



Automazione e applicazioni delle procedure di analisi della capacità di circolazione degli impianti ferroviari

Dott. Ingg. Raffaele LORUSSO^(*), Alessandro PERESSO^(*),
Prof. Ing. Gabriele MALAVASI^(**)

SOMMARIO - Le verifiche di capacità di circolazione di impianti ferroviari rivestono nell'ambito della progettazione ferroviaria notevole importanza, in quanto proprio in essi sono spesso individuabili i colli di bottiglia di un sistema ferroviario. Le analisi di capacità di circolazione degli impianti utilizzano diverse metodologie di approccio. Particolarmente interessanti per il supporto alla progettazione sono i metodi sintetici. Essi infatti permettono di valutare e confrontare diverse soluzioni in modo relativamente rapido fornendo risultati attendibili fin dalle prime fasi degli studi di fattibilità.

La memoria descrive il processo di automazione di tali metodologie, la procedura sviluppata e le esperienze applicative condotte nel corso degli anni.

1. Introduzione

La capacità di circolazione di un sistema ferroviario negli ultimi tempi ha acquisito particolare rilevanza per una serie di fattori concomitanti:

- La richiesta di traffico su ferro nelle aree urbane dei paesi sviluppati e in via di sviluppo è in continua crescita; alle imprese di trasporto sono richiesti servizi ferroviari più efficienti e più frequenti quasi sempre su tratte ferroviarie già al limite della saturazione.
- Come è noto la nuova organizzazione derivante dalla Direttiva 91/440/CEE, del 29 luglio 1991 e in particolare la richiesta di una separazione tra Imprese di Trasporto e Gestore Infrastruttura, comporta per questo ultimo che gli introiti derivanti dalla vendita delle tracce rappresentino la principale fonte di ricavo; aumentare le tracce disponibili in presenza di domanda significa quindi migliorare l'efficienza tecnico - economica.
- La disponibilità limitata di risorse finanziarie in molti paesi determina la necessità di focalizzare l'attenzione su interventi di potenziamento che offrono vantaggi più contenuti, ma ottenibili in breve tempo a fronte di investimenti molto ridotti e con consumo di minori risorse ambientali ed energetiche rispetto alla realizzazione di nuove linee.

Tutto ciò ha comportato una grande attenzione per quanto concerne la possibilità di aumentare la capacità di circolazione di un sistema ferroviario con interventi minimali sull'infrastruttura e sugli impianti tecnologici ed un conseguente aumento di richiesta di studi di fattibilità finalizzati al potenziamento di una infrastruttura esistente.

Per quanto riguarda la capacità di circolazione delle linee ferroviarie gli approcci possibili sono molteplici e nella bibliografia scientifica sono presenti diversi contributi.

Altrettanto non si verifica per la capacità di circolazione degli impianti che, tuttavia, costituiscono "colli di bottiglia" del sistema ferroviario soprattutto quando si è in presenza di sovrapposizioni di flussi diversi per tipologia (passeggeri, merci, locali, lunga percorrenza, ecc...) o per relazione (bivi, incroci, ecc...).

2. La valutazione della capacità di circolazione di un impianto ferroviario

L'analisi della circolazione negli impianti ferroviari può essere affrontata con diverse metodologie.

Gli strumenti analitici si caratterizzano sia per la metodologia del processo di analisi, sia per il livello di dettaglio dei dati di partenza.

I metodi dinamici di simulazione riproducono, sulla base delle interazioni tra le componenti del sistema (sottosistema infrastruttura, impianti tecnologici, materiale rotabile, operatori) l'evoluzione temporale della circolazione fornendone una rappresentazione approfondita e dettagliata,

(*) Italferr.

(**) Università di Roma "La Sapienza".

ma richiedono una definizione particolareggiata delle caratteristiche fisiche e funzionali dei vari sottosistemi [5], [6].

I metodi sintetici basandosi su un approccio statico considerano gli aspetti tecnologici e funzionali dei sottosistemi e utilizzano relazioni funzionali, che ne rappresentano le interazioni, per definire indicatori globali di esercizio (parametri medi di circolazione).

Le diverse caratteristiche delle due tipologie di modelli individuano anche specifici e diversi campi di applicazione.

I metodi dinamici di simulazione trovano applicazione nei problemi in cui si deve disporre di una rappresentazione dettagliata della circolazione ad esempio nelle analisi degli effetti sulla circolazione di provvedimenti gestionali (criteri di soluzione dei conflitti) per i quali i parametri medi globali potrebbero mascherare gli effetti sulle singole circolazioni.

I metodi sintetici, per la loro immediatezza applicativa, sono adatti sin dalle prime fasi del processo progettuale (fattibilità, preliminare) poiché consentono di formulare rapide valutazioni comparative tra la situazione esistente e le possibili alternative e contribuiscono al processo di scelta della soluzione da approfondire, tra le molteplici prese a riferimento, nelle successive fasi della progettazione.

Studi comparativi effettuati [10] evidenziano una convergenza di risultati con i metodi dinamici di simulazione anche per impianti esistenti di notevole complessità.

3. Metodi dinamici di simulazione

La circolazione ferroviaria è un fenomeno caratterizzato da componenti deterministiche e componenti stocastiche.

Le componenti deterministiche sono facilmente riproducibili mediante modelli matematici che mettono in relazione le variabili che descrivono il fenomeno e i parametri che dipendono dal sistema fisico. La forma delle relazioni dipende dalle leggi della fisica (leggi del moto) o dai risultati della sperimentazione (esempio resistenze al moto).

Le componenti stocastiche derivano da eventi imprevedibili che si manifestano nel sistema fisico e condizionano la sua evoluzione nel tempo (esempio mancata chiusura delle porte del treno fermo in stazione).

La riproduzione matematica degli eventi aleatori può essere effettuata mediante l'introduzione, nelle relazioni matematiche che li descrivono, di variabili che possono assumere un valore casuale estratto da una distribuzione di possibili valori.

Poiché la riproduzione del fenomeno dipende dal valore casuale introdotto è necessario ripetere più volte la simulazione per ottenere una rappresentazione del fenomeno il più possibile aderente alla realtà.

Il numero delle iterazioni dipende dal criterio che si

adotta per valutare gli effetti sulla circolazione dell'intervento progettuale allo studio.

In genere l'analisi si riferisce al valore medio dei valori degli indicatori rappresentativi del fenomeno ed alla loro distribuzione.

Pertanto nei modelli di simulazione assume importanza la legge di distribuzione degli eventi aleatori, distribuzione spesso non nota a priori ma legata a situazioni specifiche di impianto, veicolo, operatore, ecc.

In genere tali leggi si ottengono mediante l'osservazione sufficientemente estesa del fenomeno e la deduzione della corrispondente legge interpretativa mediante gli strumenti dell'analisi statistica.

Ciò condiziona e definisce i campi di applicazione di queste tipologie di modelli che risultano estremamente efficaci e utili nei casi in cui l'impianto esiste o in quelli in cui possa ipotizzarsi che i fenomeni aleatori dell'impianto allo studio siano analoghi a quelli osservati su impianti in esercizio.

