiche*: si suddividono ulteriormente in metodi asincroni (vi rientrano i metodi che prevedono l'ottimizzazione di una o più variabili) e metodi sincroni (vi trovano collocazione i metodi di simulazione della circolazione); ad esempio i metodi di ottimizzazione sono basati su modelli operativi che cercano di calcolare e minimizzare i ritardi nella circolazione eterotachica, mentre i metodi di simulazione rappresentano gli stati evolutivi della ricerca più avanzati e vengono sovente utilizzati anche per la validazione dei risultati degli altri metodi.

5.2. Potenzialità di linea

5.2.1. Panorama metodologico

Una delle prime formulazioni adottate dalle Ferrovie dello Stato (1986) [11], considera i tempi di percorrenza e i tempi di sosta per sole due classi di treni.

Essa è stata superata da una nuova espressione (2004) [22] adottata da Rete Ferroviaria Italiana (RFI), la quale è basata sulla Fiche UIC 405.1 e consente di calcolare sia la potenzialità teorica, sia quella pratica di linea.

Il metodo utilizzato dalle ferrovie tedesche (1974) [11], che utilizza la cosiddetta Formula DB, è basata su funzioni di calcolo di tipo probabilistico dell'intervallo medio di distanziamento fra i treni, considerando soltanto due classi di velocità.

In seguito PETERSEN (1974) [4], presenta un metodo analitico per le linee a singolo binario ipotizzando una distribuzione uniforme delle partenze dei treni e tre diverse classi di velocità.

CASCETTA e NUZZOLO (1980) [7], hanno implementato tale metodo per la determinazione della potenzialità pratica di una linea con l'introduzione del calcolo dei ritardi e dell'effettiva disponibilità di binari d'incrocio e precedenza.

Il metodo proposto dall'UIC (1983) [6], determina la capacità di circolazione facendo riferimento alla sezione più critica; attraverso l'introduzione di un tempo aggiuntivo, funzione del numero di sezioni di blocco e di un margine d'incremento (calcolato attraverso la teoria delle co-

which is based on UIC 405.1 and allows to calculate both theoretical and practical capacity of a line.

The method used by the German Railways (1974) [11], which uses the so-called DB formula is based on computing probabilistic functions of the average interval distance between trains, taking into account only two speed classes.

Later PETERSEN (1974) [4] presented an analytical method for single-track lines, assuming an uniform distribution of departures of trains and three different speed classes.

CASCETTA and NUZZOLO (1980) [7] have implemented this method to determine the practical capacity of a line by introducing the calculation of delays and actual availability of tracks for crossing operations.

The method proposed by UIC (1983) [6] determines the capacity by referring to the most critical section; through the introduction of an additional time, depending on the number of block sections and an increased margin (calculated from queuing theory), the method considers the actual level of service.

A new formulation UIC (1996) allows relating capacity and quality of service. CORRIERE (1984) [9] introduced the variable "behaviour of trains" on the programmed speed, propagation of delays and various speeds, providing a vital contribution to the calculation of practical capacity.

CANCIANI (1991) [15], treats capacity of double track lines with alternating circulation, considering the delays of overhauling and thus makes possible the assessment of the maximum capacity allowed by the stations.

The same model, considered the delays of intersection, is reapplied to determine the capacity in the case of a reduction of service onto a double track line.

MALASPINA and REITANI (1995) [17] treat the double-track lines by introducing parameters such as the composition of traffic, the priority degree and the extent and impact of delays.

This method can be considered both synthetic and analytical, and introduces the likelihood that a conflict occurs.

GALAVERNA and SCIUTTO (1999) [20] introduced, in a double track line, the additional delay of overtaking manoeuvre and its probability.

The method takes inspiration from [9], however reaching a new formulation for the capacity.

DELFINO and GALAVERNA (2003) [21] have proposed a comparative analysis on the impact of fixed block and moving block on the capacity of a railway line.

Finally GENOVESE and RONZINO (2006) [23], starting from Corriere's results, introduce the delays due to planned stops and the coefficient of stability, by calculating the theoretical capacity.

de), il metodo considera il livello di servizio effettivo.

Una nuova formulazione UIC (1996) permette di porre in relazione capacità di circolazione e qualità del servizio. CORRIERE (1984) [9], introduce la variabile di comportamento dei convogli riguardo alla velocità programmata, la propagazione dei ritardi e la circolazione eterotachica, fornendo così un contributo fondamentale al calcolo della capacità pratica.

CANCIANI (1991) [15], tratta la potenzialità di circolazione delle linee ferroviarie a doppio binario con circolazione bitachica alternante, considerando il perditempo di precedenza e viene così resa possibile la valutazione della massima potenzialità di circolazione consentita dagli impianti di linea.

Lo stesso modello, considerato il perditempo di incrocio, viene riapplicato per la determinazione della potenzialità di circolazione nel caso di riduzione del servizio a binario unico su di un tratto di linea a doppio binario.

MALASPINA e REITANI (1995) [17] trattano le linee a doppio binario introducendo parametri come la composizione del traffico, il grado di priorità nella circolazione e l'entità e incidenza dei ritardi.

Questo metodo può essere considerato allo stesso tempo sintetico ed analitico ed introduce la probabilità che un conflitto si verifichi.

GALAVERNA e SCIUTTO (1999) [20] hanno introdotto su una linea a doppio binario il ritardo aggiuntivo per spostamenti di precedenza e la probabilità stessa di tale spostamento.

Il metodo prende spunto da quanto formulato [9] giungendo tuttavia ad una nuova formulazione per la capacità di circolazione.

DELFINO e GALAVERNA (2003) [21] hanno proposto un'analisi comparativa sull'impatto del blocco fisso e del blocco mobile sulla capacità di una linea ferroviaria.

Infine GENOVESI e RONZINO (2006) [23], basandosi su quanto definito da CORRIERE, introducono il perditempo dovuto alle fermate d'orario ed il coefficiente di stabilità su una linea ferroviaria calcolandone la capacità teorica.

5.2.2. Linea di test

Per effettuare test applicativi comparativi delle metodologie allo studio è stata selezionata una linea, alla quale si farà nel seguito comune riferimento.

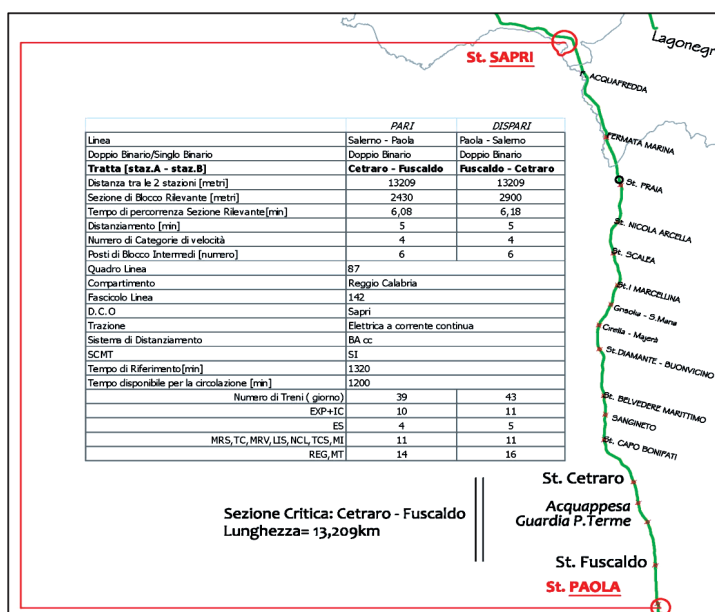


Fig. 3 - Schema riassuntivo - Dati linea di test. Data summary scheme for the test line.

5.2.2. Application

In order to perform a comparative application of the methods, it has been selected a line, which will result a common reference for the following analysis.

The choice fell on the branch Sapri-Paola (figure 3), located between the South of Campania and the North of Calabria regions, representing a part of Battipaglia-Reggio Calabria line, southern section of one of the main European north-south rail corridors and the most important rail link between Sicily, Calabria and the rest of Italy and Europe.

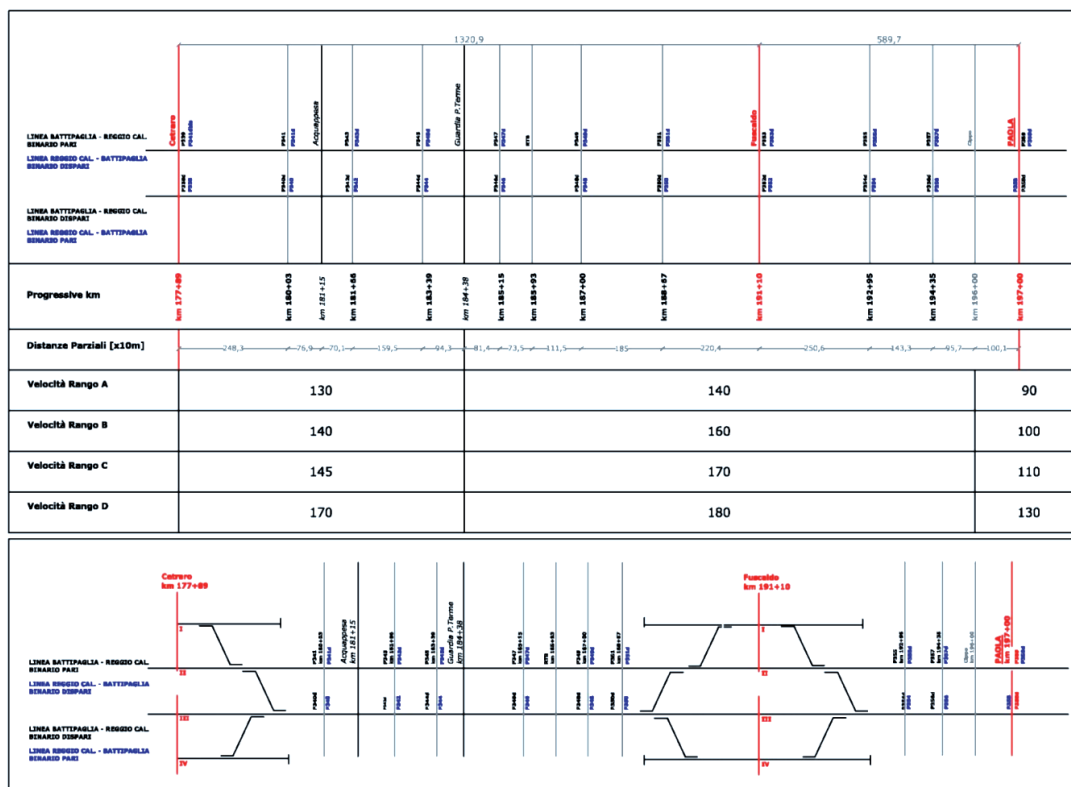
The line develops along the Tyrrhenian coast and is run by all trains coming from North and headed to Reggio Calabria and Sicily, and those coming in the opposite direction from the same corridors and to Rome and Northern Italy.

On the line run all types of passenger and freight trains.

The line was built with a single track and steam power and soon became one of the main axes of North-South rail traffic, particularly after the introduction of ferry services of rolling stock across the Messina Strait.

It was electrified in the 30's to 3000 volts DC.

