

## ANALISI E RICERCA DI ZONE OPERATIVE PER TRENI MERCI A TRAZIONE DISTRIBUITA

L. Cantone<sup>a</sup>, V. Vullo<sup>b</sup>

*Università degli Studi di Roma - Dipartimento di Ingegneria dell'Impresa "Mario Lucertini",  
Viale del Politecnico, 00123 Roma,  
e-mail: <sup>a</sup> [Luciano.Cantone@uniroma2.it](mailto:Luciano.Cantone@uniroma2.it), <sup>b</sup> [Vincenzo.Vullo@uniroma2.it](mailto:Vincenzo.Vullo@uniroma2.it)*

### Sommario

Il necessario incremento di efficienza del trasporto ferroviario merci si orienta nella direzione di un aumento della lunghezza del treno, che può essere convenientemente ottenuto mediante l'utilizzo della trazione/frenatura distribuita. Il lavoro analizza le zone di funzionamento sicuro (in termini delle sole forze longitudinali scambiate tra veicoli adiacenti durante la frenatura) al variare della massa trasportata e della lunghezza del treno. Si dimostra che, all'aumentare di queste ultime, è necessario ottimizzare la disposizione delle masse lungo il treno per incrementare in sicurezza l'efficienza del trasporto ferroviario; si dimostra inoltre che l'ottimale disposizione della locomotiva secondaria verso i 2/3 della lunghezza complessiva del treno garantisce una notevole riduzione delle forze in compressione ed un bilanciamento con quelle in trazione. Il lavoro mostra, infine, come la variabilità dei parametri tecnici di funzionamento effettivo del treno contribuisca in modo rilevante al valore delle forze scambiate tra i veicoli durante una frenatura.

### Abstract

The desired increment of freight railway transport is oriented towards an increment of train length, which can be conveniently achieved by means of distributed traction/braking. This paper analyses the zones of safe working (in terms of the only in-train forces) by considering the variation of transported mass and length of the train. By increasing these latter quantities, it is worthwhile to optimize the load distribution along the train in order to safely increase the efficiency of railway transportation; furthermore, the optimal position of the slave locomotive around 2/3 of total train length guarantees a considerable reduction of compressive in-train forces and a balance with the tension in-train forces. Finally, the paper shows that the variability of technical parameters, characterizing the actual behaviour of the train, significantly contributes to the value of in-train forces arising during a braking.

**Parole chiave:** trasporto ferroviario merci, trazione/frenatura distribuita, ottimizzazione della distribuzione delle masse, analisi statistica.

### 1. INTRODUZIONE

La strategia più immediatamente percorribile per aumentare l'efficienza del trasporto ferroviario delle merci in Europa è quella di aumentare la lunghezza dei treni merci e, conseguentemente, la capacità di carico. Occorre però stabilire nuove e sicure condizioni operative, ad esempio, in termini di velocità massima o di applicazione della massima forza di trazione. Le altre possibilità come, ad esempio, l'aumento della velocità media o della massa trasportata per asse (vedi [1]) o, ancora, l'aggiornamento dei veicoli ferroviari, richiedono investimenti in termini sia di infrastrutture ferroviarie sia di materiale rotabile e, più specificatamente, di carri merci, difficili da finanziare nell'attuale momento critico in cui versa l'economia mondiale.

Per le peculiari caratteristiche dei sistemi frenanti UIC, largamente diffusi in Europa, l'incremento della lunghezza del treno richiede l'utilizzo di una o più locomotrici secondarie poste lungo il treno, aventi il duplice scopo di: i) svuotare la condotta generale in più punti e rendere, quindi, l'applicazione dell'azione frenante, ai cilindri freno dei diversi carri merci, meno asincrona; ii) aumentare la forza traente necessaria per accelerare in maniera rapida il treno che, a causa della maggiore lunghezza, sarà ovviamente più pesante.

L'incremento della lunghezza, e quindi della massa complessivamente trasportata dal treno, mediante l'introduzione di locomotrici remote (o secondarie) pone il problema tecnologico della comunicazione tra le medesime, che può essere risolto sostanzialmente in due modi: a) la comunicazione filare (cablando i carri tra le locomotrici, in modo da creare un collegamento elettrico e funzionale per la trasmissione dei comandi dalla locomotrice principale a quelle secondarie), b) la comunicazione radio (installando pannelli di comunicazione radio sulle diverse locomotrici senza alterare i carri merci). Il primo modo è più costoso, ma consente un funzionamento con un'affidabilità della comunicazione elevatissima in tutte le condizioni operative; il secondo è meno costoso, ma presenta problemi di ritardo di comunicazione tra le loco e di affidabilità di comunicazione, per particolari configurazioni del tracciato: curve, gallerie, boschi, ...

Nonostante i succitati inconvenienti, dato l'interesse, per la sua economicità, della seconda soluzione tecnologica, in questa sede si prenderà in considerazione solamente quest'ultima; inoltre, si limiterà l'analisi alla presenza di una sola locomotrice secondaria. Questo problema è stato affrontato in un precedente lavoro, con riferimento ad un particolare tipo di treno, costituito da due sotto-treni identici; in detto lavoro, si erano valutate le diverse condizioni di funzionamento fuori specifica, vale a dire quelle nelle quali manca la comunicazione radio tra le due loco [2].

