

Considerazioni sull'effetto del grado di eterotachicità sulla potenzialità di circolazione delle linee ferroviarie

Considerations on the effect of the level of train heterogeneity on railway capacity

Dott. Ingg. Federica CROCCO(*), Salvatore DE MARCO(*), Domenico W. E. MONGELLI(*)

1. Introduzione

La potenzialità di circolazione delle linee ferroviarie è una grandezza che indica il numero massimo di treni che possono circolare su una linea in un periodo di riferimento. Tale quantità dipende da molteplici elementi, alcuni dei quali legati alle caratteristiche dell'infrastruttura ferroviaria ed altri legati al modello di esercizio attuato su di essa, nonché al sistema di controllo e segnalamento ed alle prestazioni e tipologia del materiale rotabile.

Tra questi, un ruolo fondamentale è rivestito dalla programmazione dell'esercizio. La maggioranza delle linee ferroviarie è infatti interessata dal transito di diverse tipologie di convogli che, oltre per il servizio prestato (viaggiatori o merci), differiscono significativamente per la velocità di percorrenza della linea.

Se, da una parte, l'eterotachicità di circolazione non rappresenta di per sé un elemento di criticità, essa genera inefficienze allorché si è in prossimità delle condizioni di saturazione della linea, essendo la coesistenza di treni con diverse classi di velocità sulla medesima infrastruttura un fattore di consumo rilevante della potenzialità disponibile.

Anche alla luce di quanto affermato nasce in Italia il nuovo impulso alla realizzazione di infrastrutture ferroviarie ad alta velocità. L'espansione della rete ha infatti il duplice effetto di alleggerire le linee storiche di una quota parte del traffico e, nello stesso tempo, di ridurre il grado di eterotachicità della circolazione in linea, offrendo ai treni veloci (c.d. *mangiatracce*) infrastrutture dedicate di nuova realizzazione e con caratteristiche costruttive idonee ai treni ad alta velocità.

Nella presente nota si vuole compiere una valutazione quantitativa di come la potenzialità dell'infrastruttura risenta fortemente ed in negativo dell'effetto che un'elevata eterotachicità può avere sulla circolazione in una linea prossima a saturazione, ovvero ogni qual volta la quantità di convogli circolanti in linea raggiunge valori prossimi alla potenzialità.

Il problema, comunemente riscontrato sulla rete fer-

1. Introduction

Railway capacity is a quantity that points out the maximum number of trains that can circulate on a line in a given time span. Such a quantity depends on numerous elements, some of which are linked to characteristics of the railway infrastructure and others linked to the operation program performed on it, as well as to the control and signalling system and to performances and typology of rolling stock.

Among these, a fundamental role is covered by train schedules. Most railway lines are interested in the transit of different train typologies that, apart from hired services (travellers or cargo), are significantly different for the speed on the line.

If, on one side, train heterogeneity does not represent by itself a critical element, it produces ineffectiveness when close to conditions of line saturation, since the coexistence of trains with different classes of speed on the same infrastructure is a factor of remarkable consumption of the available capacity.

In light of what has been previously stated, a new impulse for the realization of high speed railway infrastructures emerges in Italy. The expansion of the network has in fact the double effect to relieve the historical lines of a part of traffic and, at the same time, to reduce the level of train heterogeneity in line, offering to fast trains infrastructure dedicated to the improvement of high-speed travel as well as constructive characteristics suitable for high speed trains.

This paper aims to achieve a quantitative evaluation of how railway capacity suffers negatively from the effect that an elevated train heterogeneity can have on the circulation in a line close to saturation, that is each time the quantity of circulating trains in line reaches values near capacity.

The problem, commonly found in the historical railway network, is faced adopting the methodology of calculation of railway capacity described in the following paragraph (proposed by D'ELIA and DE MARCO, 2009). This methodology allows the simulation of different circulation scenarios in

(*) Dipartimento di Pianificazione Territoriale, Università della Calabria.

(*) Territorial Planning Department, University of Calabria.

roviaria storica, è affrontato adottando la metodologia di calcolo della potenzialità descritta nel paragrafo seguente (proposta da D'ELIA e DE MARCO, 2009). Essa presenta la peculiarità di poter essere utilizzata per effettuare la simulazione di diversi scenari di circolazione in linea e di consentire di acquisire risultati adatti a compiere una valutazione quantitativa del fenomeno.

2. Impostazione metodologica

L'interazione tra più convogli che utilizzano una stessa infrastruttura ferroviaria e transitano a differenti velocità è analizzata tramite un modello semplificato di simulazione della circolazione in linea, utilizzando il quale è possibile definire la potenzialità di circolazione dell'infrastruttura in un periodo di riferimento variabile.

Poiché oltre il 75% delle linee ferroviarie per le quali si riscontrano problemi di saturazione e forti condizioni di eterotachicità appartiene alla rete nazionale fondamentale esercita con sistemi di blocco fisso, le seguenti considerazioni sono riferite a tali tipologie di linee.

Per linee esercite con sistemi di blocco fisso è dunque possibile calcolare la potenzialità come funzione della separazione minima necessaria ossia della lunghezza di quella parte di una tratta che può essere impegnata da non più di un treno per volta, senza dare luogo a condizionamenti di alcun tipo sui treni che seguono.

Il calcolo della potenzialità di un'intera linea ferroviaria è in genere riferito alla *sezione rilevante*, ossia a quella parte della linea che risulta più limitativa. Si intende pertanto ascrivere alla linea la potenzialità della sezione che determina il maggior intervallo di tempo tra il passaggio di due treni in successione.

Ciò avviene, a parità di velocità di circolazione e di composizione del traffico e per il modello di calcolo considerato, in quella sezione della linea in esame che presenta la distanza maggiore tra due successivi posti di movimento ove siano presenti binari di precedenza.

Si considera pertanto la sezione di linea compresa tra due posti di movimento A e B . I posti di movimento A e B sono successivi ed abilitati a poter effettuare operazioni di precedenza, in modo da consentire al treno che segue di sorpassare il treno che lo precede, ove quest'ultimo sia più lento.

I convogli sono instradati sulla linea in modo che la marcia del convoglio che precede non influenzi in alcun modo la marcia del treno che segue, che non deve quindi essere rallentato. Inoltre, i convogli devono mantenere tra loro in ogni istante una distanza minima di sicurezza, in osservanza alle

line and the acquisition of proper results in order to complete a quantitative evaluation of the phenomenon.