After the last war the project of doubling the track and speed up the path was started.

Fig. 4 - Piano schematico della tratta ferroviaria Cetraro-Fuscaldo. *Layout of the railway branch Cetraro-Fuscaldo.*

La scelta è ricaduta sulla tratta Sapri – Paola (fig. 3), situata fra il sud della Campania (provincia di Salerno) e il nord della Calabria (provincia di Cosenza) parte della linea Battipaglia – Reggio Calabria, sezione meridionale di uno tra i principali corridoi ferroviari europei nord-sud e del più importante collegamento ferroviario tra la Sicilia, la Calabria e il resto dell'Italia e dell'Europa.

La linea è caratterizzata da un tracciato in prevalenza vicino alla costa e viene percorsa da tutti i treni provenienti da Nord e in prosecuzione per Reggio Calabria e la Sicilia, nonché da quelli provenienti in senso inverso dalle stesse direttrici e diretti a Roma o verso altri grandi centri del nord dell'Italia.

Sulla linea corrono tutte le tipologie di treni passeggeri, dai regionali agli Eurostar e treni merci di varie categorie.

La linea venne costruita a semplice binario e a trazione a vapore e divenne presto uno degli assi portanti del traffico ferroviario Nord-Sud anche in seguito al servizio di traghettamento dei rotabili attraverso lo Stretto di Messina.

Venne elettrificata negli anni '30 a 3000 volt a corrente continua.

The selected branch, with an overall length of 92.2 kilometres, has 11 stations including the extremes and 9 intermediate stops.

The critical section, with a total length of 13.2 kilometres, is between the stations Fuscaldo and Cetraro, with the presence of two intermediate stops: Acquappesa and Guardia Piemontese Terme.

Figure 4 shows the schematic plan of the critical section, subject of applications of the various methods hereby described.

5.2.3. Synthetic methods

FS formula [11]

The method is based on different formulations.

Referring to the one shown on VICUNA [13], it takes the following expression:

$$P = (N_{pr} + \frac{T-t-\theta}{p_k + t_m}) \cdot K_{FS}$$

Nel dopoguerra venne avviato il progetto di raddoppio del binario e della velocizzazione del tracciato.

La tratta, di lunghezza complessiva di 92,2 km, è dotata di 11 stazioni comprese le capo tronco e le 9 fermate intermedie. La sezione critica, di lunghezza complessiva pari a 13,2 km è quella tra Cetraro e Fuscaldo con la presenza di due fermate intermedie: Acquappesa e Guardia Piemontese Terme.

Nella fig. 4 si riporta il piano schematico della sezione critica, oggetto delle applicazioni delle diverse metodologie suesposte.

5.2.3. Metodi sintetici

Formula FS [11]

Il metodo denominato FS è basato su varie formulazioni.

Facendo riferimento a quella riportata su VICUNA [13] assume la seguente espressione:

$$P = \left(N_{pr} + \frac{T - t - \theta}{p_k + t_m} \right) \cdot K_{fs}$$

nella quale tutti i tempi sono espressi in minuti ed inoltre si hanno:

- N_{pr} somma dei treni che circolano sulla linea in esame (preesistenti);
- T periodo di riferimento;
- t tempo di sospensione del servizio dovuto alla manutenzione;
- θ intervallo di tempo complessivamente coperto dai treni che circolano sulla linea;
- p_k tempo di percorrenza della sezione rilevante da parte del k-esimo treno;
- t_m tempo morto relativo a ciascun treno inerente alle operazioni di distanziamento;
- K_{fs} coefficiente di rendimento minore di 1 ed adimensionale.

Nel calcolo del numero in parentesi della formula è necessario porre attenzione alla somma $(p_k + t_m)$, in quanto presenta un valore minimo definito dal tempo di distanziamento dato dalle specifiche tecniche.

Considerando il caso della linea di test e variando fra i suoi limiti estremi di 0.6 ÷ 0.8 il solo parametro K_{fs} si ottiene che il valore della potenzialità che ne risulta può variare fino al 25% (fig. 5).

Variando, invece, il tempo morto nell'arco dei valori ammissibili (1 ÷ 3,5 minuti) si osserva come la potenzialità si riduca fino al 26% rispetto al valore massimo (fig. 6).

La formula non tiene conto dell'eterotachicità del traffico. Infatti, per valutare la potenzialità di circolazione di

in which all times are expressed in minutes and is also:

- N_{pr} sum of trains running on the line under consideration (existing);
- T reference period;
- t time of suspension of service due to maintenance;
- θ total time covered by trains running on the line;
- p_k travel time of the relevant section by the train k ;
- t_m downtime for setting the train route;
- $K_{fs} < 1$ dimensionless effectiveness coefficient.

In calculating the number in parentheses it is necessary to pay attention to the sum $(p_k + t_m)$, which has a minimum value defined by the minimum headway.

For the test line and by varying the only parameter K_{fs} in the range 0.6 ÷ 0.8, it is obtained that the value of the resulting capacity can vary up to 25% (figure 5).

At the same time, by varying the downtime for setting the routes in the range 1 ÷ 3.5 minutes, the capacity may be reduced up to 26% (figure 6).

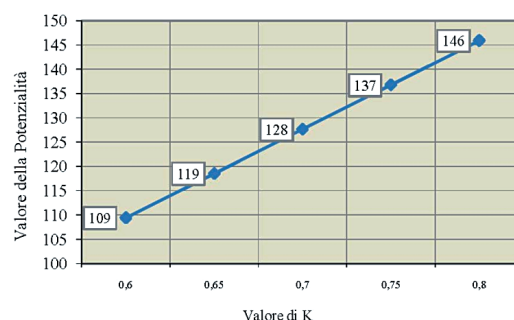


Fig. 5 - Variazione della potenzialità in funzione del coefficiente K . Variation of capacity [trains/day] as a function of the K_{fs} coefficient.

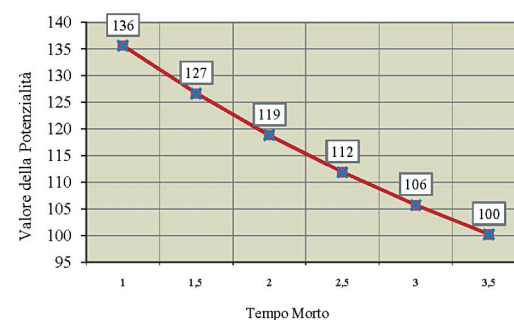


Fig. 6 - Variazione della potenzialità [treni/giorno] in funzione del tempo morto [minuti]. Variation of capacity [trains/day] as a function of downtime [minutes].

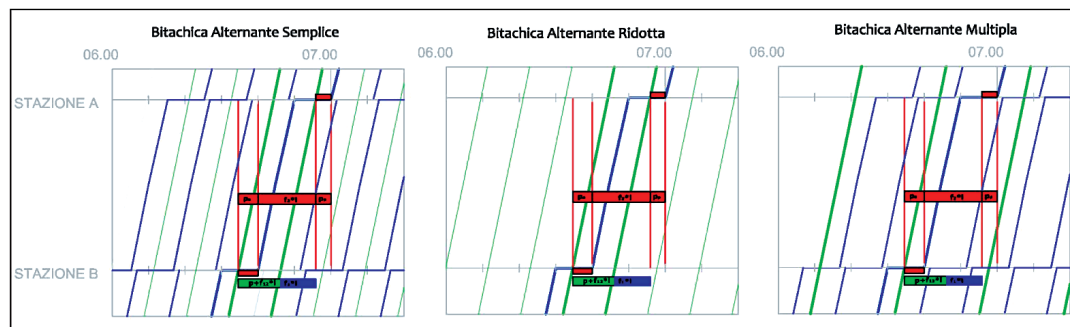


Fig. 7 - Potenzialità e tipologia di alternanza della circolazione secondo CINCIANI. *Traffic alternation according to CINCIANI.*

una linea ferroviaria percorsa da traffico con velocità diverse non è sufficiente fare riferimento alla sezione di blocco (termine p_k della formula su esposta) ma è necessario considerare un tratto di linea fra due stazioni di precedenza.

Metodo di CINCIANI [15]

CINCIANI, basandosi su quanto stabilito da TOLOTTI, tratta la potenzialità di circolazione delle linee ferroviarie a doppio binario con circolazione bitachica alternante considerando il perditempo di precedenza. La circolazione bitachica alternante definisce uno schema in cui i treni appartengono in egual numero a sole due classi di velocità (veloci e lenti) e fra queste si alternano (fig. 7). In aggiunta, tramite la definizione del perditempo di incrocio, viene elaborato un metodo di calcolo della potenzialità nel caso di riduzione del servizio a binario unico su di un tratto di linea a doppio binario.

La formula assume la seguente espressione:

$$P = \frac{T}{p + (f_{12} \cdot l)} \cdot n$$

nella quale:

- p è il tempo minimo per effettuare una precedenza in arrivo ed in partenza;
- $[f_{12} \cdot l]$ è il tempo perso per effetto eterotachico (ritardo di circolazione);
- f_{12} è pari alla differenza fra gli inversi delle velocità dei treni lenti (v_2) e veloci (v_1)
- n tiene conto della quantità di treni lenti che circolano durante l'intervallo temporale fra 2 treni veloci (tipo di alternanza della circolazione bitachica, come definito in fig. 7).

Considerando la linea di test ed applicando quanto su esposto, si ottiene (fig. 8) l'andamento della potenzialità di circolazione in funzione del tipo di alternanza della circolazione ipotizzata e del ritardo di circolazione.

The formula does not take into account the heterogeneous traffic.

In order to calculate the capacity of a line run by different speeds traffic, it is not sufficient to consider the block section (p_k term of the formula outlined above) but a larger section including two stations in advance.

CINCIANI Method [15]

CINCIANI, on the basis of what was determined by TOLOTTI, treats the capacity of double-track lines with alternating movement of two classes of speed considering the delay time due to overtaking.

In this scheme the two speed classes (fast and slow) have the same train number and are alternated in between them (figure 7).

Additionally, a method for calculating the delays due to crossing in the event of a degraded service of a double track into single track is defined.

The formula takes the following expression:

$$P = \frac{T}{p + (f_{12} \cdot l)} \cdot n$$

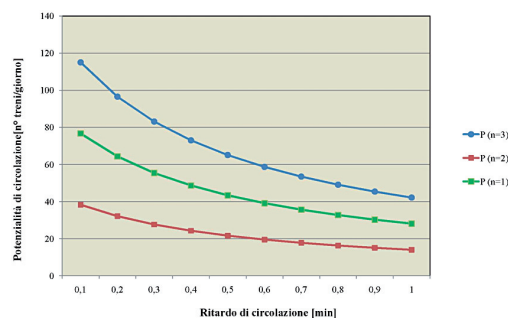


Fig. 8 - Andamento della potenzialità di circolazione in funzione del tipo di alternanza della circolazione. *Capacity as a function of the generated delay.*

Formula RFI [22]

Il metodo considera valori ricavati secondo un intervallo medio di distanziamento minimo dei treni maggiorato di margini di ampliamento e di tempi supplementari.

I margini di ampliamento consistono in pratica in una maggiorazione di 1/3 nel caso della potenzialità oraria e di 2/3 in quella giornaliera, mentre i tempi supplementari sono calcolati in base al numero di stazioni presenti sulla linea in esame (0,25 minuti per impianto).