4. Metodi sintetici

La verifica della capacità di circolazione può essere effettuata mediante metodi basati sul confronto di indicatori globali di funzionamento calcolati tramite parametri che dipendono dalle caratteristiche topologiche, impiantistiche e di esercizio.

La loro struttura è stata già descritta in letteratura [1], [2], [4] e [7]. Nel seguito si richiamano gli elementi principali e si esprimono alcune considerazioni sulla loro applicabilità ed efficacia nell'ambito dell'analisi della capacità di circolazione degli impianti ferroviari.

I metodi sintetici rappresentano in forma matriciale le caratteristiche strutturali e topologiche dell'impianto e quelle di esercizio considerando come componenti elementari gli itinerari, i tempi di occupazione ed i relativi flussi di circolazione.

Strumento fondamentale è la matrice degli itinerari che rappresenta lo stato di compatibilità e incompatibilità tra i possibili itinerari.

Da essa derivano ulteriori matrici che tengono conto della utilizzazione dei singoli itinerari prevista dal programma di esercizio e dei corrispondenti tempi di occupazione e interdizione.

Mediante tali matrici si possono calcolare gli indicatori globali che consentono di procedere alla verifica tramite un semplice confronto tra il tempo necessario allo svolgimento del programma di esercizio previsto ed il tempo di riferimento.

Gli indicatori utilizzati nel metodo derivato dagli studi di POTTHOFF [1] sono i seguenti:

- numero medio delle circolazioni compatibili (nel seguito n_{medio});

- tempo medio di occupazione del nodo (nel seguito t_{medio});
- ritardo totale R;
- coefficienti di utilizzazione regolare (C_{reg}) e totale (C_{tot});

che vengono calcolati mediante le seguenti espressioni:

$$n_{medio} = \frac{N^2}{\sum_{inc} n_i n_j}$$

$$t_{medio} = \frac{\sum_{inc} n_i n_j t_{ij}}{\sum_{inc} n_i n_j}$$

$$R = \frac{\sum_{inc} n_i n_j t_{ij}^2}{2T}$$

$$C_{reg} = \frac{1}{T} \left(\frac{N \cdot t_{medio}}{n_{medio}} \right)$$

$$C_{tot} = \frac{1}{T} \left(\frac{N \cdot t_{medio} + R}{n_{medio}} \right)$$

dove:

T = tempo di riferimento;

N = numero totale di circolazioni previste nel tempo di riferimento;

n_i = numero di circolazioni sull'itinerario i;

t_{ij} = tempo di interdizione dell'itinerario i rispetto all'itinerario j;

\sum_{inc} = sommatoria estesa alle coppie di itinerari incompatibili;

\sum_{incr} = sommatoria estesa alle coppie di itinerari incompatibili che possono generare ritardo.

a) Numero medio (n_{medio}).

Il numero medio è un indice convenzionale e rappresenta il numero di circolazioni che possono avvenire contemporaneamente all'interno dell'impianto. Esso non ha una corrispondenza fisica infatti, essendo un numero medio, può assumere anche valori non interi.

Come si può osservare esso dipende sia dalla configurazione topologica dell'impianto sia dal programma di esercizio.

Dalla forma dell'impianto derivano gli itinerari e le relazioni di compatibilità e incompatibilità tra essi; pertanto la sommatoria al denominatore della espressione di n_{medio} comprende tanti più addendi quanto più numerosi sono i casi di incompatibilità nella matrice degli itinerari.

Dal programma di esercizio derivano i tassi di circolazione dei singoli itinerari ed il numero complessivo di circolazioni, pertanto sia il numeratore della espressione, sia il denominatore dipendono da esso.

Il confronto del valore di n_{medio} relativo ad impianti differenti a parità di programma di esercizio può fornire indicazioni utili a valutare l'efficacia topologica delle soluzioni considerate. Viceversa a parità di piano schematico n_{medio} può fornire indicazioni relative all'adozione di un programma di esercizio rispetto ad un altro.

Nelle figg. 1 e 2 sono riportati a titolo di esempio un piano schematico e la corrispondente matrice di compatibilità e incompatibilità (matrice degli itinerari). I simboli sono convenzionali e rappresentano i confronti tra gli itinerari (\= autoconfronto, • = compatibilità, S= divergenza, Z= convergenza, D = inseguimento).

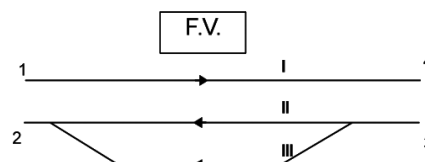


Fig. 1 - Esempio di piano schematico.

| | 1-I | I-4 | 3-II | 3-III | II-2 | III-2 |
|-------|-----|-----|------|-------|------|-------|
| 1-I | \ | D | • | • | • | • |
| I-4 | D | \ | • | • | • | • |
| 3-II | • | • | \ | S | D | • |
| 3-III | • | • | S | \ | • | D |
| II-2 | • | • | D | • | \ | Z |
| III-2 | • | • | • | D | Z | \ |

Fig. 2 - Esempio di matrice di compatibilità e incompatibilità (matrice degli itinerari).

b) Tempo di interdizione (t_{ij}).

Il tempo di interdizione esprime la durata dell'intervallo di tempo durante il quale un itinerario impedisce la formazione di altri itinerari con esso incompatibili. Esso tiene conto sia delle caratteristiche geometriche dell'impianto (presenza di deviatoi, velocità ammesse) sia delle caratteristiche del sistema di segnalamento. La presenza o meno di dispositivi tecnologici determina infatti la possibilità di rilevare l'occupazione e la progressiva liberazione di tratti parziali dell'itinerario (liberazione rigida o liberazione elastica). Il valore del tempo di interdizione consente pertanto di mettere a confronto alternative con diverse soluzioni tecnologiche e di valutare i loro effetti sulla circolazione.

c) Ritardo (R)

Il ritardo può essere valutato come somma delle possibili attese che possono essere imposte nel caso in cui si

debba utilizzare un itinerario che non può essere autorizzato per effetto di una contemporanea utilizzazione di un altro itinerario con esso incompatibile.

L'indicatore R viene calcolato come media delle attese relative alle possibili situazioni di conflitto che possono presentarsi, ipotizzando una legge di distribuzione degli arrivi di tipo costante in tutto il tempo di riferimento.

Tale ipotesi apparentemente in contrasto con l'esistenza di un programma di esercizio che regola la distribuzione degli arrivi appare tuttavia verosimile nelle situazioni di elevata densità di circolazione quali quelle che si verificano in condizioni di circolazione che saturano la potenzialità massima dell'impianto cioè le condizioni in cui in genere si conduce la verifica.

5. Procedura automatica di analisi mediante metodi sintetici

Nel processo di progettazione l'attenzione si focalizza principalmente sugli aspetti funzionali e sull'efficacia degli interventi proposti, al fine di indirizzare nel modo più efficace le ridotte risorse economiche a disposizione.