2. Methodological formulation

Interaction among trains that use the same railway infrastructure and that transit at different speeds is analyzed through a simplified model of the simulation of circulation in line, through which it is possible to define railway capacity in a changeable time span.

Since over 75% of railway lines in which problems of saturation and extreme conditions of train heterogeneity are found belong to the fundamental national network operated with fixed block systems, the following considerations are reported to such typologies of lines.

For lines operated with fixed block systems it is possible to calculate capacity as a function of the minimum necessary headway or rather of the length of that part of a draft that can be occupied by no more than one train at a time, without creating some type of conditioning on trains that follow.

The calculation of the capacity of a whole railway line is generally referred to the *remarkable section*, or rather to that part of the line that results as more limitative. Therefore, it is proposed to count to the line the capacity of the section that determines the greatest headway between the passage of two trains in succession.

This happens, at the same speed of circulation and at the same traffic composition and for the considered model of calculation, in that section of the line in examination that presents the greatest distance between two following stations where railway-tracks for overtakings are present.

Therefore the line section between two stations, A and B , is considered. Stations A and B are successive and qualified for overtakings, so that the train that follows can surpass the train that precedes it, where the latter is slower.

Trains are routed on line so that the march of the train that precedes does not influence in anyway the rate of the train that follows, which should not be slowed down. Besides, trains must maintain between them in every instant a minimum safety distance, in observance of the rules imposed by the block system operating on the line.

It is possible to define the following greatness, considering the case in which a train of type i is immediately followed by a train of type j and referring to the reported scheme in fig. 1.

d_{A-B} = distance between stations A and B , qualified to the execution of overtakings;

v_i and v_j = commercial speed of the route of the line for a train of category i and for a train of category j respectively (it is assumed that trains maintain a constant speed along the whole journey, with acceptable approximation);

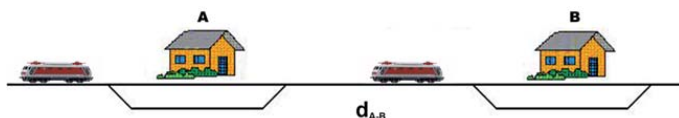


Fig. 1 - Distanza tra due posti di movimento. Distance between stations.

regole imposte dal sistema di blocco in esercizio sulla linea.

Si definiscono le seguenti grandezze, considerando il caso in cui un treno del tipo i sia immediatamente seguito da un treno di tipo j e riferendosi allo schema riportato in fig. 1.

d_{A-B} = distanza tra i posti di movimento A e B, abilitati all'effettuazione di precedenza;

v_i e v_j = velocità commerciale di percorrenza della linea rispettivamente per il treno di categoria i e per il treno di categoria j (si assume che, con approssimazione accettabile, i treni mantengano tale velocità costante lungo tutto il tragitto);

D_{sb} = separazione spaziale minima richiesta dal sistema di blocco tra il treno che precede i ed il treno che segue j ;

t_i e t_j = tempi di percorrenza della tratta A - B rispettivamente per il treno di categoria i e per il treno di categoria j , con $v_i t_i = v_j t_j = d_{A-B}$;

τ_{ij} = minimo intervallo di tempo tra due successivi inoltri in linea di treni di tipo i e j necessario perché la marcia del treno i non influenzi la marcia del treno j in nessun punto della tratta considerata e, in ogni caso, tale da non violare le regole imposte dal sistema di blocco.

È allora necessario distinguere due casi.

Nella situazione in cui $v_i > v_j$ (fig. 2) il treno i che precede è più veloce del treno j che segue e la distanza tra i due treni continua ad aumentare nel tempo.

In questo caso i due convogli si trovano alla minima distanza nell'istante in cui il treno i (primo dei due) attraversa il posto di movimento A diretto verso B e la marcia del treno i influenza sempre meno la marcia del treno j . Se in quell'istante i due convogli hanno separazione minima D_{sb} , il treno j è a distanza D_{sb} da A e può attraversare la sezione A dopo un intervallo di tempo pari a:

$$\frac{D_{sb}}{v_i} \quad (1)$$

Determinando le separazioni temporali come rapporto tra il distanziamento spaziale e le velocità commerciali di percorrenza della linea si trascurano gli effetti che hanno sulla separazione temporale le fasi di accelerazione, coasting e frenatura dei convogli che, pur non essendo marginali, renderebbero estremamente comples-

D_{sb} = minimum spatial separation required by block system between the train that precedes i and the train that follows j ;

t_i and t_j = transit times for the draft A - B respectively for the train of category i and for the train of category j , being $v_i t_i = v_j t_j = d_{A-B}$;

τ_{ij} = minimum time period between two following forwardings in line of train types i and j , necessary to the march of the train i to not influence the march of the train j in any point of the draft considered and, in every case, to not violate the rules imposed by the block system.

It is necessary to distinguish two cases.

In the situation in which $v_i > v_j$ (fig. 2) train i that precedes is faster than train j which follows and the distance between the trains increases during the time.

In this case the two trains are at the minimum distance in the instant in which train i (the first of two) crosses station A directly toward B and the rate of train i influences the rate of train j less and less. If in that instant the two trains have the minimum separation D_{sb} , train j is at a distance D_{sb} from A and it can cross section A after a time equal to:

$$\frac{D_{sb}}{v_i} \quad (1)$$

Defining temporal separations as a division between headway time and commercial speeds on the line neglects the effects that the phases of acceleration as well as coasting and braking of the train have on the temporal separation. Furthermore, since they are not marginal, they would make the analytical dealing of the model of calculation extremely complex.

In the case in which $v_i < v_j$ (fig. 3) the train that precedes is slower than the train that follows, and in order not to influence each other, the trains must be at the minimum distance allowed by the block system at the moment in which train j reaches location B. In such an instant train j is at a distance by train i equal to that fixed by the block system. Being such the distance traversed by train i at speed v_i , headway time between trains is equal to

$$\frac{D_{sb}}{v_i}$$

To avoid that train j is slowed down by train i , train j must put up the draft with a certain additional delay in comparison to that necessary to guarantee its march in

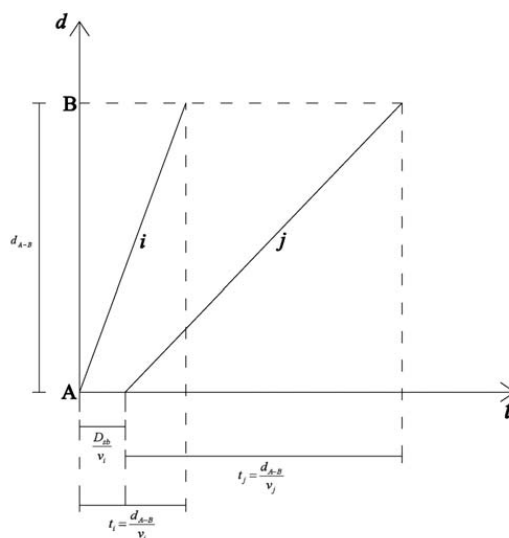


Fig. 2 - Separazione minima per $v_i < v_j$.
Minimum separation for $v_i > v_j$

sa la trattazione analitica del modello di calcolo.