In sostanza il calcolo della potenzialità, che acquista valori decrescenti al crescere della tratta, viene effettuato in base a valori di distanziamento dei treni superiori al minimo ricavati in base all'esperienza.

Il metodo definisce la Capacità Teorica (CT) e la Capacità Commerciale (CM).

Per i binari utilizzati con flussi unidirezionali la Capacità Teorica è calcolata secondo le seguenti formule:

- Capacità Teorica Giornaliera: $CTG = \frac{N \cdot 1320}{Dn}$;

dove con Dn si indica il tempo di distanziamento in linea indicato come "normale" nello scenario tecnico; qualora esso debba essere derivato dal tempo di sblocco, quest'ultimo deve essere calcolato sulla sezione rilevante considerando il tempo medio di percorrenza, ovvero in prima approssimazione il tempo percorso alla velocità di rango A, trascurando in quest'ultimo caso gli eventuali allungamenti di percorrenza.

La capacità commerciale è inferiore a quella teorica in base al coefficiente K che tiene conto del numero dei livelli di velocità commerciale presenti sulla linea ossia i cosiddetti livelli di eterotachicità.

La formula è la seguente:

- Capacità Commerciale Giornaliera: $CMG = \frac{CTG}{K}$;

Per i binari utilizzati con flussi bidirezionali la Capacità Teorica è calcolata secondo la seguente formula:

- Capacità Teorica Giornaliera: $CTG = \frac{1320}{Td + z}$;

dove con Td si indica il tempo necessario a percorrere alla velocità di impostazione dei treni meno veloci (rango A) la sezione rilevante, senza considerare gli eventuali allungamenti di percorrenza e con z il tempo di incrocio indicato dallo scenario tecnico.

La capacità commerciale è inferiore a quella teorica in base al coefficiente K che tiene conto del numero dei livelli di velocità commerciale presenti sulla linea, ossia i cosiddetti livelli di eterotachicità.

- Capacità Commerciale Giornaliera: $CMG = \frac{CTG}{K_1}$;

where:

- p is the minimum time to perform an overtaking in arrival and departure;
- $[f_{12} \cdot l]$ is the time lost due to heterogeneous speed (traffic delay);
- f_{12} is the difference between the inverse of the speed of slow (v_s) and fast (v_f) trains;
- n takes into account the amount of slow trains running between two fast trains (type of traffic alternation, as defined in figure 7).

Considering the test line and applying the expression above, we obtain (figure 8) the development of capacity related to the type of traffic alternation and the generated delay.

RFI formula [22]

The method treats values drawn up in a medium headway plus margin expansion and extra time.

The margins consist in increasing 1/3 the hourly capacity and 2/3 the daily capacity, with extra time calculated according to the number of stations on the line (0.25 minutes per station).

The calculation of capacity, which assumes decreasing values with block sections length, is carried out according to distances between following trains longer than the minimum spacing of trains derived from the operational experience.

The method defines the theoretical (CT) and the commercial (CM) capacity.

For single line tracks theoretical capacity is calculated using the following formulas:

- Daily Theoretical Capacity: $CTG = \frac{N \cdot 1320}{Dn}$;

where:

Dn indicates the line's headway defined as "normal" in the technical scenario, if it should be derived from the time of release, this should be calculated on the critical section considering the average running time, i.e. in a first approximation the running time at rank A, neglecting, any dilation.

The commercial capacity is lower than the theoretical one due to the coefficient K , which takes into account the variety of the commercial speeds.

The formula is as follows:

- Daily Commercial Capacity: $CMG = \frac{CTG}{K}$;

For bidirectional tracks the theoretical capacity is calculated using the following formula:

- Daily Theoretical Capacity: $CTG = \frac{1320}{Td + z}$;

where

Td indicates the time required to travel at the speed of

TABELLA 1 – TABLE 1

VALORI DEI COEFFICIENTI K E K₁ PER LA FORMULA RFI
VALUES OF COEFFICIENTS K AND K₁ FOR THE RFI FORMULA

Livello di velocità Speed level	1	2	3	4	5
K	1,2	1,4	1,5	1,8	1,9
K ₁	1	1,3	1,3	1,5	1,5

I Valori dei Coefficienti K e K₁ sono riportati nella tabella 1.

Considerando la linea di test ed applicando quanto su esposto si ottengono le percentuali di potenzialità residua nel passaggio da Capacità Teorica a Capacità Commerciale per i binari unidirezionali e bidirezionali riportati nella fig. 9.

Per quanto riguarda invece i valori assoluti si rimanda alla fig. 18.

Nella figura 10 si riporta il peso dei flussi bidirezionali sulla capacità di circolazione.

5.2.4. Metodi analitici

Metodo di BIANCHI [1,3]

BIANCHI nel suo primo contributo (1964) applica la teoria delle file d'attesa (teoria delle code) analizzando la distribuzione degli intervalli fra i treni e dei tempi di servizio, offrendo così un contributo alle relazioni intercorrenti fra la potenzialità di circolazione e le caratteristiche d'impianto e di esercizio di linee a doppio e semplice binario, valutando l'influenza derivante da una circolazione promiscua di treni di diversa importanza, con diritti di priorità degli uni sugli altri in caso di precedenza e d'incrocio.

Viene inoltre introdotto il parametro "vuoti della circolazione" per tener conto che, per effetto delle precedenza dei treni più veloci su quelli più lenti, si provocano dei brevi periodi di inutilizzabilità di tratti di linea.

La potenzialità di circolazione di una linea a doppio binario è espressa tramite la:

$$W = \frac{\rho \cdot U \cdot (1 - \delta_p) \cdot (1 + \varepsilon)}{p_x \cdot (1 + \varepsilon \cdot \eta)}$$

nella quale:

- ρ è il coefficiente di utilizzazione;
- ε è il rapporto tra il numero dei treni lenti (non prioritari) ed il numero dei treni veloci (prioritari);
- η è il rapporto fra le percorrenze dei treni lenti (non prioritari) e quelle dei treni veloci (prioritari);
- δ_p è il rapporto fra il complesso dei vuoti di circola-

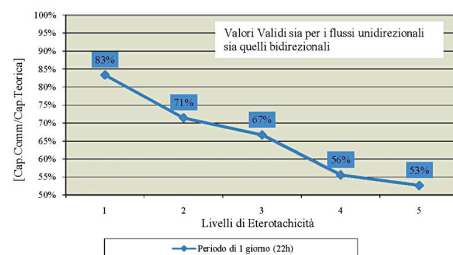


Fig. 9 - Rapporto tra la capacità teorica e residua in funzione delle classi di velocità. Values of coefficients K and K₁ for the RFI formula.

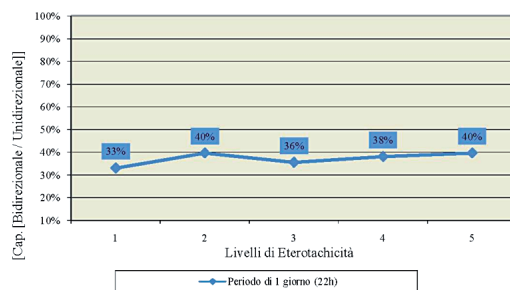


Fig. 10 - Peso dei flussi unidirezionali e bidirezionali sulla capacità. Bidirectional / Unidirectional capacity as a function of the number of speed classes.

the slowest trains (rank A) the relevant section, without regard to any lengthening of distance; and z dilation for crossing manoeuvres.

In this case is:

$$\bullet \text{ Daily Commercial Capacity: } CMG = \frac{CTG}{K_1};$$

The values of coefficients K and K₁ are shown in table 1.

For the test line and applying what has been exposed, the percentage of potential residual capacity in the transition from theoretical capacity to commercial capacity for unidirectional and bidirectional tracks are shown in figure 9.

The absolute values will be summarised ahead (figure 18).

5.2.4. Analytical methods

BIANCHI Method [1, 3]

In his first contribution (1964) BIANCHI applies the queuing theory analyzing the distribution of intervals between trains and service times, thus providing a contribution to the relationships between capacity and characteristics of tracks lay-out and operation of double and single track lines, by taking into consideration the influence of the promiscuous running of trains with reciprocal priori-

zione ed il periodo disponibile;

- p_x è il tempo di percorrenza dei treni prioritari;
- U è il periodo utile per la circolazione.

Nel caso di una linea a singolo binario si ottiene un'espressione del tutto analoga.

Il metodo proposto è basato sull'ipotesi di distribuzione esponenziale dei treni e quindi i risultati ottenuti sono più vicini a quelli reali quando si applica per un periodo di tempo sufficientemente lungo.

E' possibile il confronto fra i risultati ottenuti con questo metodo e quello analogo che non considera la variazione dei tempi di servizio con la teoria delle code, secondo il quale la potenzialità di circolazione sia data dalla

$$W = \frac{K \cdot (T - R)}{Pm} = \frac{K \cdot U}{Pm}$$

nella quale :

- K è il coefficiente empirico di correzione, inferiore ad 1, con il quale si intende tener conto della disuniforme distribuzione dei treni nel periodo considerato e dell'effettivo andamento della circolazione;
- Pm è la media dei tempi di percorrenza;
- T, R, U sono rispettivamente, il periodo di tempo considerato, gli intervalli necessari per la manutenzione della linea ed il periodo utile per la circolazione.;

Si ottiene il grafico riportato nella fig. 11.

In seguito lo stesso autore, nel suo contributo del 1967, ha esteso la precedente analisi attraverso l'inserimento del calcolo dei ritardi dovuti alla precedenza di un treno lento verso un treno veloce sulle linee a doppio binario. In particolare due tipologie di distribuzione delle precedenze sono state considerate: la distribuzione uniforme e la distribuzione casuale. L'incremento della percorrenza pura del treno lento per effetto delle precedenze è dato dalla seguente formula:

$$I_l = \frac{W_v \cdot r_m \cdot (\eta - 1)}{\eta \cdot (U - W_v \cdot r_m)}$$

nella quale :

- W_v è il numero dei treni veloci;
- r_m è il valore medio dei ritardi dei treni lenti;
- η è il rapporto fra le percorrenze dei treni lenti (non prioritari) ed il numero dei treni veloci (prioritari).

Formula DB [11]

Le ferrovie federali tedesche (DB) hanno messo a punto un metodo per la quantificazione della potenzialità delle linee, anch'esso di tipo probabilistico e basato su principi analoghi a quelli del metodo UIC, seppure con alcune

ty rights in case of crossing and overtaking.

It is also introduced the parameter "traffic interruption" to take into account that, due to the fastest trains overtaking, brief periods of broken operation happens.

The capacity of a double track line is expressed by

$$W = \frac{\rho \cdot U \cdot (1 - \delta_p) \cdot (1 + \varepsilon)}{p_x \cdot (1 + \varepsilon \cdot \eta)}$$

where:

- ρ is the utilisation rate;
- ε is the ratio between the number of slow trains (non-priority) and the number of fast trains (priority);
- η is the ratio between the reciprocal distances of slow trains (non-priority) and fast trains (priority);
- δ_p is the ratio of the complex movement of the interruptions and the period available;
- p_x is the running time of priority trains;
- U is the operation period.