Le esigenze di sviluppare analisi comparative, nell'ambito della progettazione di nuovi impianti o di interventi infrastrutturali di potenziamento di impianti esistenti, prima di procedere con la progettazione preliminare e definitiva hanno trovato nei metodi sintetici strumenti validi per gli studi della capacità di circolazione richiedendo lo sviluppo di procedure applicative di tipo automatico per ridurre al minimo l'onere computazionale specie in presenza di nodi complessi.

Per rispondere alle esigenze dei vari committenti sia nazionali che esteri Italferr S.p.A. ha deciso di implementare la procedura sopra descritta.

In collaborazione con il dipartimento di Idraulica e Trasporti dell'Università "La Sapienza" di Roma è stato sviluppato il software IF Capacità Impianti.

La procedura consente di:

- modellare, attraverso semplici operazioni grafiche, un impianto ferroviario comunque complesso;
- riprodurre la configurazione dell'impianto definendone gli aspetti funzionali attraverso una piattaforma grafica;
- individuare tutti gli itinerari presenti nell'impianto e analizzare la topologia dell'impianto stesso;
- compilare in automatico la matrice delle incompatibilità di impianti comunque complessi (1000 itinerari x 1000 itinerari), avendo la possibilità di variare, parzialmente o ridurre l'area di studio in qualsiasi momento con estrema semplicità;
- gestire diverse configurazioni dell'impianto a seguito di macrofasi funzionali di esercizio; si tratta di un caso

molto frequente nella pratica ferroviaria che si verifica tutte le volte che si interviene in impianti esistenti;

- compilare in modo automatico la matrice dei tempi di occupazione e interdizione adottando diverse strategie di riempimento.

La procedura si compone di tre moduli:

- modulo archivio;
- modulo progetto;
- modulo di calcolo.

Il modulo archivio (fig. 3) permette di creare per ogni singolo impianto in esame più studi per valutare diverse configurazioni o diversi utilizzi dello stesso impianto.

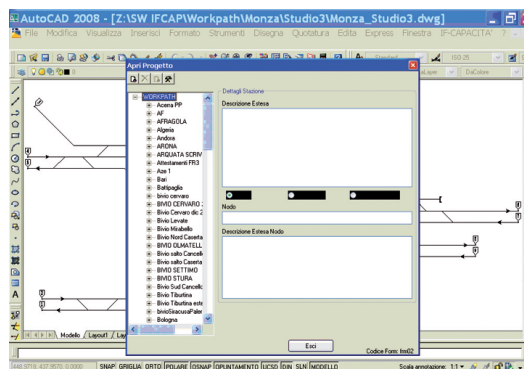


Fig. 3 - Modulo Archivio.

Il modulo progetto (fig. 4) implementato su piattaforma CAD, permette di riprodurre in maniera schematica il layout dell'impianto attraverso l'utilizzo di un apposito menù di configurazione. Tutti gli elementi costituenti il piano schematico (linee afferenti, stazionamenti, dispositivi di armamento, scudetti di inizio/fine itinerario ecc.) vengono riprodotti attraverso opportuni simboli grafici a

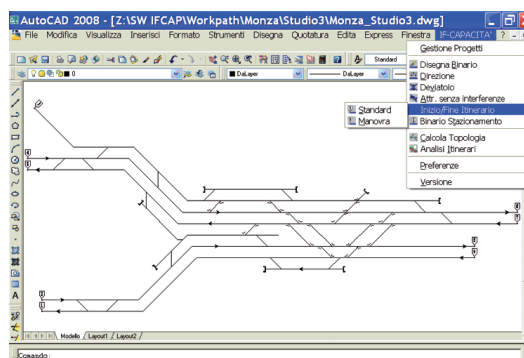


Fig. 4 - Modulo Progetto.

cui sono associate le informazioni peculiari dell'elemento stesso.

È inoltre possibile assegnare ai vari elementi grafici una gamma di 5 colori convenzionali.

Il modulo di calcolo elabora le informazioni introdotte con il modulo progetto e permette all'utente di estendere lo studio all'intero impianto, rilevando in automatico tutti i possibili itinerari presenti, o a parte di esso, attraverso una selezione puntuale dei punti di origine/destinazione. Durante tale operazione è comunque possibile (fig. 5):

- includere/escludere dal calcolo itinerari o parti di impianto;
- assegnare per ogni origine/destinazione volumi di traffico;
- visualizzare in ogni momento tutti gli itinerari o una parte di essi al fine di valutare se l'itinerario selezionato corrisponde a quello effettivamente utilizzato nella circolazione reale; occorre ricordare che la procedura per ogni coppia di origine/destinazione selezionata propone, se esistenti, tutte le alternative di percorso possibili.

Una volta terminata l'operazione di modellazione dell'impianto è possibile completare/rivedere le operazioni di assegnazione dei volumi di traffico e assegnare i tempi di occupazione di tutti gli itinerari, distintamente su un foglio di calcolo.

La compilazione della matrice dei tempi può essere compilata attraverso:

- l'attribuzione automatica di un tempo fisso di interdizione per tutti gli itinerari;
- l'attribuzione automatica di un tempo proporzionale al tipo di incompatibilità;
- l'attribuzione manuale di un tempo specifico per ogni singola incompatibilità.

Terminata la fase di caricamento dati è possibile calcolare nella schermata principale della procedura gli indici sintetici con i valori limiti (fig. 6).

Nella fig. 6 è riportato, ad esempio, insieme alla tabella dei parametri di input, la tabella dei parametri di output.

La procedura consente di gestire impianti con un numero massimo di itinerari pari a 1000, pertanto è in grado di analizzare anche i più grandi impianti ferroviari esistenti in Italia con tempi di calcolo relativamente contenuti.

La possibilità di costruire un archivio condiviso su base aziendale consente di riutilizzare, attraverso apposite funzioni di duplicazione, impianti similari già stu-

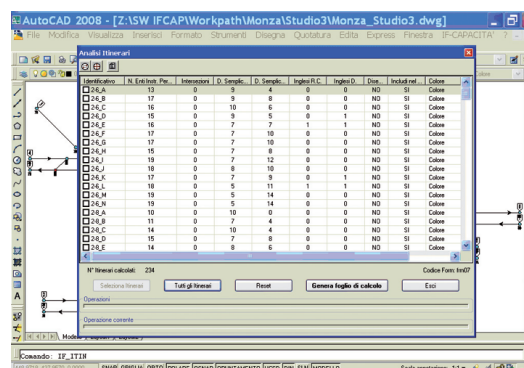


Fig. 5 – Esempio Selezione Itinerari.

diati da altri utenti, minimizzando pertanto i tempi di modellazione dell'oggetto dello studio.

La scelta di utilizzare una piattaforma CAD ha reso l'utilizzo della procedura estremamente semplice e rapido riducendo notevolmente i tempi di analisi; ad esempio per un impianto di medie dimensioni si passa da 5 a 2gg.