Nel caso in cui $v_i < v_j$ (fig. 3), il treno che precede è più lento del treno che lo segue e per non influenzarsi i treni si devono trovare alla minima distanza consentita dal sistema di blocco nel momento in cui il convoglio j raggiunge la località B . In tale istante il convoglio j si trova una distanza dal treno i pari a quella imposta dal sistema di blocco. Essendo tale distanza percorsa dal treno i a velocità v_i , il distanziamento temporale tra i due convogli è pari a

$$\frac{D_{sb}}{v_i}$$

Per evitare che il treno j sia rallentato dal treno i , il treno j deve impegnare la tratta con un certo ritardo aggiuntivo rispetto a quello strettamente necessario per garantirne la marcia in sicurezza e in osservanza alle regole imposte al sistema di blocco. Esso potrà impegnare la tratta $A-B$ dopo un intervallo temporale dal passaggio del treno che lo precede pari a:

$$t_i + \frac{D_{sb}}{v_i} - t_j = \frac{d_{A-B} + D_{sb}}{v_i} - \frac{d_{A-B}}{v_j} \quad (2)$$

Giunto in località B , il treno i deve dare precedenza al treno j e, nella sezione successiva, si riproporrà a tal punto la situazione descritta per il caso precedente, in cui $v_i > v_j$.

Riassumendo, il minimo distanziamento temporale tra il treno i ed il treno j necessario affinché la marcia di due convogli che si susseguono non determini rallentamenti è dunque pari a:

$$\tau_{ij} = \frac{D_{sb}}{v_i} \quad \text{con } v_i \geq v_j \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = \frac{d_{A-B} + D_{sb}}{v_i} - \frac{d_{A-B}}{v_j} \quad \text{con } v_i < v_j \quad (4)$$

È a questo punto necessario definire il valore di τ_{ij} per ciascuna delle sequenze di treni di categoria i e j che possono presentarsi, considerando anche il caso in cui il treno i sia seguito da un altro treno di categoria i (caso in cui $j = i$).

Si noti come in quest'ultimo caso sia possibile utilizzare indifferentemente le equazioni 3 e 4 ottenendo il medesimo risultato.

Si presuppone inoltre che la probabilità che un treno di categoria i sia seguito da un treno di categoria j sia pari a p_{ij} , definibile come:

$$p_{ij} = p_i \cdot p_j \quad (5)$$

dove p_i e p_j rappresentano rispettivamente la probabilità di transito sulla linea per convogli di categoria i e j (rapporto tra il numero di convogli di una determinata categoria ed il numero complessivo di convogli circolanti sulla linea nel periodo di riferimento considerato).

A tal punto è possibile ottenere T , il valore atteso di τ_{ij} , come:

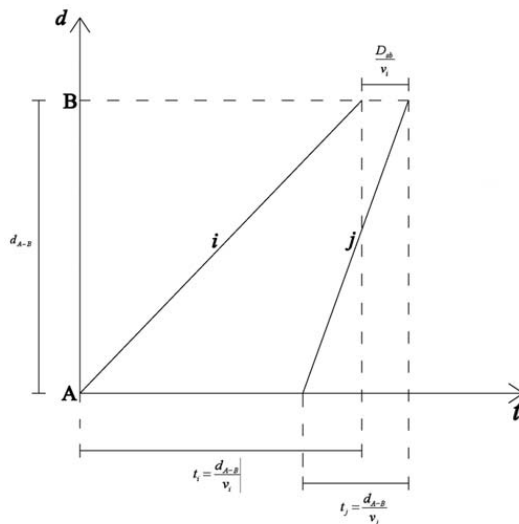


Fig. 3 - Separazione minima per $v_i < v_j$. Minimum separation for $v_i < v_j$.

safety and in observance of the imposed rules by the block system. It can engage draft $A-B$ after a temporal interval from the passage of the train that precedes it equal to:

$$t_i + \frac{D_{sb}}{v_i} - t_j = \frac{d_{A-B} + D_{sb}}{v_i} - \frac{d_{A-B}}{v_j} \quad (2)$$

Arrived in location B , train i must be overtaken by train j and, in the following section, the situation described in the preceding case will be proposed, in which $v_i > v_j$.

In summary, the minimum headway time between train i and train j , necessary so that the march of two trains that follow each other does not determine delays, is equal to:

$$\tau_{ij} = \frac{D_{sb}}{v_i} \quad \text{con } v_i \geq v_j \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = \frac{d_{A-B} + D_{sb}}{v_i} - \frac{d_{A-B}}{v_j} \quad \text{con } v_i < v_j \quad (4)$$

It is now essential to define the value of τ_{ij} for every possible sequence of trains of category i and j , also considering the case in which train i is followed by another train of category i (case in which $j = i$).

Note that in this last case it is possible to use both equations 3 and 4 in order to get the same result.

Besides the probability that a train of category i is followed by a train of category j , it is assumed equal to p_{ij} , definable as:

$$p_{ij} = p_i \cdot p_j \quad (5)$$

$$T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij} \cdot \tau_{ij} \quad (6)$$

essendo n il numero di differenti categorie di convogli, ciascuno circolante a velocità v .

Conseguentemente, la potenzialità oraria è pari a:

$$P = \frac{1}{T} \quad (7)$$

La potenzialità di circolazione, determinata con il modello di calcolo così come appena descritto, rappresenta un valore puramente teorico in quanto in condizioni di saturazione della linea il minimo ritardo di un treno si propagherebbe indistintamente su tutti i treni che lo seguono, determinando in tal modo uno scadimento della qualità di circolazione.

Per il calcolo della potenzialità pratica è infatti opportuno riferirsi al massimo numero di treni che possono circolare arrecando il minor disturbo possibile alla circolazione in caso di ritardo di un treno.

È pertanto ammissibile considerare, tra i possibili standard di regolarità indicati in letteratura, uno scenario in cui il ritardo di un treno possa provocare al massimo un ritardo, soltanto ad un altro treno o a sé stesso, non superiore al tempo di distanziamento minimo ammesso (GALATOLA, 2005).