In case of a single track line the capacity is obtained by an almost similar expression.

The proposed method is based on the assumption of exponential distribution of trains arrivals, therefore the results are closer to the reality when applied for a sufficiently long period of time.

It is possible to compare the results obtained with this method and those which does not consider variation in service times with queuing theory, which states that the potential for movement is given by:

$$W = \frac{K \cdot (T - R)}{Pm} = \frac{K \cdot U}{Pm}$$

where:

- K is the empirical coefficient of correction, less than 1, by which means tender account of the uneven di-

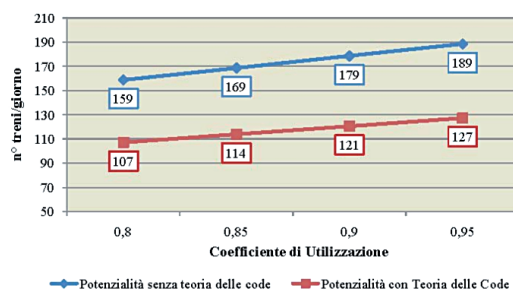


Fig. 11 - Confronto tra l'applicazione del metodo di BIANCHI con e senza considerare la variazione del tempo di servizio. Application of the method of BIANCHI with the determination of capacity values by utilisation rate.

significative peculiarità.

L'espressione della potenzialità riferita all'intera giornata è in questo caso:

$$P = \frac{T}{t_{fm} \cdot (1 + q)}$$

nella quale:

- t_{fm} è il valore medio degli intervalli di minimo di stanziamento fra le coppie di treni;
- q è il tempo cuscinetto, che tiene conto della situazione d'orario e dei parametri di qualità voluti; esso va calcolato attraverso la definizione di due parametri (grado di fluidità e fattore di trasferimento), nonché l'utilizzo di abachi che mettono in relazione questi tre fattori di seguito riportati in fig. 12.

Per il calcolo di t_{fm} si considerano in questo caso due categorie di treni, veloci (v) e lenti (l) e si utilizza in questo caso l'espressione:

$$t_{fm} = \frac{(t_{vv} \cdot n_v^2) + (t_{vl} \cdot n_v \cdot n_l) + (t_{lv} \cdot n_v \cdot n_l) + (t_{ll} \cdot n_l^2)}{(n_v + n_l)^2}$$

In letteratura è anche disponibile una formulazione semplificata della formula DB, di seguito riportata, la quale si riferisce a particolari condizioni di esercizio:

$$P = \frac{435}{t_{fm}}$$

Tale formula corrisponde alla definizione di un valore del tempo cuscinetto pari a 2,03 minuti.

Per evidenziare l'importanza di tale fattore, indicando con c il numeratore della seconda formulazione semplificata ($c = 435$) si può analizzare l'andamento di tale costante in funzione del tempo cuscinetto (fig. 13).

Metodo UIC [6]

Alla categoria dei metodi analitici appartiene il procedimento di calcolo della UIC riportato in una prima edizione nella Fiche 405R del 1978.

L'espressione della potenzialità riferita all'intera giornata è in questo caso:

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

nella quale:

- t_{fm} è l'intervallo minimo medio espresso in minuti;
- t_r è il cosiddetto margine di ampliamento;
- t_{zu} è un tempo supplementare che tiene conto del numero delle sezioni di blocco sul tratto di linea in esame espresso in minuti; tale tempo è calcolato attri-

bution of trains during the period and the actual performance of movement;

- Pm is the average of travel times;
- T, R, U are respectively the time period, the ranges required for the maintenance of the line and the grace period for the movement.

This leads to the plot shown in figure 11.

Consequently the same author, in his contribution of 1967, extended the previous analysis by including the calculation of delays caused by the priority of a train slow to a fast train on the lines of double track. In particular two types of distribution have been considered: the uniform distribution and random distribution. The increase in pure running time of a slow due to overtakings is given by the following formula:

$$I_l = \frac{W_v \cdot r_m \cdot (\eta - 1)}{\eta \cdot (U - W_v \cdot r_m)}$$

where:

- W_v is the number of fast trains;
- r_m is the average delays of slow trains;
- η is the ratio between the distances run by slow trains (non-priority) and the number of fast trains (priority).

DB formula [11]

The German Federal Railways (DB) have developed a probabilistic method for the quantification of the capacity of railway lines, based on principles similar to the UIC approach, albeit with some significant peculiarities.

The expression of the capacity for whole day is in this case:

$$P = \frac{T}{t_{fm} \cdot (1 + q)}$$

where:

- t_{fm} is the average value of the minimum headways between two following trains;
- q is the buffer time, which takes into account the timetable situation and the desired quality to be calculated by setting two parameters (degree of fluidity and transfer factor), and the use of diagrams linking these three factors in figure 12.

For the calculation of t_{fm} two types of trains are considered in this case, the two speed classes *rapid* (v) and *slow* (l) and the expression which is used is the following:

$$t_{fm} = \frac{(t_{vv} \cdot n_v^2) + (t_{vl} \cdot n_v \cdot n_l) + (t_{lv} \cdot n_v \cdot n_l) + (t_{ll} \cdot n_l^2)}{(n_v + n_l)^2}$$

In literature a simplified formulation of the DB formu-

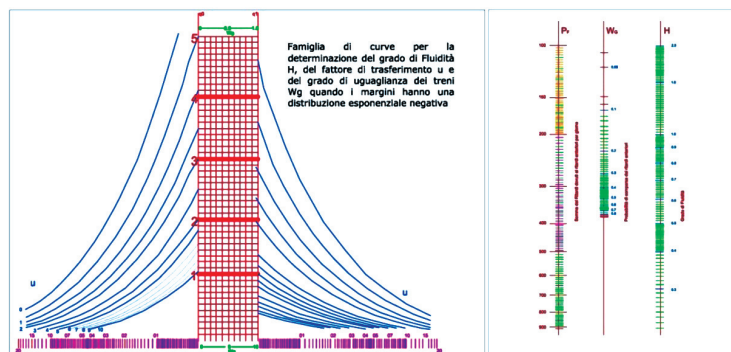


Fig. 12 - Parametri per la definizione dei margini di regolarità nel metodo DB. *Parameters defining the margins of regularity in the DB method.*

verso l'espressione: $t_{su}=0,25 \cdot a$ dove a è il numero dei posti di blocco intermedi della sezione rilevante.

In questo metodo il margine di ampliamento nella somma dei tempi riportati nel denominatore è di fondamentale importanza, in quanto racchiude in sé l'applicazione della teoria delle code e quindi l'impostazione di un livello di servizio ben preciso. Tale margine infatti, è strettamente collegato all'intensità di traffico

data dall'espressione $\Psi = \frac{t_{fm}}{t_{fm} + t_r}$ a cui corrisponde un numero α di treni che subiscono ritardo.

Di conseguenza la condizione minima ammissibile è $\Psi \leq \frac{t_{fm}}{t_{fm} + t_r}$ da cui si ricava $t_r \geq \beta \cdot t_{fm}$

La relazione tra questi molteplici fattori è evidenziata dal grafico riportato nella fig. 14.

Per il calcolo dell'intervallo medio di distanziamento bisogna definire due matrici di uguale dimensione contenenti:

- la quantità dei casi di successione dei treni, ripartite secondo classi di tempi di percorrenza;
- i tempi di occupazione nei diversi casi di successione dei treni.

Nella fig. 15 sono riportati in forma grafica i tempi medi di successione dei treni nei diversi casi (pari-pari, pari-dispari, dispari-dispari, dispari-pari).

Il prodotto delle due matrici fornisce la matrice dei tempi di occupazione complessivi. La somma di tutti gli elementi di questa matrice fornisce il tempo giornaliero

la è also available, as below, which refers to specific operating conditions:

$$P = \frac{435}{t_{fm}}$$

This formula corresponds to the definition of a buffer time of 2.03 minutes.

To highlight the importance of this factor, indicating c the numerator of the second simplified formulation ($c = 435$), the evolution of this constant as a function of the buffer time can be analyzed (figure 13).

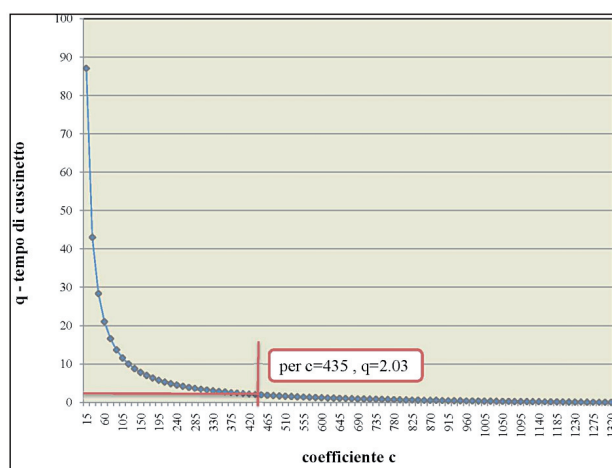


Fig. 13 - Variazione del tempo cuscinetto in funzione del numeratore della formula DB semplificata. *Variation of buffer time as a function of the c on the numerator of DB simplified formula.*

UIC method [6]

This method belongs to the category of analytical methods as reported in the first edition (1978) of the calculation procedure reported in a UIC Fiche 405R

The expression of the capacity for the whole day is:

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

where:

- t_{fm} is the average minimum headway;
- t_r is the so-called expansion margin;

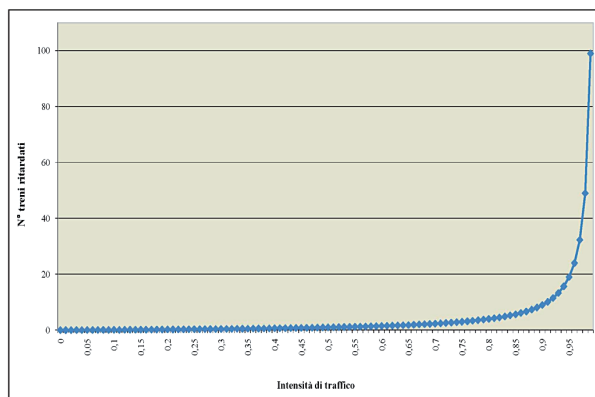


Fig. 14 - Relazione tra intensità di traffico e numero di treni ritardati.
Amount of delayed trains as a function of traffic intensity.

totale di occupazione dell'infrastruttura ed il rapporto tra quest'ultimo ed il numero dei casi di successione si ottiene l'intervallo medio di distanziamento dei treni.

Tale metodo è stato superato successivamente dalla 405-2I del 1983 e dalla 406R del 2004.

Metodo di CORRIERE 1982 [8]

CORRIERE (1982) ha proposto un metodo che tiene conto dell'effetto dei ritardi in analogia al fenomeno del deflusso in sede propria.

La formulazione proposta riguarda l'analisi delle entità dei ritardi alla presenza di cause perturbatrici quali precedenza e/o incroci, descrivendo anche la relazione capacità-velocità in presenza del ritardo. CORRIERE considera le sole cause ritardanti di tipo casuale.