Inoltre la possibilità di analizzare, mediante apposita funzione, configurazioni corrispondenti a interruzioni per lavori all'interno degli impianti, ha consentito di valutare le eventuali criticità di circolazione da essi derivanti.

La rapidità di esecuzione delle verifiche d'impianto ne ha consentito l'utilizzo:

- nella valutazione di interventi su impianti esistenti potendo valutare immediatamente la bontà delle scelte funzionali attraverso il confronto diretto tra situazione esistente e possibili configurazioni di progetto;

| Parametri di input | | | Parametri e coefficienti di output | |
|--|---------------------------------|-----|---|------------|
| Periodo d'osservazione (ore) | | | Periodo d'osservazione (sec) (T) | 72.000 |
| 20 | | | Numero totale circolazioni (N) | 398 |
| Tabella compatibilità-%tempi d'occupazione | | | Numero medio di circolazioni compatibili (nmedio) | 2.626 |
| Tipo | Descrizione | % | Tempo medio d'occupazione (tmedio) | 217,576 |
| C | Compatibilità | 0 | Sommatoria dei ritardi (Σ _r) | 7.711,250 |
| A | Coincidenza | 1 | Tempo d'occupazione regolare (B) | 32.976,482 |
| X | Intersezione | 0,5 | Tempo d'occupazione per interferenze (R _p) | 2.936,530 |
| Z | Confluenza | 1 | B+R _p | 35.913,012 |
| S | Divergenza | 0,5 | Coefficiente d'Utilizzazione Regolare (C _{reg}) | 0,4580 |
| U | Scontro frontale | 1 | Coefficiente d'Utilizzazione Totale (C _{tot}) | 0,4988 |
| D | Proseguimento | 1 | Numero itinerari compatibili (classe C) | 44 |
| F | Superamento del punto d'arresto | 1 | | |

Fig. 6 – Sintesi dei risultati.

- nella valutazione di nuovi impianti sia su linee esistenti sia su nuove linee attraverso il confronto tra le varie alternative progettuali;
- per la costruzione di un archivio condiviso permettendo di effettuare analisi da punti di vista diversi ovvero impiantistico, topologico e di capacità di circolazione.

6. Esperienze applicative

L'esperienza condotta su numerosi impianti nell'ambito dei vari progetti affrontati ha consentito la realizzazione di un database (grafico e numerico) delle applicazioni effettuate che si ritiene costituisca una fonte di dati preziosa per lo studio delle configurazioni impiantistiche.

Uno degli aspetti più interessanti della ricerca nel settore è lo studio della configurazione topologica ottimale del piano di stazione in relazione alle sue prestazioni in termini di capacità di circolazione [3], [8], [9], [11]. Nell'ottica di dare un contributo alla ricerca la disponibilità delle applicazioni effettuate ha consentito di sviluppare delle considerazioni, che si riportano nel seguito, basate sulle variazioni degli indici sintetici in funzione delle caratteristiche infrastrutturali e impiantistiche.

In particolare si è esplorata la possibile correlazione tra:

- numero medio (n_{medio}) e numeri di binari di stazione;
- numero medio (n_{medio}) e indice di compatibilità (Ci) definito come rapporto tra coppie di itinerari compatibili e coppie totali;
- numero totale di circolazioni (N) e indice di compatibilità (Ci);
- rapporto R/T quota di ritardo (R) rispetto al tempo totale di osservazione T e numero di binari di stazione.

A tal fine sono stati selezionati dall'archivio di progetti sviluppati una serie di impianti (43) su cui cercare le correlazioni precedentemente descritte.

Gli impianti sono stati suddivisi in base alla topologia ed al numero di linee afferenti definendo 3 famiglie di riferimento:

- stazioni di transito (12 impianti);
- impianti di bivio (15 impianti);
- impianti complessi (16 impianti)

Per rendere possibile il confronto si è sviluppato il calcolo imponendo per tutti gli impianti uno stesso valore del coefficiente di utilizzazione regolare pari a circa 0,40.

A tal fine sono stati ricavati i volumi di traffico che forniscono il valore del coefficiente di utilizzazione prefissato incrementando o riducendo in forma proporzionale i flussi di partenza corrispondenti al programma di esercizio originale.

Di seguito si riportano per ogni famiglia di impianto:

- i principali schemi funzionali (figg. 7, 8a, 8b e 9);
- le tabelle riassuntive degli indici sintetici (tabb. 1, 2 e 3);
- grafici di correlazione (figg. 10a, 10b, 11 e 12).

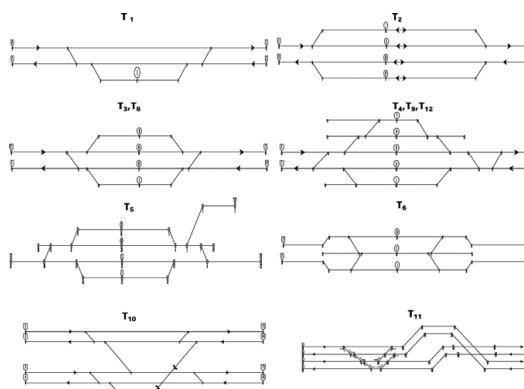


Fig. 7 - Stazioni di transito.

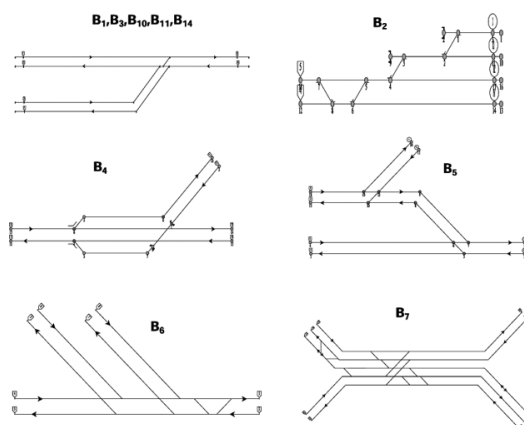


Fig. 8a - Impianti di bivio.

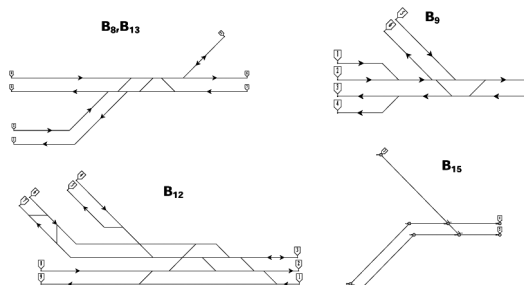


Fig. 8b - Impianti di bivio.