A tal fine si determina la potenzialità pratica di circolazione, considerando un margine di sicurezza tale da evitare che il ritardo di un treno, entro certi limiti, influisca sulla circolazione dei treni che seguono.

Tale margine di sicurezza raggiunge livelli appropriati quando si considera che tra un treno ed il seguente sia sempre disponibile una traccia libera. L'effetto di una tale scelta è essenzialmente quello di diminuire la potenzialità rispetto a quella teoricamente raggiungibile fino a valori che, nel caso di circolazione omotachica, si presentano praticamente dimezzati.

In tal modo il treno in ritardo può avere un ritardo massimo pari a $\frac{D_{ab}}{v_i}$ senza influenzare la circolazione di altri treni, altrimenti deve utilizzare le successive tracce libere.

Il treno che viaggia con ritardo superiore a $\frac{D_{ab}}{v_i}$ è, di fatto, escluso dalla circolazione programmata andando a impegnare, per il proprio tragitto, le tracce libere che si rendono disponibili tra un convoglio ed il seguente.

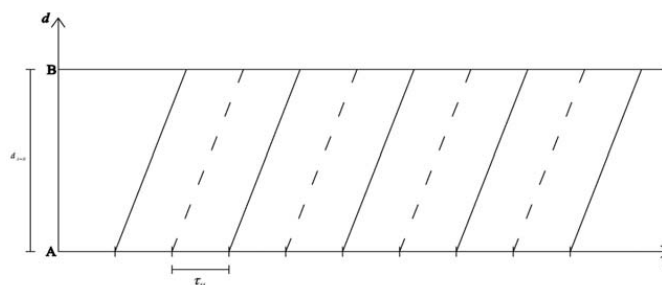


Fig. 4 – Il treno con ritardo superiore a τ_{ij} può occupare una traccia libera (tratteggiata). The train delayed more than τ_{ij} can use a free slot (outlined).

where p_i and p_j respectively represent the probability of transit on the line for trains of category i and j (relationship between number of trains of a determined category and total number of circulating trains on the line in the considered reference period).

It is then possible to get T , the mean value of τ_{ij} , as:

$$T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij} \cdot \tau_{ij} \quad (6)$$

being n the number of different categories of trains, everyone transiting at speed v .

As a consequence, hourly capacity is equal to:

$$P = \frac{1}{T} \quad (7)$$

Railway capacity, determined by using the model of calculation just described, represents a theoretical value. In conditions of saturation of the line the smallest delay of a train would be propagated without distinction on all the following trains determining a decline of quality of circulation.

For the calculation of practical capacity it is in fact opportune to refer to the most elevated number of trains that can circulate creating the smallest possible trouble to the circulation in case of the delay of a train.

Therefore, it is acceptable to consider, among the possible standards of regularity pointed out in literature, a scenario where a delayed train can provoke at the least one delay to another train or to itself, not superior to the time of admitted minimum headway (GALATOLA, 2005).

With this result in mind, practical capacity is defined considering a safety margin to avoid that the delay of a train, within certain borders, influences the circulation of other trains.

Such safety margins reach appropriate levels when it is considered that between one train and the next, an alternative slot is always available. The effect of such a choice is essentially to decrease capacity compared to that theoretically achievable up to values that, in case of homogeneous circulation, are practically halved.

In this way the delayed train can have a maximum delay equal to $\frac{D_{ab}}{v_i}$ without influencing the circulation of other trains, otherwise it must use the following available slots.

In fact, a train that travels with a

Tale provvedimento è evidentemente attuabile esclusivamente in assenza di altri vincoli, come ad esempio priorità o qualità minima attesa per il servizio (che potrebbe ad es. essere richiesta in una carta dei servizi) ma in tal modo si raggiunge una qualità della circolazione che si attesta sui livelli massimi possibili per condizioni di completa saturazione della linea.

È infatti teoricamente possibile definire valori di potenzialità superiori a quelli che si vengono a determinare con tale metodologia ma, in tal caso, si verrebbe a riproporre uno scenario che presenta una qualità di circolazione inferiore, portando di conseguenza a dover valutare la necessità di aumentare il grado di saturazione della linea definendo un valore di potenzialità minore.

Affinché sia dunque rispettato il vincolo appena descritto, è necessario che il distanziamento temporale tra due convogli che procedono nella stessa direzione sia sempre almeno pari al doppio del distanziamento minimo consentito dal sistema di blocco. Ne consegue che due treni di categoria i e j , per procedere nella stessa direzione, devono essere distanziati di un tempo pari a:

$$\tau'_{ij} = \frac{2 \cdot D_{sb}}{v_i} \quad \text{con } v_i \geq v_j \quad (8)$$

$$\tau'_{ij} = \frac{d_{A-B} + 2 \cdot D_{sb}}{v_i} - \frac{d_{A-B}}{v_j} \quad \text{con } v_i < v_j \quad (9)$$

Si determina dunque la potenzialità pratica P' della sezione rilevante, calcolata similmente al caso precedente:

$$P' = \frac{1}{T'} \quad (10)$$

dove:

$$T' = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij} \cdot \tau'_{ij} \quad (11)$$

Il valore così ottenuto è quello effettivamente utilizzabile per compiere le valutazioni in oggetto.

3. Analisi di differenti condizioni di esercizio

Al fine di verificare la sensibilità della potenzialità di circolazione al variare del grado di eterotachicità della linea si simulano differenti scenari di traffico in linea, considerando classi tipologiche di convogli ciascuna caratterizzata da velocità commerciale di percorrenza della linea omogenea.

Il traffico in linea è infatti comunemente caratterizzato dal transito di convogli di diversa tipologia e classificazione commerciale ed a ciascuna di tali classificazioni corrisponde un livello definito di uniformità riguardo alle velocità medie di percorrenza della tratta, ammettendo che, come ipotizzato in precedenza, i treni mantengano velocità costante lungo tutto il tragitto.

Per l'analisi effettuata, si sono considerate quattro ca-

delay greater than $\frac{D_{sb}}{v_i}$ is excluded from the scheduled circulation going to hock, for its journey, the free slots that are available between a scheduled train and the following.

Such a provision is feasible exclusively in absence of other constraints, such as minimum priority or quality expected for the service (that, for instance, would be requested in a Regulations and Standards document). In this way a quality of circulation that achieves the maximum levels possible for conditions of complete saturation of the line is reached.