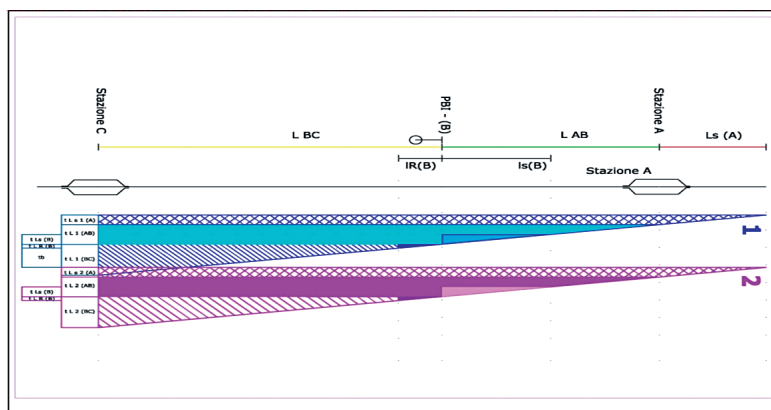


Fig. 15 - Tempi di successione dei treni nel calcolo del metodo della UIC. Sequence of trains in the UIC capacity calculation method.

- t_{zi} is an extra time taking into account the number of block sections on the concerned line section calculated through the expression $t_{zi} = 0.25 \cdot a$, where a is the number of intermediate block sections within the relevant line section.

In this method the attribute the expansion margin is a key parameter; as it includes the application of the queuing theory aimed to define a level of service corresponding to the calculated capacity value.

This margin is in fact closely related to the intensity of traffic given by the following expression

$$\Psi = \frac{t_{fm}}{t_{fm} + t_r} \text{ corresponding to certain amount } \alpha$$

of delayed trains.

The minimum acceptable condition is $\Psi \leq \frac{t_{fm}}{t_{fm} + t_r}$

that means $t_r \geq \beta \cdot t_{fm}$.

The relationship between these multiple factors is highlighted by the graph in figure 14.

To calculate the average headway two arrays of equal size must be defined containing:

- the number of cases of succession of trains, broken down by classes of travel times;
- headways in the various cases of trains succession.

Figure 15 shows in graphic form the average headways in different cases (even-even, even-odd, odd-odd, odd-even). The product of the two matrices gives the global occupation time matrix.

The summation of all elements of this matrix provides the daily total occupation time and the relationship between it and the number of cases of succession to obtain the average headway.

This method was later updated by UIC leaflets 405-2I (1983) and 406R (2004).

CORRIERE method [8]

CORRIERE (1982) proposed a method that takes into account the effect of delays in analogy to the road flows.

The proposed formulation analyses the delays in presence of perturbations causes as crossing and/or overtaking manoeuvres, also describing the capacity-speed dependence in presence of delay randomly generated.

L'espressione della potenzialità riferita all'intera giornata è in questo caso:

$$P = \left(\sum_j N_j + \frac{T - \sum_j N_j \cdot (A_j + B_j \cdot V_j + \frac{C_j}{V_j})(1 + D_j \cdot V_j)}{(A_j + B_j \cdot V_j + \frac{C_j}{V_j})(1 + D_j \cdot V_j)} \right) \cdot k$$

nella quale:

- N_j è il numero dei treni della classe j (prioritaria rispetto alla i);
- A e B sono i due termini che determinano il distanziamento spaziale;
- C è la lunghezza complessiva del convoglio;
- D_j è il ritardo medio, calcolato basandosi sulla teoria di PETERSEN.

Metodo di GENOVESI e RONZINO [23]

GENOVESI e RONZINO hanno proposto un ampliamento di quanto considerato da CORRIERE nel 1982 [10] estendendo il concetto del coefficiente di ritardo anche ai peritempi dovuti alle fermate d'orario oltre che alle cause ritardanti di tipo accidentale.

In più hanno introdotto il coefficiente di stabilità in modo tale da avvicinare i risultati della capacità a valori più reali.

Esso è espresso dalla seguente formula, relativa all'intera linea

$$x_{linea} = \frac{\sum x_{i-j} \cdot L_{i-j}}{\sum L_{i-j}} \quad \text{ed} \quad x_{0,i-j} = \frac{L_{i-j}}{\frac{n-1}{n-2} \cdot b_{medio} + L_i + f}$$

nella quale:

- L_{i-j} è la distanza fra le stazioni;
- L_t è la lunghezza dei treni;
- b_{medio} è il valore medio delle lunghezze delle sezioni di blocco;
- n è il numero di aspetti del segnalamento fisso concatenato;
- f è il franco di sicurezza.

In definitiva l'espressione della capacità reale di una linea esercita con blocco fisso è:

$$C = \frac{1}{x_{linea}} \cdot \frac{\sqrt{2\gamma b/k}}{\frac{n-1}{n-2} b + L_t + f}$$

nella quale:

- D è il Ritardo specifico;
- b è la lunghezza di blocco;
- n è il numero degli aspetti di segnalamento;
- L_t è la lunghezza dei treni;

The expression of the daily capacity is in this case:

$$P = \left(\sum_j N_j + \frac{T - \sum_j N_j \cdot (A_j + B_j \cdot V_j + \frac{C_j}{V_j})(1 + D_j \cdot V_j)}{(A_j + B_j \cdot V_j + \frac{C_j}{V_j})(1 + D_j \cdot V_j)} \right) \cdot k$$

where:

- N_j is the number of trains of class j (priority over i);
- A and B are terms depending upon the spatial distance;
- C is the length of the trains;
- D_i is the average delay calculated on the basis of PETERSEN theory (see § 5.2.5).

GENOVESI and RONZINO method [23]

GENOVESI and RONZINO proposed an extension of what is considered by CORRIERE in 1982 in order to extend the concept of delay coefficient to stops perturbations.

In addition they introduced the coefficient of stability, in order to obtain more realistic capacity values.

It is expressed by the following formula related to the whole line

$$x_{linea} = \frac{\sum x_{i-j} \cdot L_{i-j}}{\sum L_{i-j}} \quad \text{ed} \quad x_{0,i-j} = \frac{L_{i-j}}{\frac{n-1}{n-2} \cdot b_{medio} + L_i + f}$$

where:

- L_{i-j} is the distance between the stations;
- L_t is the trains length;
- b_{medio} is the average length of the block sections;
- n is the number of signal aspects;
- f is a safety margin.

On this basis the final expression of the capacity of a line with fixed block is:

$$C = \frac{1}{x_{linea}} \cdot \frac{\sqrt{2\gamma b/k}}{\frac{n-1}{n-2} b + L_t + f}$$

where:

- D is the specific delay;
- b is the block section length;
- n is the number of aspects of signals;
- L_t is the trains length;
- f is a safety margin;
- χ is the coefficient of stability;
- γ is the train deceleration;
- k is a safety factor.

- f è il franco di sicurezza;
- χ è il coefficiente di stabilità;
- γ è la decelerazione del convoglio;
- k è il coefficiente di sicurezza.

5.2.5. Metodi Analogici

Metodo di PETERSEN [4]

Il modello di PETERSEN consente di pervenire, tramite la soluzione di un sistema di equazioni lineari, ai tempi medi di percorrenza su linee a singolo e a doppio binario per diverse classi di treni con regole di priorità diverse da quella assoluta, ipotizzando che le partenze dei treni siano distribuite in modo uniforme e indipendente per le diverse classi sull'arco temporale di riferimento e che le stazioni siano tra loro egualmente distanziate.

Il modello mette in relazione il tempo effettivo e quello programmato di percorrenza di un dato convoglio con l'entità dei perditempi dallo stesso subito per effetto delle interferenze o degli incroci con altri convogli.

Consente così di definire, per assegnate caratteristiche di linea, il ritardo subito dal generico convoglio al variare del numero di treni di diverse priorità che interagiscono con esso.

Metodo di CASCETTA e NUZZOLO [7]

Il modello consente di tenere conto del distanziamento minimo tra i treni e dell'effettivo numero di binari esistenti nelle stazioni per le manovre di sorpasso e precedenza, richiedendo, tuttavia, alcune ipotesi semplificative, come lo schema di partenze completamente casuali dei treni.

Infatti, s'ipotizza che il numero delle partenze dei treni di ciascuna classe formi un processo Poissoniano omogeneo indipendente da quello delle altre classi.

In definitiva il metodo consente di valutare i tempi di percorrenza effettivi, attraverso la risoluzione di un sistema di equazioni in forma matriciale di ordine i , così come indicato dalla:

$$t_i(t_{\text{percorrenza}}) = \frac{L}{v_i} = \frac{L}{s_i} + \sum_j R_{ij} \cdot M_{ij}$$

nella quale:

- L è la lunghezza della tratta presa in esame;
- s_i è la velocità commerciale programmata;
- v_i è la velocità commerciale media effettiva;
- R_{ij} è il ritardo medio conseguente all'interferenza tra un treno di classe i ed uno di classe j ;
- M_{ij} è il numero medio di interferenze che si verifichino tra i treni i e j .

Metodo di CORRIERE 1984 [9]

In seguito alla sua precedente trattazione (1982), COR-

5.2.5. Analogical methods

PETERSEN method [4]

The PETERSEN method allows to determine, through the solution of a system of linear equations, the average travel time on single and double track lines for different classes of trains with priority rules other than the absolute, assuming that the departures of trains are distributed uniformly and independently for different classes along the reference time and that the stations are equally spaced between them.

The model relates the actual running time and the planned one with the amount of delays caused by overtaking or crossing manoeuvres.

This allows to define, for given characteristics of the line, the delay suffered by the generic train depending on the number of trains of different priorities interacting with it.

CASCETTA and NUZZOLO method [7]

The model allows to take into account the headway between trains and the actual number of overtaking and crossing tracks in the stations and requires, however, some simplifying hypotheses, such as the completely random pattern of trains departures.

In fact, the hypotheses that the number of departures of trains of each class forms an independent homogeneous Poisson process is accepted.

In short, the method allows to calculate the running time required, through the resolution of a system of equations in matrix form of order i , as expressed by:

$$t_i(t_{\text{percorrenza}}) = \frac{L}{v_i} = \frac{L}{s_i} + \sum_j R_{ij} \cdot M_{ij}$$

where:

- L is the length of the line section;
- v_i is scheduled commercial speed;
- s_i is the actual commercial speed;
- R_{ij} is the average delay resulting interference between a train of class i and a train of class j ;
- M_{ij} is the average number of interference occurring between trains i and j .

CORRIERE method 1984 [9]

Following its earlier formulation (1982), CORRIERE (1984) analyzed the reduction of capacity due to the insertion of slow trains in an homogeneous timetable, considering as an unusable dead time the difference of journey times of a block section for the two speeds typologies multiplied the number of sections between the two block stations previously addressed.

CORRIERE applies to each class of trains defined in the

RIERE (1984) ha analizzato la riduzione della potenzialità derivante dall'inserzione di treni lenti in una circolazione omotachica, valutando come tempo morto non utilizzabile la differenza dei tempi di percorrenza in una sezione di blocco, dei due tipi di circolazione, per il numero delle sezioni di blocco comprese fra due stazioni di precedenza interessate. In pratica CORRIERE applica a ciascuna classe di treni descritti nel metodo FS un ritardo D_i per unità di lunghezza della linea. L'espressione della potenzialità riferita all'intera giornata è in questo caso:

$$P = \left(\sum_i N_i + \frac{T - \sum_i N_i \cdot d_i \cdot (1 + D_i \cdot V_i)}{d_i \cdot (1 + D_i \cdot V_i)} \right) \cdot k$$

nella quale:

- D_i è l'entità media dei ritardi della classe i ;
- D_i è l'entità media dei ritardi della classe f (treni prioritari);
- N_i è il numero dei treni non prioritari;

Tale metodo viene ulteriormente confrontato con quello precedentemente descritto [10] nei due casi di blocco automatico e blocco automatico a correnti codificate (fig. 16).