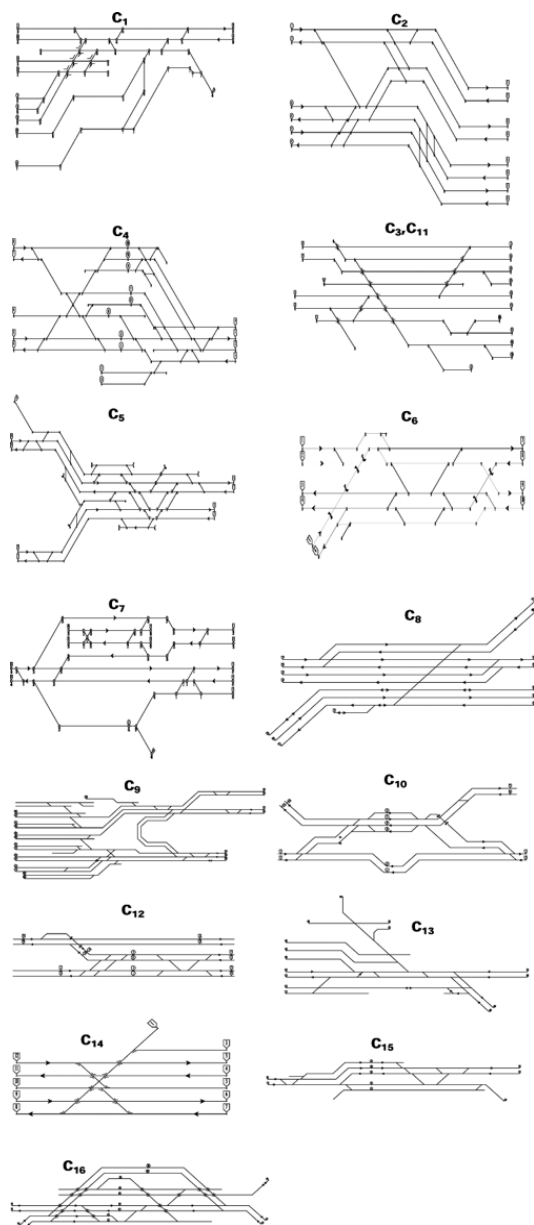


Fig. 9 – Impianti complessi.

I grafici delle diverse famiglie di impianti sono stati costruiti con le stesse scale per facilitare i confronti. Nei grafici sono indicati le rette di regressione ed i relativi parametri solo per i casi in cui il coefficiente di correlazione della popolazione è significativamente maggiore di zero. A

tal fine è stato applicato il test di student adottando un livello di significatività dello 0,05. Nel caso di coefficiente di correlazione significativamente nullo sono stati riportati i soli punti rappresentativi al fine di mostrare il campo di variazione dei valori ottenuti.

Le tabelle 1, 2 e 3 riassumono le correlazioni effettuate ed i parametri delle rette di regressione.

I valori numerici riportati nelle tabelle rappresentano intercetta e coefficiente angolare (in alto); numero di osservazioni e R^2 (in basso).

TABELLA 1
IMPIANTI DI TRANSITO; CORRELAZIONI EFFETTUATE E
PARAMETRI DELLE RETTE DI REGRESSIONE

| | η_{medio} | numero binari | | N | C_i | | R/T |
|-----------------------|-----------------------|---------------|------|---|-------|---|-----|
| | | 0,55 | 0,36 | | - | - | |
| η_{medio} | | 12 | 0,39 | | - | - | |
| numero binari | | | | | | | |
| N | | | | | - | - | |
| C_i | | | | | - | - | |
| R/T | | - | - | | | | |

TABELLA 2
IMPIANTI DI BIVIO; CORRELAZIONI EFFETTUATE E
PARAMETRI DELLE RETTE DI REGRESSIONE

| | η_{medio} | numero binari | N | C_i | | R/T |
|-----------------------|-----------------------|---------------|---|-------|------|-----|
| | | | | 1,14 | 1,32 | |
| η_{medio} | | | | 15 | 0,62 | |
| numero binari | | | | | | |
| N | | | | - | - | |
| C_i | | | | - | - | |
| R/T | | | | | | |

TABELLA 3

IMPIANTI COMPLESSI: CORRELAZIONI EFFETTUATE E PARAMETRI DELLA RETTA DI REGRESSIONE

| | n_{medio} | numero binari | | N | C_i | | R/T |
|---------------|-------------|---------------|-------|---|--------|-------|-----|
| n_{medio} | | 3,35 | -0,13 | | 1,23 | 2,64 | |
| | | 16 | 0,29 | | 16 | 0,38 | |
| numero binari | | | | | | | |
| N | | | | | 127,37 | 544,9 | |
| | | | | | 16 | 0,36 | |
| C_i | | | | | | | |
| R/T | | - | - | | | | |
| | | - | - | | | | |

TABELLA 4

IMPIANTI DI TRANSITO

| Impianto | numero di binari di stazione | N | n_{medio} | C_i | C_{reg} | R/T |
|-----------------|------------------------------|-----|-------------|-------|-----------|----------|
| T ₁ | 3 | 205 | 1,615 | 0,122 | 0,398 | 0,047128 |
| T ₂ | 4 | 210 | 2,085 | 0,540 | 0,380 | 0,078125 |
| T ₃ | 4 | 202 | 1,773 | 0,310 | 0,400 | 0,086144 |
| T ₄ | 5 | 375 | 2,186 | 0,450 | 0,390 | 0,111151 |
| T ₅ | 4 | 176 | 1,571 | 0,380 | 0,380 | 0,104315 |
| T ₆ | 3 | 311 | 1,657 | 0,500 | 0,390 | 0,09673 |
| T ₇ | 3 | 338 | 2,097 | 0,400 | 0,410 | 0,103138 |
| T ₈ | 4 | 196 | 1,532 | 0,420 | 0,400 | 0,077638 |
| T ₉ | 5 | 380 | 2,363 | 0,470 | 0,400 | 0,108726 |
| T ₁₀ | 5 | 335 | 2,99 | 0,490 | 0,408 | 0,051714 |
| T ₁₁ | 4 | 233 | 2,276 | 0,344 | 0,405 | 0,06083 |
| T ₁₂ | 4 | 318 | 1,767 | 0,403 | 0,403 | 0,1162 |

L'esistenza della correlazione tra n_{medio} e numero di binario di stazione (fig. 10a in alto) e l'inesistenza di quella tra n_{medio} e indice di compatibilità (fig. 10a al centro) conferma il limitato effetto delle incompatibilità sulla capacità di circolazione per le stazioni di transito. In questo caso infatti gli itinerari di attraversamento sono in genere