It is theoretically possible to achieve superior values of railway capacity to those which it is possible to define with such a methodology. However, in this case, it would require a scenario that achieves an inferior quality of circulation, leading to the evaluation of the need to increase the saturation level of the line, defining a value of smaller capacity.

Therefore, as long as the constraint as described above is respected, it is necessary that the headway time between two trains proceeding in the same direction is always equal to at least two times the minimum distance allowed by block system. This permits two trains of category i and j to proceed in the same direction however, they must be distanced by a time span equal to:

$$\tau'_{ij} = \frac{2 \cdot D_{sb}}{v_i} \quad \text{con } v_i \geq v_j \quad (8)$$

$$\tau'_{ij} = \frac{d_{A-B} + 2 \cdot D_{sb}}{v_i} - \frac{d_{A-B}}{v_j} \quad \text{con } v_i < v_j \quad (9)$$

It is possible to define the practical capacity P' of the remarkable section, when calculated as in the previous case:

$$P' = \frac{1}{T'} \quad (10)$$

where:

$$T' = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij} \cdot \tau'_{ij} \quad (11)$$

As a result, the obtained value is the actual applicable value in order to complete the evaluations of interest.

3. Analysis of different operation conditions

With the purpose of verifying the sensibility of railway capacity by varying the level of train heterogeneity of a line, different scenarios of traffic in line are simulated, considering typological classes of trains where each one is characterized by homogeneous commercial speed on the line.

In fact, in line traffic is commonly characterized by the transit of trains of different typologies and commercial classification and each classification corresponds to a de-

tegorie di convogli, ciascuna caratterizzata da una velocità media di percorrenza variabile tra 70 e 130 km/h. Le caratteristiche di ciascuna categoria sono riportate in tab. 1.

È il caso di una linea interessata da tipologie di convoglio profondamente differenti, sulla quale si prevede il transito di treni più veloci frammisti a traffico locale o convogli merci a bassa velocità.

Nell'esercizio la velocità di percorrenza dei convogli dipende dal modello di esercizio attuato sulla linea, dal sistema di controllo e segnalamento, dalle prestazioni e tipologia del materiale rotabile e dalle velocità massime di rango imposte sulla linea.

TABELLA 1 – TABLE 1

VELOCITÀ MEDIE PER LE CATEGORIE
DI CONVOGLIO CONSIDERATE
AVERAGE SPEED FOR THE CONSIDERED
CATEGORIES OF TRAINS

| ID categoria <i>Category ID</i> | V commerciale [km/h] <i>Commercial Speed [km/h]</i> |
|------------------------------------|--|
| A | 70 |
| B | 90 |
| C | 110 |
| D | 130 |

L'applicazione del modello di calcolo descritto nel precedente paragrafo avviene considerando una distanza tra i posti di movimento pari a 10 km, coerentemente con le caratteristiche che storicamente è possibile riscontrare sulla rete ferroviaria nazionale.

La separazione spaziale minima richiesta dal sistema di blocco affinché i convogli circolino senza essere condizionati dai treni che li precedono per la presente simulazione è assunta pari a 5400 m, distanza corrispondente alla somma della lunghezza di quattro sezioni di blocco da 1350 m per linee esercite con blocco automatico e con velocità massima di percorrenza della linea fino a 200 km/h, richiedendosi per tali velocità uno spazio di frenatura pari alla lunghezza di due sezioni di blocco (2700 m) ed essendo necessaria la stessa quantità di spazio antistante quest'ultimo per riscontrare in linea esclusivamente segnali disposti a via libera.

Quest'ultima condizione si rende necessaria al fine di rispettare il requisito di non condizionamento tra i convogli che, altrimenti, incontrando un avviso di via impedita o di riduzione di velocità, dovrebbero necessariamente rallentare la propria marcia.

La simulazione della circolazione in linea è stata effettuata per una serie di scenari di traffico caratterizzati ciascuno da una diversa percentuale di ognuna delle tipologie di convoglio.

fin level of uniformity in respect of the average speeds of the draft, admitting that, as hypothesized previously, the trains maintain a constant speed along the whole route.

For this analysis, four categories of trains are considered, each one characterized by an average speed varying from 70 to 130 km/h. Characteristics from each category are reported in table 1.

This represents the case of a line interested in significantly different typologies of trains, of which the transit of faster trains combined with local traffic or slow cargo is allowed.

In operational conditions, train speed depends on the operation program provided on the line, on control and signalling system, on performances and typology of rolling stock and on the maximum speed profiles imposed on the railway line.

The application of the described model of calculation takes place considering a distance between stations equal to 10 km, which is coherent with historic characteristics that can be found on the national railway network.

For this simulation, the minimum spatial distance required by the block system so that trains can circulate without being conditioned from preceding trains, is assumed to be equal to 5400 m. This distance corresponds to the sum of the length of four block sections of 1350 m for lines controlled with automatic block system and where the maximum allowed speed does not exceed 200 km/h. For such speeds a braking space equal to the length of two block sections (2700 m) is required and the same space quantity is necessary before this previous space to exclusively find in line green light signals.

This last condition is necessary in order to respect the requisite of non-conditioning among trains that, otherwise, when coming upon a notice for a blocked way or for a speed reduction, should necessarily slow down their rate.

The simulation of the in line circulation has been put into action for a series of traffic scenarios, each one characterized by a different percentage for all train typologies.

Table 2 contains a summary, for every simulated composition, of the mix of traffic considered, showing the percentage incidence of each category of train in transit on the total traffic in a unitary time span.

Every composition is characterized by a different level of train heterogeneity and this parameter can be quantified through a statistic analysis.

Table 3 shows, for each traffic composition, average speed of train V_m and standard deviation. σ , since this last parameter can be easily reported to the level of train heterogeneity.

Taking into account what has already been considered regarding the elements that influence the determination of railway capacity, it would be useful to consider the sequence of forwarding of trains in line, apart from speed

Nella tabella 2 si riassume, per ciascuna composizione simulata, il mix di traffico considerato, riportando l'incidenza percentuale di ciascuna categoria di convogli transitanti sul traffico complessivo in un periodo di riferimento unitario.

Ciascuna delle composizioni è dunque caratterizzata da un differente grado di eterotachicità e tale parametro può essere quantificato effettuando un'analisi statistica.

Nella tabella 3 si riporta, per ciascuna composizione del traffico, la velocità media V_m dei convogli e lo scarto quadratico medio σ , essendo quest'ultimo un parametro che può essere facilmente relazionato al grado di eterotachicità di circolazione.