Metodo di REITANI e MALASPINA [17]

Tale metodo propone una fusione tra le formule di tipo statico ed analitico poiché parte dai presupposti della formula generale dei metodi statici e li integra con elementi propri di quelli analitici attraverso l'introduzione di un coefficiente che tiene conto della probabilità che il ritardo (calcolato con il metodo di CORRIERE) si verifichi.

Questo metodo permette di considerare più classi di velocità, di tradurre le regole di priorità imposte alla circolazione e di quantificare i ritardi per l'effettuazione delle precedenza. In definitiva l'espressione della capacità di una linea è data dalla:

$$P = \frac{T}{k \cdot z}$$

con

$$z = \sum_i \frac{D}{N_i} \cdot \sum_{j=1}^n \left(\frac{N_j}{v_i} + \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot \frac{p_{ij}^2 \cdot N_i \cdot N_j^2}{2 \cdot (\sum N_h - N_i)} \cdot \left| \frac{1}{v_i} - \frac{1}{v_j} \right| \right) + t_m$$

nella quale:

- D è l'intervallo spaziale fra due treni;
- N_i è il numero di treni della classe i -esima compresi in orario;
- N_j è il numero di convogli appartenenti alla classe j -esima;

FS method, a delay per line unit length.

The expression of the daily capacity is in this case:

$$P = \left(\sum_i N_i + \frac{T - \sum_i N_i \cdot d_i \cdot (1 + D_i \cdot V_i)}{d_i \cdot (1 + D_i \cdot V_i)} \right) \cdot k$$

where:

- D_i is the average delay of class i ;
- D_i is the average delay of priority class j ;
- N_i is the number of trains without priority;

This method is further compared with the previously described [10] in the two cases of automatic block with and without codified current (figure 16).

REITANI and MALASPINA method [17]

This method offers a fusion between the analytical and static formulas by integrating the assumptions of the general formulas of static methods with analytical proper elements as the introduction of a coefficient taking into account the likelihood that the delay (calculated with the CORRIERE method) occurs.

This method allows to consider several classes of speed and the priority rules and quantify the delays similarly to CORRIERE.

The expression of the global capacity is:

$$P = \frac{T}{k \cdot z}$$

where is:

$$z = \sum_i \frac{D}{N_i} \cdot \sum_{j=1}^n \left(\frac{N_j}{v_i} + \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot \frac{p_{ij}^2 \cdot N_i \cdot N_j^2}{2 \cdot (\sum N_h - N_i)} \cdot \left| \frac{1}{v_i} - \frac{1}{v_j} \right| \right) + t_m$$

where:

- D is the distance between two following trains;
- N_i is the number of trains belonging to i class;
- N_j is the number of trains belonging to j class;
- p_{ij} are the coefficients translating the priority rules between the trains classes;
- c_{ij} is the relationship between different types of delay;
- v_i and v_j are the actual average commercial speeds classes i and j .

DELFINO and GALAVERNA method [21]

The proposed method quantifies the capacity increase achievable on lines with mixed traffic by the introduction of the moving block.

The method is based on MALASPINA and REITANI [19] considerations and provides a procedure for calculating the delays in case of automatic electric block (fixed block)

- p_{ij} sono dei coefficienti che traducono le regole di priorità tra classi di treni;
- C_{ij} è il rapporto tra i vari tipi di ritardo;
- v_i e v_p , rispettivamente, la velocità commerciale effettiva media per la classe i e la classe j .

Metodo di DELFINO e GALAVERNA [21]

Il metodo proposto quantifica l'incremento di potenzialità conseguibile, su linee a traffico misto, con l'introduzione del blocco mobile.

Il metodo si fonda sulle considerazioni svolte da MALASPINA e REITANI [17] fornendo un metodo di calcolo per i ritardi nel caso del blocco elettrico automatico (blocco fisso) e del blocco mobile, con l'aggiunta di una espressione per il ritardo data dalla:

$$D_{ij} = \frac{S_i^2}{2d_i} + (S_j \cdot t_r) + (L_{ij}) + H$$

nella quale:

- S_{ij} è il ritardo che subisce un treno lento quando ha ceduto il passo ad uno veloce;
- D_{ij} è il Ritardo specifico;
- t_r è il tempo di reazione;
- L_r è la lunghezza del convoglio;
- H è un margine spaziale di sicurezza.

5.3. Analisi comparativa preliminare

In questa sezione sono esposti i risultati preliminari di un'analisi comparata svolta sulle metodologie suesposte, la quale ne evidenzia le principali funzioni e campi di applicazione.

Le trattazioni che seguono vengono sviluppate con specifico riferimento ai metodi di calcolo della capacità di linea. Si rimanda a future pubblicazioni per analoghe considerazioni comparative inerenti i metodi per il calcolo della capacità di circolazione negli impianti.

In seguito sono stati differenziati i parametri intrinsecamente collegati ai dati in ingresso ed in uscita di ciascuno di loro.

Il tutto viene sinteticamente espresso tramite la tabella 2, la quale esprime anche i parametri quantitativi di questi metodi.

La comparazione effettuata permette di identificare

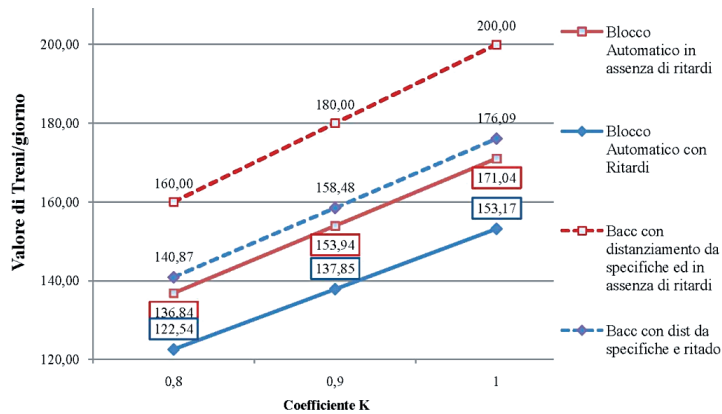


Fig. 16 - Potenzialità in funzione di K secondo CORRIERE.
Capacity as a function of K coefficient according to CORRIERE.

and moving block, with the addition of an expression for the delay given by:

$$D_{ij} = \frac{S_i^2}{2d_i} + (S_j \cdot t_r) + (L_{ij}) + H$$

where:

- s_{ij} is the delay acquired by a slow train overtaken by a fast one;
- D_{ij} is the specific delay;
- t_r is the reaction time;
- L_i is the train length;
- H is a spatial safety margin.

5.3. Preliminary comparative analysis

In this section are shown the preliminary results of a comparative analysis carried out on the methodology outlined above, which highlights the main functions and application fields.

The following results are specifically referenced to lines capacity methods.

The results of similar researches concerning stations are going to be considered into future publications.

The differentiated parameters intrinsically linked to the input and output data of each method are illustrated.

All results are synthetically expressed in table 2, which also expresses the quantitative parameters of these methods.

The comparison identifies the ability to deal with the basic operations and standards of the railway system.

The first result is their strong differentiation, not only because they are based on different mathematical models but mainly because they provide a range of output data

ANALISI COMPARATA DELLE TECNICHE E METODOLOGIE PER LA DETERMINAZIONE DELLA CAPACITÀ DI CIRCOLAZIONE
COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNIQUES AND METHODOLOGIES FOR CAPACITY CALCULATION[illegible]

la capacità di gestire le operazioni basilari dei sistemi ferroviari e i loro standard.

Il primo risultato è la loro forte differenziazione, non soltanto perché sono basate su modelli matematici diversi ma soprattutto perché forniscono una gamma di dati in uscita, ognuno dei quali è adattabile a diverse condizioni di circolazione.

Durante le analisi sono state identificate le funzioni principali di ciascun metodo.

Gli obiettivi finali di tali attività di comparazione e classificazione si possono sintetizzare in:

- evidenziare vantaggi e svantaggi delle metodologie dal punto di vista tecnico e formulare un'indicazione precisa agli operatori, ricercatori e tecnici dello strumento che più si adatta sulla base delle loro esigenze;
- elaborare e proporre un strumento unico che possa integrare le diverse metodologie fino ad oggi adottate.

6. Applicazione

Come in precedenza accennato le metodologie analizzate sono state applicate a fini comparativi alla sezione critica della tratta Sapri-Paola, quella compresa fra Cetraro e Fuscaldo, di lunghezza complessiva pari a 13,2 km.

I metodi applicati hanno consentito di calcolare una serie di valori di capacità teorica, espressi come treni/giorno, compresi entro un ampio intervallo ed in alcuni casi anche sensibilmente diversi tra loro con valori che oscillano tra i 100 ed i 170 treni/giorno per senso di marcia (fig. 17).

Si può osservare come i valori della capacità risultino dello stesso ordine di grandezza tra le metodologie di BIANCHI (1964) e la formula FS (1968).

In effetti queste due sono di facile applicazione ma presentano il limite di non considerare una circolazione perturbata e anche quello di non tener in conto la marcia eterotachica.

Con l'inserimento di questi due fattori BIANCHI, nella

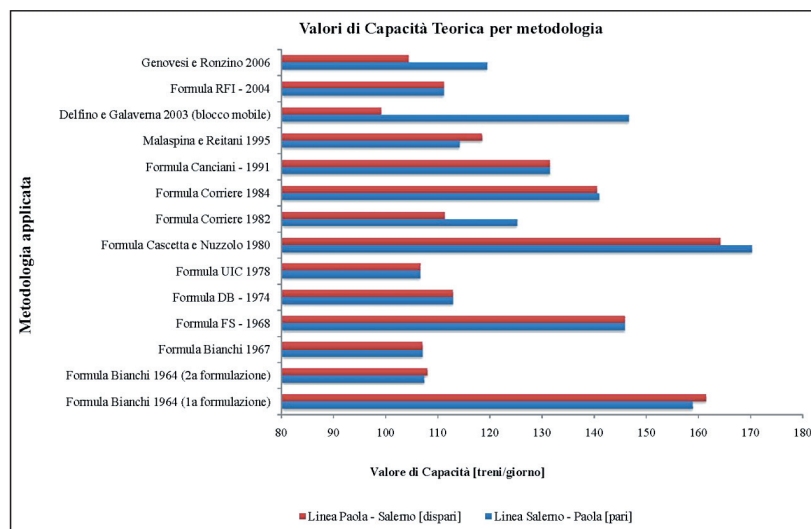


Fig. 17 - Valori di capacità teorica (treni/giorno) per senso di marcia per diverse metodologie applicate. Theoretical capacity (trains/day) per direction according to different methodologies.

corresponding to different service conditions.

During the application the key features of each method have been identified.