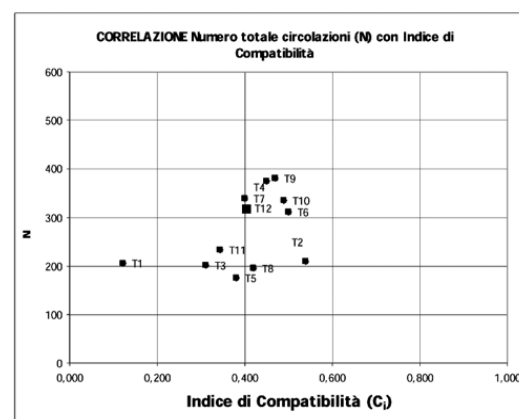
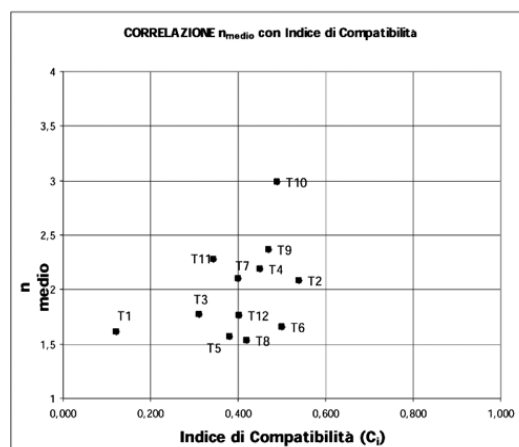
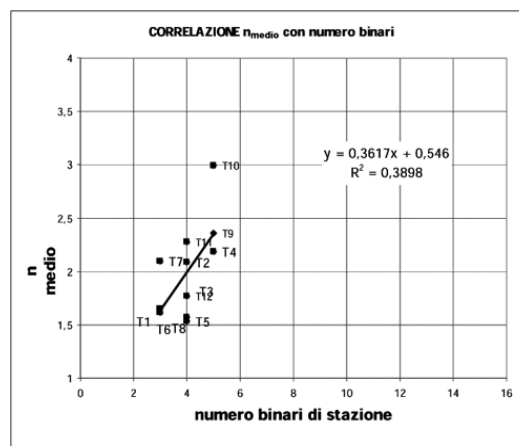


Fig. 10a – Correlazioni per impianti di transito.

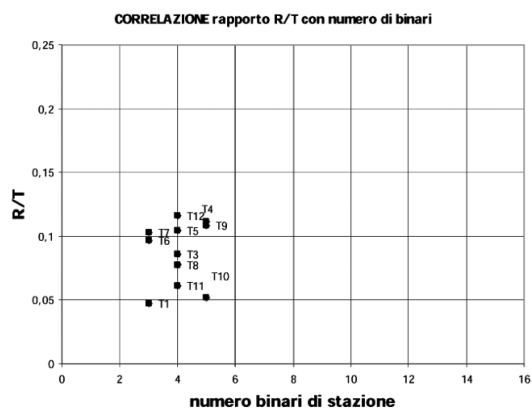


Fig. 10b – Correlazioni per impianti di transito.

meno frequenti rispetto a quelli di collegamento diretto tra i binari di linea e n_{medio} dipende solo dalla quantità di binari di stazione. La retta di regressione ottenuta mostra che il rapporto tra n_{medio} e il numero di binari di stazione è di circa 1 a 2. Il numero totale di circolazioni (N) non risulta correlato all'indice di compatibilità come sarebbe logico aspettarsi. Ciò può dipendere dall'effetto di altri parametri quali la configurazione topologica che porta a valori diversi per le due grandezze a parità di indice di compatibilità.

TABELLA 5

IMPIANTI DI BIVIO

| Impianto | N | n_{medio} | C_i | C_{reg} |
|-----------------|-----|--------------------|-------|------------------|
| B ₁ | 246 | 1,602 | 0,375 | 0,400 |
| B ₂ | 200 | 1,538 | 0,250 | 0,400 |
| B ₃ | 200 | 1,603 | 0,375 | 0,394 |
| B ₄ | 210 | 2 | 0,500 | 0,410 |
| B ₅ | 314 | 1,85 | 0,500 | 0,407 |
| B ₆ | 170 | 1,509 | 0,340 | 0,403 |
| B ₇ | 294 | 1,439 | 0,302 | 0,394 |
| B ₈ | 190 | 1,306 | 0,220 | 0,410 |
| B ₉ | 268 | 1,676 | 0,389 | 0,407 |
| B ₁₀ | 170 | 1,61 | 0,400 | 0,406 |
| B ₁₁ | 225 | 1,711 | 0,375 | 0,400 |
| B ₁₂ | 220 | 1,438 | 0,167 | 0,410 |
| B ₁₃ | 178 | 1,412 | 0,278 | 0,403 |
| B ₁₄ | 246 | 1,608 | 0,250 | 0,398 |
| B ₁₅ | 267 | 1,602 | 0,500 | 0,394 |

Per quanto riguarda gli impianti di bivio le correlazioni sono state limitate al solo indice di compatibilità in quanto, visti i tipi di impianto studiati perde di significato il riferimento al numero di binari di stazione.

Per quanto riguarda la correlazione tra n_{medio} e indice di compatibilità (fig. 11 in alto) non si evidenziano rilevanti dispersioni dei punti rispetto alla retta di regressione probabilmente a conferma di una omogeneità degli schemi funzionali. La dispersione dei punti nel grafico di

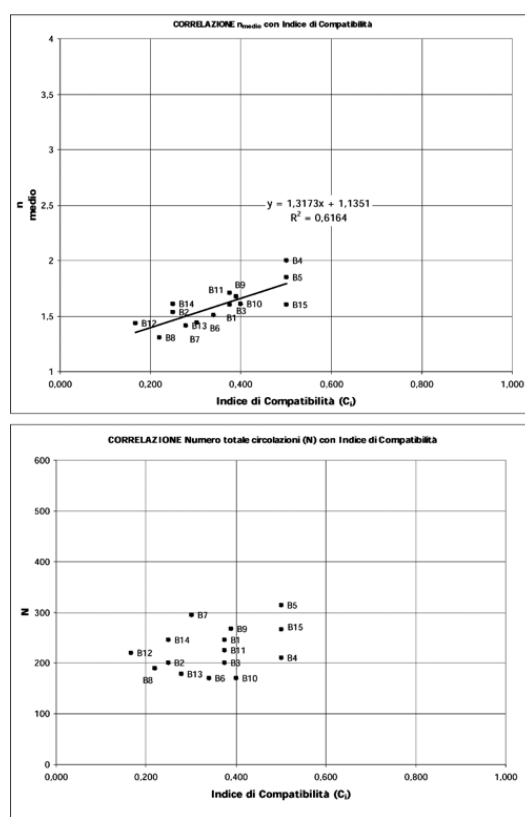


Fig. 11 – Correlazioni per impianti di bivio.

confronto tra numero totale di circolazioni e indice di compatibilità (fig. 11 in basso) evidenzia l'effetto del tempo di interdizione sulla capacità di circolazione. Infatti il numero totale di circolazioni, a parità di n_{medio} quindi nel caso specifico di indice di compatibilità (essendo ad esso proporzionale), dipende dal t_{medio} di interdizione che è legato a sua volta alla estensione degli itinerari e alla rigidità o elasticità di liberazione.