TABELLA 2 – TABLE 2

COMPOSIZIONE DEL TRAFFICO NEL PERIODO DI RIFERIMENTO PER GLI SCENARI SIMULATI [%]
TRAFFIC COMPOSITION IN THE TIME SPAN FOR SIMULATED SCENARIOS [%]

| ID composizione Composition ID | ID categoria convoglio Train category ID | | | |
|-----------------------------------|---|---------|---------|---------|
| | A | B | C | D |
| 1 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 100.00% |
| 2 | 0.00% | 0.00% | 100.00% | 0.00% |
| 3 | 0.00% | 25.00% | 25.00% | 50.00% |
| 4 | 0.00% | 100.00% | 0.00% | 0.00% |
| 5 | 12.50% | 12.50% | 25.00% | 50.00% |
| 6 | 25.00% | 25.00% | 25.00% | 25.00% |
| 7 | 28.57% | 28.57% | 28.57% | 14.29% |
| 8 | 30.00% | 30.00% | 30.00% | 10.00% |
| 9 | 31.25% | 31.25% | 31.25% | 6.25% |
| 10 | 33.33% | 33.33% | 25.00% | 8.33% |
| 11 | 33.33% | 33.33% | 22.22% | 11.11% |
| 12 | 35.71% | 28.57% | 28.57% | 7.14% |
| 13 | 36.36% | 27.27% | 27.27% | 9.09% |
| 14 | 35.71% | 35.71% | 21.43% | 7.14% |
| 15 | 38.46% | 30.77% | 23.08% | 7.69% |
| 16 | 37.50% | 37.50% | 12.50% | 12.50% |
| 17 | 40.00% | 30.00% | 20.00% | 10.00% |
| 18 | 100.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| 19 | 45.45% | 36.36% | 9.09% | 9.09% |
| 20 | 50.00% | 25.00% | 25.00% | 0.00% |

and composition of traffic. The methodology of calculation used for defining railway capacity considers that in line forwarding of trains happens in an entirely casual way, creating a scenario with the most disadvantageous conditions.

TABELLA 3 – TABLE 3

VELOCITÀ MEDIA E SCARTO QUADRATICO MEDIO PER GLI SCENARI DI TRAFFICO SIMULATI
AVERAGE SPEED AND STANDARD DEVIATION FOR THE SIMULATED TRAFFIC SCENARIOS

| ID composizione Composition ID | V_m [km/h] | σ [km/h] |
|-----------------------------------|-----------------|--------------------|
| 1 | 130,0 | 0,00 |
| 2 | 110,0 | 0,00 |
| 3 | 115,0 | 16,58 |
| 4 | 90,0 | 0,00 |
| 5 | 112,5 | 21,07 |
| 6 | 100,0 | 22,36 |
| 7 | 95,7 | 20,6 |
| 8 | 94,0 | 19,6 |
| 9 | 92,5 | 18,54 |
| 10 | 91,7 | 19,07 |
| 11 | 92,2 | 19,88 |
| 12 | 91,4 | 19,22 |
| 13 | 91,8 | 19,92 |
| 14 | 90,0 | 18,52 |
| 15 | 90,0 | 19,22 |
| 16 | 90,0 | 20,00 |
| 17 | 90,0 | 20,00 |
| 18 | 70,0 | 0,00 |
| 19 | 86,4 | 18,72 |
| 20 | 85,0 | 16,58 |

Therefore, using the methodology of calculation illustrated in paragraph 2, it is possible to define the hourly capacity suitable in table 4, for every composition of traffic.

Figure 5 shows a noticeable increase of railway capacity for scenarios where it is possible to obtain circulation that excludes or reduces the transit of the slowest trains.

È utile notare come, per quanto già considerato in precedenza in merito agli elementi che influiscono sulla determinazione della potenzialità di circolazione, sarebbe opportuno considerare, oltre che la velocità e la composizione del traffico, la sequenza di inoltro in linea dei treni. La metodologia di calcolo utilizzata per determinare la potenzialità di circolazione considera che l'inoltro dei convogli in linea avvenga in modo del tutto casuale, realizzando uno scenario per cui si verificano le condizioni più svantaggiose.

Utilizzando la metodologia di calcolo illustrata nel paragrafo 2 si determina pertanto, per ciascuna composizione di traffico, la potenzialità di circolazione oraria indicata nella tabella 4.

Dalla figura 5 si può notare come si abbiano sensibili incrementi della potenzialità di circolazione in linea per quegli scenari in cui si prevede una circolazione che escluda o limiti il transito dei convogli più lenti.

Per tutti gli altri casi (composizioni di traffico da 5 a 20), che propongono scenari di traffico fortemente eterotachici, si hanno limitate variazioni della potenzialità, che si attesta a livelli prossimi a quelli che si avrebbero per circolazione interamente omotachica ma considerando esclusivamente il transito dei convogli più lenti (composizione n° 18).

Ciò appare vero anche nel caso in cui sia significativa la presenza in linea di treni veloci.

Essendo ovviamente l'elemento più limitante la presenza dei treni più lenti, rendendosi per questi necessario un maggior tempo di percorrenza, coerentemente con quanto si può osservare analizzando la reale circolazione in linea, tale fenomeno può essere spiegato dalla necessità per i treni lenti di impegnare finestre temporali più ampie, sottraendole ai treni veloci.

I valori così ottenuti, a seguito delle semplificazioni utilizzate nel modello di calcolo della potenzialità utilizzato, descrivono grandezze che possono essere ritenute indicative ed utilizzabili come termine di raffronto della potenzialità di circolazione che, come è noto, non è univocamente determinabile.

Dall'analisi dei dati riportati nelle tabelle 3 e 4, è inoltre possibile verificare come la potenzialità di circolazione abbia un andamento proporzionale alla velocità media di transito dei convogli ed allo scarto quadratico medio delle velocità.

Si può infatti utilizzare, nel campo delle velocità commerciali considerate, la seguente equazione raggiungendo valori di potenzialità oraria prossimi a quelli ottenuti dal modello di calcolo proposto:

$$P \left[\frac{\text{treni}}{h} \right] = 0,09 \cdot \left(V_m \left[\frac{km}{h} \right] - \frac{\sigma}{1,6} \left[\frac{km}{h} \right] \right) \quad (12)$$

Applicando l'equazione 12, ottenuta sperimentalmente mediante interpolazione dei risultati delle simulazioni, si

For all the other cases (traffic compositions from 5 to 20), that propose strongly heterogeneous traffic scenarios, variations of capacity have been limited which attest to levels close to those that would be had for completely homogeneous circulation but exclusively consider the transit of the slowest trains (composition n. 18).