In questa sede, si estende lo studio generalizzandolo a sotto-treni comunque costituiti, per cui si considera anche l'eventualità che il secondo locomotore sia posto non al centro del treno con lo scopo di offrire un contributo alla definizione delle migliori configurazioni di treno a trazione distribuita. Le simulazioni numeriche sono effettuate utilizzando il software *TrainDy*, certificato dall'UIC per questo tipo di calcolo e sviluppato presso l'Università di "Tor Vergata" [3].

Mediante la realizzazione di un codice di calcolo per l'automatica generazione di configurazioni di treno aventi, tra l'altro, prefissati valori di lunghezza e massa trasportata, s'individuano le zone operative per treni a trazione distribuita, considerando come parametro di riferimento le forze longitudinali in compressione a 10 m agenti in frenature d'emergenza. Mediante l'applicazione della metodica qui presentata è possibile valutare rapidamente quelle che sono le scelte migliori in termini di lunghezza del treno, sua massa, posizione della seconda locomotiva, disposizione del carico lungo il treno, indicazioni utilissime in fase di pianificazione e gestione del trasporto merci. È altresì da far notare esplicitamente che, specialmente in caso di comunicazione radio tra le locomotive, è necessario porre in essere anche un'analisi dei rischi in modo da valutare la sicurezza nel caso in cui, per qualche motivo, il comando di frenatura non sia correttamente trasmesso.

Nel seguito s'illustra dapprima il modello analitico, che consente di generare automaticamente composizioni di treni aventi determinati requisiti in termini di massa e lunghezza, e, successivamente, si riportano i risultati delle simulazioni numeriche condotte con il codice *TrainDy*.

## 2. MODELLO ANALITICO

Il modello analitico, che di seguito si espone, consente di creare automatiche composizioni di treno tali da soddisfare i requisiti in termini di lunghezza ( $L_T$ ) e di massa ( $M_T$ ) complessivamente trasportata dal convoglio ferroviario. Nella definizione del treno è, inoltre, possibile specificare: i) la frazione ( $F_i$ ) di ciascun tipo di veicolo da utilizzare; ii) per ogni tipo di veicolo, la diversa frazione ( $f_{ij}$ ) di massa trasportata ( $m_{ij}$ ). Le precedenti quantità,  $L_T$ ,  $M_T$ ,  $F_i$ ,  $f_{ij}$ ,  $m_{ij}$ , sono gli input del modello insieme al tipo di veicolo  $i$ -esimo (ci sono  $n_v$  tipi diversi di veicoli nel treno); da queste grandezze sono calcolati automaticamente i numeri di veicoli di ogni tipo, trasportanti una data massa, indicati con  $n_{ij}$ , e, quindi, le composizioni dei treni che è richiesto generare. Detto  $n_{mi}$  il numero di diversi livelli di massa

trasportata dal veicolo  $i$ , il numero di incognite  $n_{ij}$  è pari a  $\sum_{i=1}^{n_v} n_{mi}$ .

Indicati, quindi, con  $n_{ij}$  i numeri di veicoli di tipo  $i$  che portano il livello di massa  $j$  (indicato prima con  $m_{ij}$ ), i veicoli di tipo  $i$  nel treno che s'intende costituire sono pari a:

$$n_i = \sum_{j=1}^{n_{mi}} n_{ij} \quad (1)$$

Il numero di veicoli di cui è costituito il treno è  $n_T = \sum_{i=1}^{n_v} n_i$ .

Per le frazioni di veicoli di un tipo vale:  $F_i = \frac{n_i}{\sum n_i}$ . Esplicitando la relazione precedente ed utilizzando la (1) per i diversi tipi di veicoli, si possono scrivere  $n_v-1$  equazioni del tipo:

$$F_i \sum_{j=1}^{n_{m1}} n_{1j} + F_i \sum_{j=1}^{n_{m2}} n_{2j} + \dots + F_i \sum_{j=1}^{n_{m_{n_v}}} n_{n_v j} = \sum_{j=1}^{n_{mi}} n_{ij} \quad (2)$$

Per le frazioni di massa trasportata dal generico veicolo si può scrivere in maniera analoga:  $f_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i}$ .