The ultimate goals of these activities of comparison and classification can be summarized in:

- to highlight advantages and disadvantages of the methods from technical point of view and to formulate a clear indication to the operators, researchers and technicians of the instrument that fits on the basis of their needs;
- to develop and propose a unique tool that can integrate the different approaches adopted to date.

6. Application

As previously mentioned, the methods were applied for comparative purposes to the critical section of the railway line Sapri-Paola, between Cetraro and Fuscaldo stations, for an overall length of 13.2 km.

The applied methods made possible to calculate a set of values of theoretical capacity, expressed as trains per day, including over a wide range and in some cases significantly different from each other with values ranging between 100 and 170 trains per day for each direction (fig. 17).

It is pointed out how the values of the capacity have the same order of magnitude for the methodologies by BIANCHI (1964) and the FS formula (1968).

In fact, these are easy to apply but have the limitation of not considering perturbed traffic and not homogeneous

sua seconda formulazione, riduce sensibilmente il valore della capacità teorica.

Le formule delle ferrovie tedesche e della UIC introducono elementi che esplicitano l'influenza dei fattori che alternano l'effettiva circolazione dei treni, fornendo valori ben più ristretti della capacità di circolazione.

Gli altri metodi, eccetto quello di CASCETTA e NUZZOLO, portano a definire un valore della capacità diverso per ogni metodologia ma esplicitamente dipendente dai molteplici parametri presi in considerazione.

Il metodo di CASCETTA e NUZZOLO risulta affetto dall'introduzione di molteplici nuovi fattori che hanno trovato trattazioni più profonde nei metodi sviluppati successivamente con valori di capacità sensibilmente inferiori.

7. Ambienti di simulazione

Un certo numero di metodi analogici di simulazione hanno trovato il loro naturale sviluppo applicativo in strumenti operativi commercializzati.

Si tratta di strumenti che offrono un'interfaccia di dialogo con l'utente e simulano la circolazione ferroviaria.

Di solito generano gli orari grafici attraverso equazioni dinamicamente definite nel tempo ad intervalli finiti.

Essi possono identificare i ritardi e analizzare le interferenze in un orario predefinito.

L'analisi dettagliata svolta nell'ambito della presente ricerca conta un totale di venticinque ambienti di simulazione fino ad oggi esaminati dei quali si offre in tabella 3 un'analisi comparativa.

Il passo successivo è stato quello di compilare un prospetto di analisi sintetica, in modo tale da offrire uno spettro dei risultati ottenuti tramite l'analisi comparativa effettuata.

Sono molte le informazioni e gli elementi analizzati tra cui si distinguono i dati in ingresso ed in uscita di ciascun ambiente di simulazione e/o determinazione della capacità ferroviaria.

I dati in ingresso sono classificati in parametri dell'infrastruttura, parametri della rete ed effetti dell'esercizio.

I dati in uscita sono differenti a seconda che l'ambiente di simulazione permetta il calcolo della capacità teorica, commerciale, utilizzata o residua.

In aggiunta tali ambienti di simulazione sono stati classificati sulla base delle funzioni principali che assolvono:

- simulazione: indica che si tratta di uno strumento che elabora i dati in ingresso e offre un'interfaccia

speeds.

In fact by including these two factors BIANCHI, in his second formulation, significantly reduces the value of the theoretical capacity.

DB and UIC formulas introduce elements explaining the influence of speed classes alternation in the actual operation by providing lower values of capacity.

The remaining methods, with the single exception of CASCETTA and NUZZOLO method, lead to define capacity values in a similar order of magnitude, anyway depending upon the multiple parameters taken into account.

The CASCETTA and NUZZOLO methods suffers of the introduction of several new factors normally justifying lower capacity values as actually resulting by more recent methods considering them.

7. Simulation environments

A number of analogical simulation methods have found their natural application development in commercial tools.

These instruments normally provide an interface for the dialogue with the user and simulate the rail traffic. Usually generate schedules graphs dynamically defined through equations in a defined timetable.

They can identify delays and analyze the interference in a predefined time.

The detailed analysis carried out to date, as part of this research, has a total of twenty-simulation environments of which a comparative analysis is provided in table 3.

The next step was to compile a summary statement of analysis, so as to offer a spectrum of results obtained through comparative analysis performed.

In each simulation environment many details and elements are analyzed, mainly inputs and outputs, for the determination of rail capacity.

The input parameters are classified into infrastructure, network parameters and effects of the operation.

The output data are different depending on whether the simulation environment allows the calculation of theoretical capacity, commercial capacity, used capacity or residual capacity.

In addition, these simulation environments have been classified on the basis of the main functions performed:

- Simulation: indicates that this is a tool that processes the data input and offers a graphical interface with the user in order to simulate a railway system.
- Optimization of timetables: indicates that this is a tool that processes the trains running and provides with the timetable through defined scheduling optimization rules.
- Timetables: indicates that this is a tool that allows you to create a timetable.

TABELLA 3 – TABLE 3

ANALISI COMPARATA DELLE FUNZIONALITÀ DEI STRUMENTI DI SIMULAZIONE PER IL CALCOLO DELLA CAPACITÀ FERROVIARIA
COMPARATIVE ANALYSIS OF THE FUNCTIONALITY OF SIMULATION TOOLS FOR CAPACITY CALCULATION.

Analisi Comparativa			STRUMENTI DI SIMULAZIONE																										
			AFAG	CAPRES	CMS	DEMURGE	DOHS	FALCO	FAST TRACK II	FASTA	IRCIMA	IPARI	MON-MALLAS	OPENMETABALE	OPENTRACK	PETER	PTG	RADIS	RAILCAP	RAILNET II	RAILPLAN	RAILSIM	RAILSTS	ROMAN	SISTE	TPS/STRAK	VERATO		
Dati di Ingresso	Parametri dell'Infrastruttura	Singolo/Doppio Binario	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		Sistema di Segnalamento	-	?	?	X	?	-	-	?	-	-	?	?	?	?	?	?	?	?	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Effetti della Rete	Itinerari	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	X	?	-	-	-	-	?	-	X	
		Limiti di Velocità	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Tempo di blocco dovuto al sistema di segnalamento	?	?	?	X	?	-	-	-	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	-	-	-	-	-	-	?	X	
		Distacco spazio-temporale	?	?	?	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	
		Distacco temporale	?	?	?	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	
		Blocking time starway	?	?	?	-	-	-	-	-	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	-	-	-	-	-	-	-	X	
		Distacco dovuto agli aspetti dei segnali	?	?	?	-	-	-	-	-	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	-	-	-	-	-	-	-	X	
		Distacco minimo	?	?	?	-	-	-	-	-	-	?	?	?	?	?	?	?	?	?	-	-	-	-	-	-	-	X	
		Tempo di cuscinetto	?	?	?	-	-	-	-	-	-	?	?	?	?	?	?	?	?	?	-	-	-	-	-	-	-	X	
		Tempo di percorrenza supplementare	?	?	?	-	-	-	-	-	-	?	?	?	?	?	?	?	?	?	-	-	-	-	-	-	-	X	
		Tempo di sosta	?	?	?	-	-	-	-	-	-	?	?	?	?	?	?	?	?	?	-	-	-	-	-	-	-	X	
		Tempo totale di Riferimento	?	?	?	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X		
		Materiale Rotabile	?	?	?	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	
		Fattore dell'ora di punta	?	?	?	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	
		Priorità di circolazione	?	?	?	X	?	-	-	-	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	-	-	-	-	-	-	-	X	
		Parametri di Esercizio	Interruzioni	?	X	?	-	-	-	-	-	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	-	-	-	-	-	-	?	X
			Tempo di fermata	?	X	?	-	-	-	-	-	-	?	?	?	?	?	?	?	?	?	-	-	-	-	-	-	-	X
Dati in Uscita	Analisi di Capacità	Qualità di servizio	X	X	?	-	-	-	-	-	-	-	-	?	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X		
		Capacità teorica	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X		
		Capacità commerciale	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	?	X	X	?	-	X	X	-	-	-	X	X	X	
	Funzioni Principali	Capacità Utilizzata	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	?	X	X	?	-	X	X	-	-	-	X	X	X	
		Capacità Residua	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	?	X	X	?	-	X	X	-	-	-	X	X	X	
		Programmazione dei Turni	X	?	X	?	-	-	-	?	?	?	X	X	X	X	?	X	-	?	?	?	?	?	?	?	?	X	
		Gestione dell'infrastruttura	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X		
		Gestione degli impianti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	X	-	X	X	-	-	-	-	X	X	X	
		Gestione dei Turni di servizio	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	
		Ottimizzazione degli orari	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	
		Valutazione Economica	X	?	?	?	?	?	?	?	?	?	X	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	X	
		Analisi di sensibilità	X	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	X	
		Simulazione	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	-	X	-	X	-	X	-	-	-	-	-	X	
		Statistiche	Tempi di occupazione	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	?	X
			Margine delle tracce orarie	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	?	X
			Statistiche sugli itinerari	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	?	X
Individuazione di Conflitti	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	?	X		

grafica con l'utente in modo tale da simulare un sistema ferroviario;

- ottimizzazione degli orari: indica che si tratta di un strumento che elabora i movimenti dei treni ed offre la generazione degli orari grafici attraverso precise regole di ottimizzazione degli orari definiti dall'utente;
- orari: indica che si tratta di un strumento che offre la possibilità di creare orari grafici;
- capacità ferroviaria: indica che si tratta di un strumento che calcola la capacità di circolazione;
- gestione dell'infrastruttura: indica che si tratta di un strumento che gestisce i dati infrastrutturali di linea di un sistema ferroviario;
- gestione degli impianti: indica che si tratta di un strumento che gestisce i dati infrastrutturali degli impianti di un sistema ferroviario;
- turni: indica che si tratta di un strumento che gestisce la programmazione dei turni del materiale rotabile;
- valutazione economica: indica che si tratta di un strumento che effettua analisi economiche sullo stato dell'infrastruttura e dei possibili potenziamenti della rete;

- Railway Capacity: Indicates that this is a tool able to calculate the capacity.
- Infrastructure: indicates that this is a tool capable to manage the infrastructure data of a railway system.
- Facilities Management: indicates that it is a tool capable to manages the infrastructure facilities data of a rail system.
- Turns: indicates that this is a tool capable to manage the rolling stock scheduling.
- Economic Evaluation: Indicates that this is a tool capable to perform economic analysis on projects concerning infrastructure and network expansion.
- Sensitivity analysis: indicates that this is a tool capable to process more than one scenario calculating indicators of performances in different conditions.

8. Final comments and contributions to research

In the framework of the concerned railway research area, a contribution has been proposed, specifically focusing on the following topics:

- the development of the concept of capacity in combination with the development of the railway network in

- analisi di sensitività: indica che si tratta di un strumento che elabora più di uno scenario o soluzioni alternative offrendo indicatori complessivi utili all'effettuazione di analisi di sensitività.