This appears to be true also in the case where the presence of fast trains in line is significant.

Coherent with observations when analyzing the real circulation in line, the presence of slower trains is obviously the most limiting element, creating the need for longer route times. Such a phenomenon can be explained by the necessity for slow trains to hock ampler temporal windows subtracting it from fast trains.

TABELLA 4 – TABLE 4

POTENZIALITÀ DI CIRCOLAZIONE PER GLI SCENARI DI TRAFFICO SIMULATI
RAILWAY CAPACITY FOR THE SIMULATED TRAFFIC SCENARIOS

| ID composizione <i>Composition ID</i> | P commerciale [treni/h] <i>Operative Capacity [trains/h]</i> |
|--|---|
| 1 | 12,04 |
| 2 | 10,19 |
| 3 | 9,67 |
| 4 | 9,00 |
| 5 | 8,33 |
| 6 | 7,84 |
| 7 | 7,61 |
| 8 | 7,53 |
| 9 | 7,46 |
| 10 | 7,39 |
| 11 | 7,38 |
| 12 | 7,34 |
| 13 | 7,33 |
| 14 | 7,28 |
| 15 | 7,24 |
| 16 | 7,23 |
| 17 | 7,21 |
| 18 | 7,03 |
| 19 | 6,97 |
| 20 | 6,48 |

ottengono infatti i valori di potenzialità riportati in tabella 5, con uno scostamento medio pari a 0,11 treni/h, ottenendo quindi un elevato livello di significatività, come del resto appare evidente in figura 5.

La potenzialità di circolazione è quindi un elemento che dipende in maniera marcata dallo scarto quadratico medio delle velocità dei convogli circolanti su una linea, a riprova di come tale termine costituisca un chiaro indice del grado di eterotachicità della linea. Essa dipende inoltre dalla velocità di transito dei convogli e, nel caso in cui la circolazione sia interamente omotachica, si è già visto come tale velocità costituisca l'elemento vincolante. Considerando infatti la composizione 18, è possibile notare come, sebbene la circolazione sia completamente omotachica, la potenzialità di circolazione si attesti ai livelli più bassi essendo tale composizione caratterizzata dal transito esclusivo di convogli lenti.

TABELLA 5 – TABLE 5
POTENZIALITÀ DI CIRCOLAZIONE CALCOLATA
UTILIZZANDO L'EQ. 12
RAILWAY CAPACITY DEFINED USING EQ. 12

| ID composizione <i>Composition ID</i> | P comm. Interpolata [treni/h] <i>Interpolated Operative Capacity [trains/h]</i> |
|--|--|
| 1 | 11,7 |
| 2 | 10,23 |
| 3 | 9,73 |
| 4 | 9,24 |
| 5 | 8,37 |
| 6 | 8,00 |
| 7 | 7,70 |
| 8 | 7,60 |
| 9 | 7,52 |
| 10 | 7,42 |
| 11 | 7,42 |
| 12 | 7,39 |
| 13 | 7,38 |
| 14 | 7,29 |
| 15 | 7,25 |
| 16 | 7,21 |
| 17 | 7,21 |
| 18 | 6,94 |
| 19 | 6,94 |
| 20 | 6,51 |

4. Conclusioni

Quanto finora evidenziato consente di affermare che, al fine di valutare un possibile incremento di potenzialità

Following the simplifications used in the proposed model of calculation of railway capacity, the obtained values describe quantities that can be considered indicative and usable as a term of comparison for railway capacity that, as it is known, is not univocally definable.

From the data analysis reported in tables 3 and 4, it is possible to verify how railway capacity has a proportional course to the average speed of trains and to the standard deviation of speeds.

In fact, it is possible to use, in the field of the considered commercial speeds, the following equation reaching hourly railway capacity values close to those obtained by the proposed model of calculation:

$$P \left[\frac{\text{trains}}{\text{hours}} \right] = 0,09 \cdot \left(V_m \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right] - \frac{\sigma}{1,6} \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right] \right) \quad (12)$$

Applying equation 12, experimentally obtained through interpolation of the simulation results, the values of capacity reported in table 5 are obtained, with an average deviation equal to 0,11 trains/h, getting therefore an elevated level of significativity, as is evident in figure 5.

Railway capacity is therefore an element that depends on a clear way from standard deviation of the speed of trains circulating on a line, as confirmation of how such a term constitutes a clear index of the level of train heterogeneity. Besides, train heterogeneity depends on transit speed and in the case in which the circulation is completely homogeneous, such speed constitutes a binding element as already seen. In fact, considering composition 18, it is possible to notice that, although the circulation is completely homogeneous, railway capacity reaches the lowest levels, since such compositions are characterized by the exclusive transit of slow trains.

4. Conclusions

With the objective of evaluating the possibility to increase railway capacity solely through the reorganization of services, it can be confirmed at present that in order to obtain noticeable results it seems necessary to drastically reduce the level of train heterogeneity.

In fact, it has been shown how in presence of strongly heterogeneous circulation capacity can achieve low levels and close to those that would be obtained in presence of only slow trains.

On lines characterized by heterogeneous circulation, this aspect determines a more rapid achievement of conditions of saturation, with consequent decline of service quality.

Analyzing the obtained results, it appears evident that the reorganization of the timetable through the introduction of bunched trains can provide railway circulation with considerable favourable effects that increase railway capacity circulation.

di una linea ferroviaria volendo riorganizzare soltanto il servizio, per ottenere risultati apprezzabili appare necessario ridurre drasticamente il grado di eterotachicità della circolazione.

Si è infatti mostrato come in presenza di circolazione fortemente eterotachica la potenzialità si possa attestare su livelli bassi e prossimi a quelli che si avrebbero in presenza soltanto di treni lenti.

Ciò determina, sulle linee che presentano circolazione eterotachica, un più rapido raggiungimento di condizioni di saturazione della linea, con conseguente decadimento della qualità del servizio.

Dall'analisi dei risultati ottenuti appare evidente come la riorganizzazione dell'orario mediante l'introduzione di fasce omotachiche possa portare alla circolazione ferroviaria notevoli effetti favorevoli all'incremento della potenzialità di circolazione.

A seguito dell'introduzione in pieno esercizio delle linee ad alta velocità, la completa esclusione dei convogli veloci dalla circolazione sulle linee storiche potrebbe sembrare sottintendere su tali linee un aumento della potenzialità di circolazione. Tuttavia, alla luce di quanto evidenziato, ciò non appare realistico considerando la permanenza sulle linee storiche di treni con differenti prestazioni e velocità e le sequenze di partenza dei convogli.