Negli impianti complessi n_{medio} mostra un andamento decrescente all'aumentare del numero di binari di stazio-

TABELLA 6

IMPIANTI COMPLESSI

| Impianti | numero di binari di stazione | N | n _{medio} | C _i | C _{reg} | R/T |
|-----------------|------------------------------|-----|--------------------|----------------|------------------|----------|
| C ₁ | 10 | 234 | 1,931 | 0,340 | 0,396 | 0,090476 |
| C ₂ | 6 | 613 | 3,379 | 0,500 | 0,510 | 0,193244 |
| C ₃ | 8 | 254 | 1,867 | 0,295 | 0,413 | 0,118370 |
| C ₄ | 10 | 416 | 2,092 | 0,500 | 0,428 | 0,089344 |
| C ₅ | 7 | 398 | 2,626 | 0,440 | 0,458 | 0,107100 |
| C ₆ | 5 | 551 | 3,218 | 0,687 | 0,439 | 0,048775 |
| C ₇ | 7 | 286 | 2,535 | 0,560 | 0,437 | 0,127569 |
| C ₈ | 9 | 455 | 2,841 | 0,401 | 0,380 | 0,129292 |
| C ₉ | 14 | 263 | 1,812 | 0,497 | 0,430 | 0,118463 |
| C ₁₀ | 6 | 381 | 2,155 | 0,432 | 0,404 | 0,073180 |
| C ₁₁ | 8 | 276 | 2,12 | 0,295 | 0,395 | 0,112900 |
| C ₁₂ | 6 | 471 | 2,714 | 0,523 | 0,402 | 0,111900 |
| C ₁₃ | 8 | 257 | 1,458 | 0,157 | 0,410 | 0,090940 |
| C ₁₄ | 6 | 345 | 2,913 | 0,332 | 0,396 | 0,117300 |
| C ₁₅ | 5 | 274 | 2,103 | 0,488 | 0,405 | 0,126200 |
| C ₁₆ | 9 | 247 | 1,75 | 0,313 | 0,390 | 0,067020 |

ne (fig. 12 in alto). Ciò potrebbe attribuirsi ad un effetto di incompatibilità crescente con l'aumentare del numero di binari di stazione e quindi della complessità dell'impianto stesso. La correlazione tra n_{medio} e indice di compatibilità evidenzia una dispersione dei punti rispetto alla retta di regressione maggiore di quella osservata per le stazioni di bivio. Ciò può essere attribuito all'effetto dei flussi di circolazione sui singoli itinerari che vengono considerati nel n_{medio} e non nell'indice di compatibilità. A differenza delle stazioni di bivio per gli impianti complessi si rileva una correlazione positiva tra capacità di circolazione (N) e indice di compatibilità a dimostrazione di un diverso effetto dei tempi di interdizione nei due casi (fig. 12 terza dall'alto).

Il numero dei binari di stazione sembra non influenzare, per gli impianti complessi, il termine del ritardo (R/T).

Per le tre famiglie di impianti si è poi provveduto ad effettuare una analisi di sensitività finalizzata a quantificare la variazione in termini di numero totale di circolazioni dovuta alla liberazione elastica applicata agli itinerari.

A tal fine è stato definito un indice di rigidità I_r complessivo dell'impianto definito nel seguente modo:

$$I_r = \frac{\sum_{inc} n n_j^i}{\sum_{inc} n n_j}$$

dove i_r è il tasso di interdizione, espresso come rapporto tra tempo interdizione e tempo di occupazione dell'itinerario interferente.

L'analisi è stata condotta per tutti gli impianti presi in

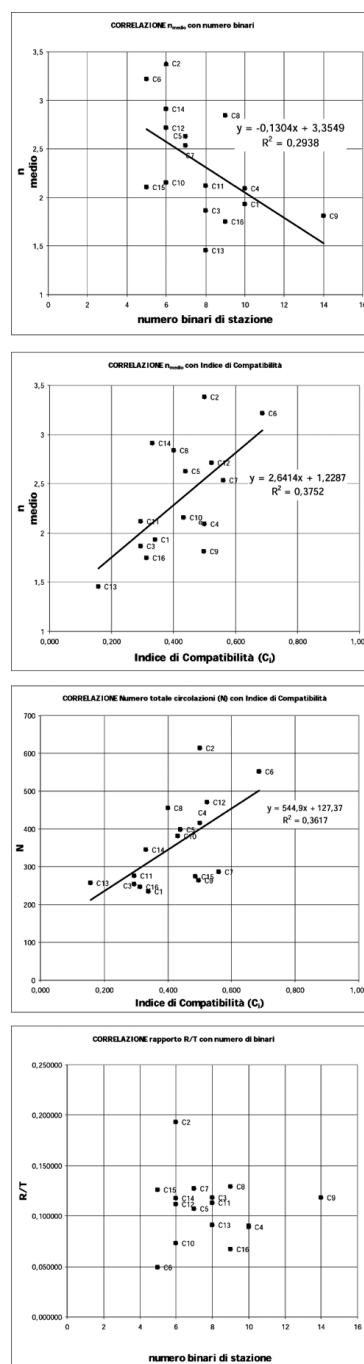


Fig. 12 – Correlazioni per impianti complessi.

esame calcolando la variazione del numero totale di circolazione (N) a parità di coefficiente di utilizzazione regolare (C_{reg}).

Dall'esame delle figg. 13, 14 e 15 è possibile evidenziare come all'aumentare dell'indice di rigidità si riduca la capacità di circolazione (N) con punte anche del 35%.

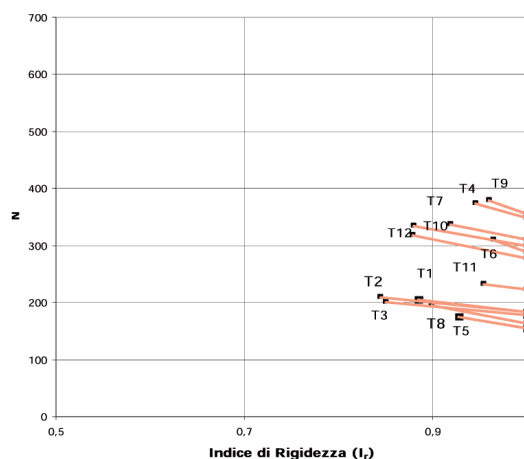


Fig. 13 - Numero totale circolazioni (N) in funzione dell'indice di rigidità per impianti di transito.

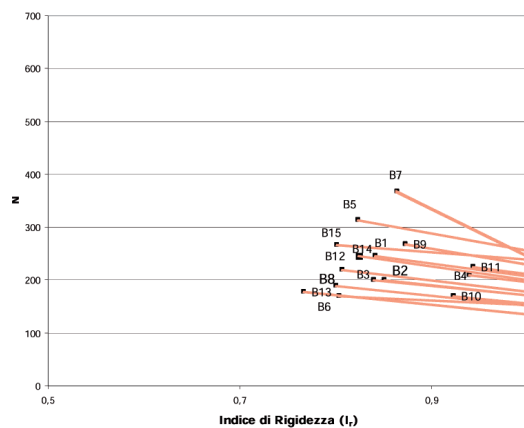


Fig. 14 - Numero totale circolazioni (N) in funzione dell'indice di rigidità per impianti di bivio.