8. Considerazioni conclusive e contributi alla ricerca

Nell'ambito dell'argomento proposto si è inteso offrire un contributo alla ricerca, concentrando l'attenzione sui seguenti argomenti:

- l'evoluzione del concetto di capacità in relazione all'evoluzione delle infrastrutture negli ultimi 60 anni, attraverso le analisi delle metodologie esistenti ed i fattori in evoluzione in tale ambito;
- la correlazione tra metodi sviluppati dai ricercatori e capacità di gestire dati caratteristici di norma in possesso dei gestori di infrastruttura ferroviaria;
- il supporto allo sviluppo ed all'impiego dei metodi di calcolo apportato dalla diffusione capillare dei personal computer;
- il valore aggiunto delle teorie nate ed evolute negli anni passati in relazione alla precisione dei risultati offerti ed il loro confronto con i moderni strumenti di simulazione, con l'ulteriore obiettivo di evidenziare problematiche teoriche ed applicative di questi ultimi;
- il raccordo fra diversi operatori e ricercatori nel campo ai fini di ottenere una fotografia aggiornata dello stato e dell'utilizzo delle diverse teorie e metodi in Europa;
- un contributo sostanziale verso la messa a punto di uno strumento integrato caratterizzato da diversi gradi di approfondimento, utile pertanto a scopi accademici, tecnico-scientifici ed operativi.

Al fine di presentare in forma sistematica le risultanze più significative delle analisi sviluppate, nella figura 18 si riportano in sintesi i primi risultati dell'applicazione di una analisi SWOT (Strengths, Weaknesses, Options and Threats).

the last 60 years, through the analysis of existing methodologies and evolution perspectives in this area;

- the correlation between the methods developed by researchers and the data normally managed by infrastructure managers and railway operators;
- the support to full development of calculation procedures allowed by the diffusion of the personal computers;
- the relation between theories developed and progressively evolved and accuracy of the results provided as well as their comparison with modern simulation tools, with the further aim to highlight their application and theoretical problems;
- the link between different operators and researchers in order to obtain an updated picture of state of the art and use of different theories and methods in Europe;
- a substantial contribution towards the development of an integrated instrument characterized by different levels of detail, therefore useful for technical-scientific and operational scopes.

In order to present in an as much as possible systematic way the most significant results of the developed analysis, in Figure 18 are summarized the first results of a SWOT (Strengths, Weaknesses, Options and Threats) analysis, which will be enriched on the basis of additional evidence to be acquired in a further research step.

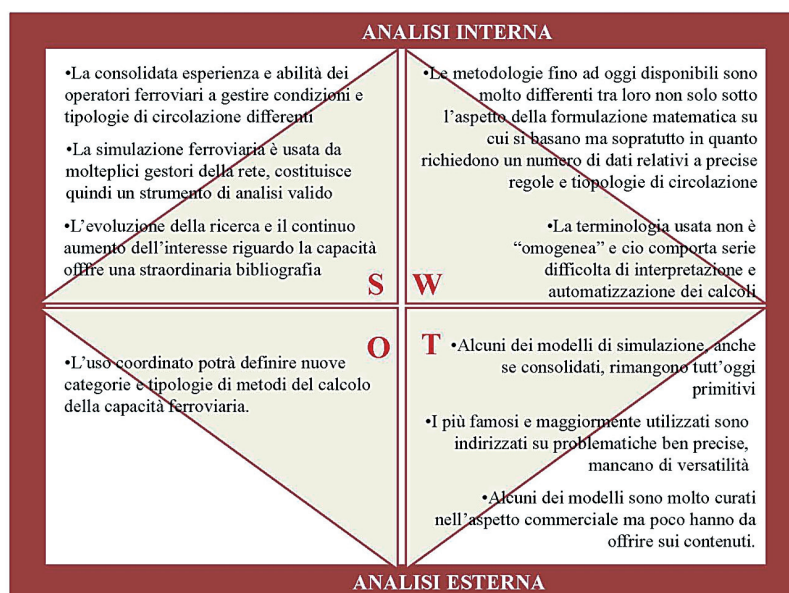


Fig. 18 - Analisi SWOT – Stadio Preliminare. SWOT – Preliminary status.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] M. BIANCHI, "Potenzialità di linee ferroviarie", *Ingegneria Ferroviaria* (Dicembre 1964).
- [2] POTTHOFF, "Verkehrsstromungslehre", Transveb, Berlin (1965).
- [3] M. BIANCHI, "Circolazione di treni a velocità diverse su linee a doppio binario", *Ingegneria Ferroviaria* (Dicembre 1967).
- [4] E.R. PETERSEN, "Over the road transit time for a single track railway", *Transportation Science*, 8, 65-74 (1974).
- [5] G.R. CORAZZA, L. FLORIO, "Il problema del nodo e la verifica degli impianti di stazione", *Ingegneria Ferroviaria* (Aprile 1979).
- [6] UIC Leaflet 405-1 R, "Methode Destinee a determiner la capacite de lignes", UIC International Union of Railways, France (1979).
- [7] E. CASCETTA, A. NUZZOLO, "Un modello analitico per il calcolo della capacità di circolazione delle linee ferroviarie", *Ingegneria Ferroviaria* (Febbraio 1980).
- [8] F. CORRIERE, "Sulla potenzialità dei sistemi di trasporto in sede propria", *Ingegneria Ferroviaria* (Gennaio/Febbraio 1984).
- [9] F. CORRIERE, "Potenzialità e regolarità di esercizio nelle linee ferroviarie", *Ingegneria Ferroviaria* (Gennaio/Febbraio 1982).
- [10] L. FLORIO, G. MALAVASI, "Principi teorici per la verifica di un impianto complesso e determinazione dei margini di potenzialità", *Ingegneria Ferroviaria* (Dicembre 1984).
- [11] G. VICUNA, "Organizzazione e tecnica ferroviaria", CIFI (1986).
- [12] G.R. CORAZZA, MUSSO, "Gli impianti di stazione e la loro analisi topologica", (Novembre 1987).
- [13] L. GIULIANI, G. MALAVASI, RICCI, "Analisi di un impianto di stazione sulla base del programma di Esercizio", *Ingegneria Ferroviaria* (Ottobre 1989).
- [14] G.R. CORAZZA, A. MUSSO, "La circolazione ferroviaria e gli impianti di stazione", *Ingegneria Ferroviaria* (Luglio/Agosto 1991).
- [15] G. CANCELLI, "Criteri progettuali di rinnovo e potenziamento delle linee ferroviarie: modello di calcolo e di verifica della potenzialità di circolazione", *Ingegneria Ferroviaria* (Giugno 1991).
- [16] S. RICCI, "Metodologia di analisi e verifica dei regolamenti di circolazione ferroviaria", *Ingegneria Ferroviaria* (Gennaio 1992).
- [17] G. REITANI, R. MALASPINA, "La potenzialità di circolazione ferroviaria su linee a singolo binario - un modello di calcolo", *Ingegneria Ferroviaria* (Agosto 1995).
- [18] A. POGGIO, "Analisi comparata dei sistemi di controllo e regolazione della circolazione sulle linee ferroviarie", *Ingegneria Ferroviaria* (Agosto 1995).
- [19] L. FLORIO, L. MUSSONE, "A new approach to the analytical formulation of the capacity of complex railway systems", (1998).
- [20] M. GALAVERNA, G. SCIUTTO, "Influenza nella potenzialità di ferrovie a traffico misto", *Ingegneria Ferroviaria* (Dicembre 1999).
- [21] A. DELFINO, M. GALAVERNA, "Blocco fisso e blocco mobile: analisi di potenzialità", *Ingegneria Ferroviaria* (Giugno 2003).
- [22] RFI COM NI ORG 001° del 07 Aprile 2004.
- [23] P. GENOVESI, C.D. RONZINO, "Flussi e capacità delle linee ferroviarie a doppio binario", *Ingegneria Ferroviaria* (Luglio/Agosto 2006).
- [24] Ferrovie dello Stato – Prefazione Generale all'Orario di Servizio – Ministero dei Trasporti, (2004-2008).
- [25] RailSYS: http://www.rmcon.de/englisch/uber_railsys.html.
- [26] PETER: <http://www.citg.tudelft.nl/live/pagina.jsp?id=52fc8b1d-d494-4d579cb0-8865c0de8a85&lang=en>.
- [27] ROMAN: <http://w2.siemens.at/roman/>.
- [28] VIRIATO: <http://www.sma-partner.ch/vp/vstart.php?lang=e>.

- [29] CAPRES: http://www.fasta.ch/capres/capres_english.htm.
- [30] FASTA: http://www.fasta.ch/fasta/fasta_english.htm.
- [31] AFAIG: http://www.fasta.ch/afaig/afaig_english.htm.
- [32] DEMIURGE: http://recherche.sncf.com/uk/la_recherche_et_ses_domaines/exploitation/demiurge.html.
- [33] SISYFE: http://recherche.sncf.com/uk/la_recherche_et_ses_domaines/exploitation/sisyfe.html.
- [34] FAST TRACK II: <http://www.multimodalinc.com/prodserv.php?item=mrpass>.
- [35] RAILCAP: <http://www.stratec.be/site/FichesEtudes/PlanGBrailcap.htm>.
- [36] LIPARI: http://recherche.sncf.com/uk/projets/uk_lipari.html.
- [37] OPENTRACK: http://www.opentrack.ch/opentrack/opentrack_e/opentrack_e.html.
- [38] OPENTIMETABLE: http://www.opentimetable.ch/opentimetable_e.html.
- [39] TPS/STRAX: http://www.hacon.de/tps_e/index.shtml.
- [40] CMS: http://www.aeat.co.uk/rail/what/products/cms_fr.htm.
- [41] PTG : http://www.aeat.co.uk/rail/what/products/ptg_fr.htm.
- [42] FALKO: www.siemens.com/transportation.
- [43] DONS: L. INGOLOTTI, P. TORMOS , A. LOVA, "A Decision Support System (DSS) for the railway Scheduling Problem".
- [44] IRSIM: M.Jelaska, "Railway line capacity planning support model".
- [45] MOM MALLAS: <http://www.dsic.upv.es/grupos/gps/MOM/>.
- [46] RADIS: http://www.hacon.de/radis_e/index.shtml.
- [47] RAILSIM: <http://www.railsim.com/>.
- [48] RAILNET II: http://www.fasta.ch/railnet_II/railnet_II_english.htm.
- [49] RAILPLAN: <http://www.comreco-rail.co.uk.html>.

Sommaire

TECHNIQUES ET MÉTHODES POUR LA DÉTERMINATION DE LA CAPACITÉ FERROVIAIRE: ANALYSE COMPARÉE ET PERSPECTIVES D'INTÉGRATION

L'article fournit une analyse des méthodes et techniques de détermination de la capacité de circulation, méthodes et techniques qui sont classées suivant les facteurs qui présentent un rapport direct avec les résultats obtenus.

Des méthodes synthétiques et analytiques sont comparées, ainsi que des méthodes d'optimisation et de simulation avec leur environnement de développement.

Zusammenfassung

METHODEN UND VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DER LEISTUNGSFÄHIGKEIT: VERGLEICH UND AUSSICHTEN EINER ZUSAMMENSCHLIEßUNG

Analyse der Verfahren zur Bestimmung der Verkehrsleistungsfähigkeit. Diese Verfahren werden unter dem Kriterium der erreichbaren Resultate klassifiziert. Unterstellt werden dieser Analyse die analytische, synthetische, optimierende und simulations- Methoden, sowie deren informatischen Werkzeugen.