Dal punto di vista teorico, l'introduzione di fasce orarie dedicate a treni veloci potrebbe portare ad un incremento della potenzialità oraria fino a portare, in alcuni casi, la potenzialità di circolazione dell'infrastruttura da circa 7 a circa 12 convogli/ora.

Resta tuttavia aperto il problema relativo alla compatibilità di tali fasce orarie con le effettive esigenze dell'esercizio e le conseguenti sequenze di partenza dei treni.

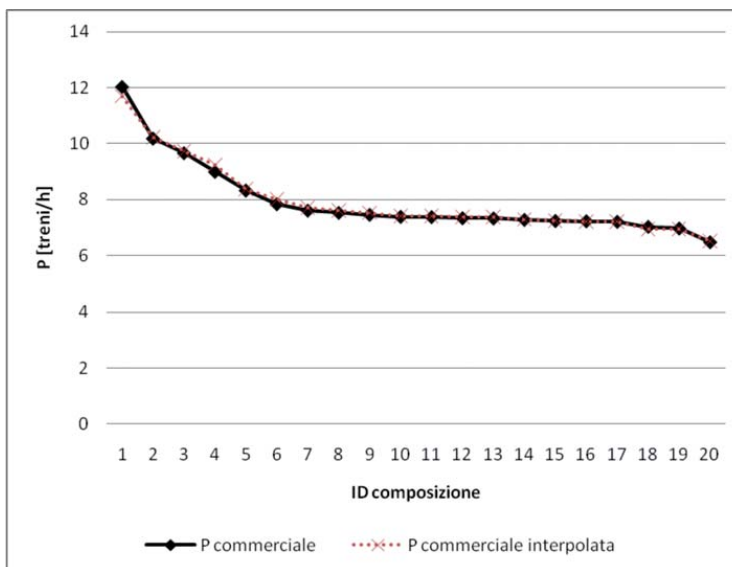


Fig. 5 – Potenzialità oraria di circolazione per gli scenari di traffico simulati. *Hourly railway capacity for the simulated traffic scenarios.*

Following the introduction of high speed lines in fully operational conditions, the complete exclusion of fast trains from circulation on historical lines might seem to imply an increase of railway capacity. Nevertheless, considering the obtained results, it doesn't appear realistic considering the permanence of historical lines of trains with different performances and speeds and the sequences of train departures.

From a theoretical point of view, the introduction of timeframes devoted to fast trains could allow an increase of hourly capacity up to the point of, in some cases, railway capacity from around 7 to 12 trains/h.

Nevertheless, the problem related to the compatibility of such timeframes with the real demands of operational programs and the consequent sequences of train departures remains open.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] M. ABRIL, F. BARBER, L. INGLOTTI, M.A. SALIDO, P. TORMOS and A. LOVA A., "An assessment of railway capacity", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, volume 44, issue 5, pages 774-806, september 2008.
- [2] G. BONORA e C. FOCACCI, "Funzionalità e Progettazione degli Impianti Ferroviari", CIFI, 2002.
- [3] E. CASCETTA e A. NUZZOLO, "Un modello analitico per il calcolo della capacità di circolazione delle linee ferroviarie", Ingegneria Ferroviaria, febbraio 1980.

- [4] F. CESARI, V. RIZZO e S. LUCCHETTI S., "Elementi Generali dell'Esercizio Ferroviario", CIFI, 1999.
- [5] S. D'ELIA e S. DE MARCO, "La potenzialità delle linee ferroviarie: un approccio analitico", Atti del convegno "Sicurezza ed Esercizio Ferroviario", Roma, 20 marzo 2009, a cura di S. IMPASTATO, S. RICCI, Aracne editrice S.r.l.
- [6] A. DELFINO e M. GALAVERNA, *Blocco fisso e blocco mobile: analisi di potenzialità*, Ingegneria Ferroviaria, giugno 2003.
- [7] M. GALATOLA, "Gli indici di criticità - Un metodo per l'analisi dei nodi ferroviari", Ingegneria Ferroviaria, marzo 2002.
- [8] M. GALATOLA, "Analisi della Circolazione Ferroviaria - Gli indici di compattezza e di qualità", Ingegneria Ferroviaria, luglio-agosto 2004.
- [9] M. GALATOLA, "La potenzialità delle linee ferroviarie e la qualità del servizio offerto", Ingegneria Ferroviaria, gennaio 2005.
- [10] M. GALAVERNA e G. SCIUTTO, "Un modello analitico della circolazione ferroviaria su linee banalizzate", Trasporti e Trazione, maggio 1999.
- [11] E. KOZAN and R. BURDETT, "A railway capacity determination model and rail access charging methodologies", Transportation Planning and Technology, 28:1, 2005.
- [12] A. LANDEX and N. OTTO ANKER, "Network effects in railway systems", Association for European Transport and contributors, 2007.
- [13] A. LANDEX, "Evaluation of Railway Networks with Single Track Operation Using the UIC 406 Capacity Method", Networks and Spatial Economics, Springer Netherlands, 2008.
- [14] L. MAYER, "Impianti Ferroviari", CIFI, 2004.
- [15] RFI - Rete Ferroviaria Italiana, "Regolamento sui segnali", Metrotipo SpA, 1947.
- [16] UIC Leaflet 405-1, "Method to be Used for the Determination of the Capacity of Lines", International Union of Railways, France, 1983. [17] UIC Leaflet 405 OR, "Links between Railway Infrastructure Capacity and the Quality of Operations", International Union of Railways, France, 1996.
- [18] UIC Leaflet 406 R, "Capacity", International Union of Railways, France, 2004.
- [19] G. VICUNA, "Organizzazione e Tecnica Ferroviaria", CIFI, 1999.

INFORMATIVA AI SOCI

Si comunica ai Sigg. Soci che sul sito internet del Collegio all'indirizzo www.cifi.it è attiva l'"AREA SOCI", che permette l'accesso ai dati personali.

L'Area Soci è soggetta a restrizioni di accesso, pertanto è necessario digitare il **login** e la **password** personale predefiniti dal CIFI che identificano in maniera univoca ogni Socio.

L'Area Soci permette di controllare e modificare i dati personali, segnalando al CIFI eventuali variazioni rispetto ai dati contenuti nella banca dati del Collegio.

Ciascun socio può rivolgersi presso la Segreteria Generale del Collegio ai n. **06/4882129 - FS 970/66825** o all'indirizzo e-mail: areasoci@cifi.it per richiedere il proprio identificativo di accesso.