Tali variazioni sono state rilevate per tutte le famiglie di impianti e possono essere un termine di riferimento nella valutazione della efficacia dei sistemi di comando e controllo della stazione nei riguardi della capacità di circolazione.

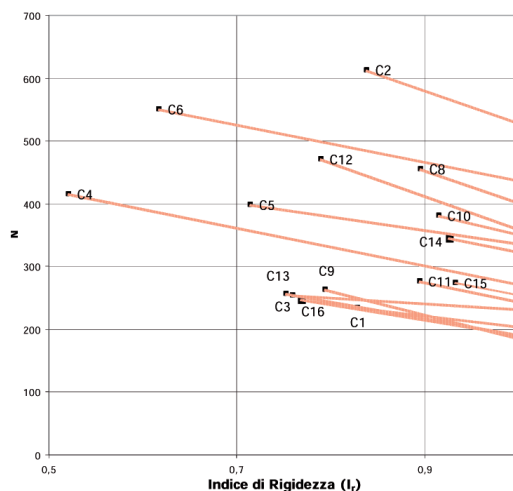


Fig. 15 - Numero totale circolazioni (N) in funzione dell'indice di rigidità per impianti complessi.

7. Conclusioni

Dall'analisi eseguite sono emerse le conclusioni di seguito riportate:

- la topologia dell'impianto ha una forte influenza sulla capacità di circolazione e l'utilizzo di uno strumento in grado di analizzare in maniera rapida vari layout funzionali permette di ottimizzare le scelte progettuali;
- la notevole quantità di applicazioni effettuate e le correlazioni finora ottenute costituiscono un riferimento utile per le attività di progettazione e forniscono alcune valutazioni dei maggiori o minori legami tra le grandezze osservate;
- non è ancora possibile stabilire una correlazione stabile tra forma dell'impianto e sue prestazioni in quanto la capacità di circolazione dipende, a parità di collegamenti tra le linee, dalle caratteristiche topologiche che determinano le compatibilità e incompatibilità tra gli itinerari, dalla distribuzione delle circolazioni e dalle caratteristiche dei sistemi di comando e controllo;
- le applicazioni disponibili e quelle che verranno sviluppate nel seguito potranno consentire approfondimenti delle analisi per verificare ulteriori correlazioni e rafforzare quelle emerse nel corso dello studio.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. POTTHOFF, *Verkehrsstromunglehre*, Transpress VEB Berlino 1963-1972.

- [2] G.R. CORAZZA, A. MUSSO, "Gli impianti di stazione e la loro analisi topologica", *Ingegneria Ferroviaria* n.11/1987.
- [3] L. GIULIANI, G. MALAVASI, S. RICCI, "Analisi di un impianto di stazione sulla base del programma di esercizio", *Ingegneria Ferroviaria* n.10/1989.
- [4] G.R. CORAZZA, A. MUSSO, "La circolazione e gli impianti ferroviari. La verifica a lungo termine", *Ingegneria Ferroviaria* n.10/1991.
- [5] G. MALAVASI, C. MARINI, G. PETRILLI, "Interruzione di esercizio per avaria. Valutazione mediante simulazione", *Ingegneria Ferroviaria* n. 4/1992.
- [6] G.R. CORAZZA, M. ROTA, "Osservazione sull'impiego della simulazione per lo studio di nodi ferroviari complessi", *Ingegneria Ferroviaria* n. 6/1992.
- [7] G. MALAVASI, S. RICCI, "Use of synthetic models for the evaluation of reliability and regularity of railway operation", *Atti della conferenza internazionale Railway Traction Systems*, Capri 5/2001.
- [8] G. MALAVASI, S. RICCI, "A model for the evaluation of basic interval timetables and their effects on the carrying capacity of the stations", *Atti del World Congress on Railway Research 2001*, Koln 11/2001.
- [9] L. FRANCESCHINI, G. MALAVASI, "Il dimensionamento dei piani di stazione mediante tecniche di ricerca combinatoria", *Ingegneria Ferroviaria* n. 2/2003.
- [10] G. MALAVASI, A. PERESSO, G. PETRILLI, P. RIVOLI, "Campi di applicazione, requisiti e automazione delle procedure di analisi della capacità di circolazione degli impianti ferroviari", *Convegno CIFI Napoli 2003 – Mostra Convegno "Ricerca e sviluppo dei sistemi ferroviari vol. 1 Napoli, 9 e 10 maggio 2003"*.
- [11] D. CRENCA, G. MALAVASI, S. RICCI, "Dependence of railways lines carrying capacity by signalling systems and track geometry", *Atti del 1st International Seminar on Railways Operations Modelling and Analysis*, 8-10 giugno 2005. Delft.

Sommaire

AUTOMATION ET APPLICATIONS DES PROCÉDURES D'ANALYSE DE LA CAPACITÉ DE CIRCULATION DES SYSTÈMES FERROVIAIRES

Les vérifications de la capacité de circulation des systèmes ferroviaires ont une importance fondamentale dès leur phase de projet, afin de détecter la présence éventuelle de cou de bouteille dans ces systèmes. Les analyses de la capacité de circulation des systèmes utilisent différentes méthodologies d'approche, parmi lesquelles, d'intérêt particulier pour le support au projet sont les méthodes synthétiques. Celles-ci permettent, en fait, d'évaluer et comparer les différentes solutions de façon relativement rapide, tout en fournissant des résultats fiables dès les toutes premières phases des études de faisabilité.

Ce mémoire décrit le processus d'automatisation de telles méthodologies, la procédure développée et les expériences applicatives réalisées au cours des années.

Summary

AUTOMATION AND APPLICATIONS FOR RAILWAY SYSTEM TRAFFIC CAPACITY ANALYSIS PROCEDURES

Control checks on railway system traffic capacity are of significant importance within the context of railway design, since they often highlight the bottlenecks of a railway system. There are different methodological approaches to analysing railway system traffic capacity. Particularly interesting for support to railway systems design are the synthetic methods. These methods allow different solutions to be evaluated and compared with one another in a relatively short time providing reliable results in the early stages of feasibility studies.

This paper describes the automation process of such methodologies, the procedure developed and the applications conducted over the years.

Zusammenfassung

AUTOMATISIERUNG UND VERWENDUNG VON METHODEN FÜR DIE RECHNUNG DER LEISTUNGSFAHIGKEIT VON BAHNANLAGEN

Die rechnerische Leistungsfähigkeitsnachprüfungen von Bahnanlagen sind sehr wichtig, indem die Engpässe einer Eisenbahnnetz darin erkennbar sind. Es gibt etliche Typen von Methoden, von denen die synthetische Methoden von besonderer Bedeutung für Anlagenentwurf sind. Nämlich erlauben sie eine schnelle Bewertung und einen deutlichen Vergleich von verschiedenen Varianten. Hier werden es das Automatisierungsverfahren solcher Methoden und die Erfahrungen, die seit langen gemacht wurden, vorgestellt.