Sempre sfruttando la (1), è possibile scrivere, per ogni tipo di veicolo,  $n_{mi}-1$  relazioni del tipo:

$$f_{ij} \cdot n_{i1} + f_{ij} \cdot n_{i2} + \dots + f_{ij} \cdot n_{i n_{mi}} = n_{ij} \quad (3)$$

Dette  $l_i$  le lunghezze dei diversi veicoli, la lunghezza del treno sarà pari a:

$$l_1 \sum_{j=1}^{n_{m1}} n_{1j} + l_2 \sum_{j=1}^{n_{m2}} n_{2j} + \dots + l_{n_v} \sum_{j=1}^{n_{m_{n_v}}} n_{n_v j} = L_T, \quad (4)$$

mentre la massa del treno è pari a:

$$\sum_{i,j} n_{ij} \cdot m_{ij} = M_T \quad (5)$$

Al fine di rendere più agevole la comprensione delle equazioni, esse sono di seguito scritte, per fissare le idee, nel caso particolare di tre veicoli diversi ( $n_v = 3$ ), con tre livelli di massa per il primo veicolo ( $n_{m1} = 3$ ), due per il secondo ( $n_{m2} = 2$ ) e quattro per il terzo ( $n_{m3} = 4$ ).

Le equazioni del tipo (2) si scrivono:

$$\begin{aligned} F_1(n_{11} + n_{12} + n_{13}) + F_1(n_{21} + n_{22}) + F_1(n_{31} + n_{32} + n_{33} + n_{34}) &= (n_{11} + n_{12} + n_{13}) \\ F_2(n_{11} + n_{12} + n_{13}) + F_2(n_{21} + n_{22}) + F_2(n_{31} + n_{32} + n_{33} + n_{34}) &= (n_{21} + n_{22}) \end{aligned} \quad (6)$$

Le equazioni del tipo (3) si scrivono:

$$\begin{aligned} f_{11} \cdot n_{11} + f_{11} \cdot n_{12} + f_{11} \cdot n_{13} &= n_{11} \\ f_{12} \cdot n_{11} + f_{12} \cdot n_{12} + f_{12} \cdot n_{13} &= n_{12} \\ f_{21} \cdot n_{21} + f_{21} \cdot n_{22} &= n_{21} \\ f_{31} \cdot n_{31} + f_{31} \cdot n_{32} + f_{31} \cdot n_{33} + f_{31} \cdot n_{34} &= n_{31} \\ f_{32} \cdot n_{31} + f_{32} \cdot n_{32} + f_{32} \cdot n_{33} + f_{32} \cdot n_{34} &= n_{32} \\ f_{33} \cdot n_{31} + f_{33} \cdot n_{32} + f_{33} \cdot n_{33} + f_{33} \cdot n_{34} &= n_{33} \end{aligned} \quad (7)$$

L'equazione relativa alla lunghezza complessiva (4), invece, diventa:

$$l_1(n_{11} + n_{12} + n_{13}) + l_2(n_{21} + n_{22}) + l_3(n_{31} + n_{32} + n_{33} + n_{34}) = L_T \quad (8)$$

Infine, la (5) si scrive:

$$(n_{11}m_{11} + n_{12}m_{12} + n_{13}m_{13}) + (n_{21}m_{21} + n_{22}m_{22}) + (n_{31}m_{31} + n_{32}m_{32} + n_{33}m_{33} + n_{34}m_{34}) = M_T \quad (9)$$

Il problema è chiaramente sovradeterminato: c'è un'equazione in più rispetto al numero delle incognite, nel caso in cui si voglia specificare contemporaneamente sia la lunghezza del treno sia la sua massa (gli altri parametri in input, come la frazione di veicoli di un tipo o i diversi livelli di massa per ogni tipo, devono essere sempre specificati giacché rappresentano il tipo di materiale rotabile che si desidera trasportare). Ciò vuol dire che la soluzione non è tale da soddisfare tutte le equazioni; nonostante ciò, seppur siano violate le richieste riguardo alle frazioni di veicoli da usare, è possibile generare automaticamente configurazioni di treno con i desiderati valori di massa e lunghezza con errori massimi inferiori all'1% rispetto al dato atteso. Si noti che, ovviamente, dovendo la soluzione essere rappresentata da numeri interi e positivi, in genere, anche nel caso in cui sia specificata semplicemente la lunghezza e/o la massa del treno, il sistema precedente non ha una soluzione esatta.

### 3. Dati in input

I veicoli, tutti del tipo porta container, utilizzati nelle composizioni di treno automaticamente generate mediante il tool numerico che implementa il modello analitico presentato in precedenza sono riportati in Tabella 1 con alcune grandezze tipiche; la Tabella 2 riporta, invece, la distribuzione dei carichi (prima chiamati con  $m_{ij}$ ) con le rispettive percentuali (indicate con  $f_{ij}$ ) per ogni veicolo. Utilizzando la simbologia prima riportata si può affermare che i coefficienti  $F_i$  valgono  $1/6$ ,  $n_v$  vale 6 ed i coefficienti  $n_{mi}$  valgono tutti 2. Inoltre,  $f_{11}$  vale 0.25,  $f_{12}$  vale 0.75;  $m_{11}$  vale 70 e  $m_{12}$  vale 135 e così via come si desume facilmente dalla Tabella 2.

Tabella 1: Veicoli ed altri dati usati per le simulazioni

	<b>Sggrms715</b>	<b>Sgmmns-738</b>	<b>Sgns691</b>	<b>Sgns692</b>	<b>Sgns705</b>	<b>Sgns735</b>
Lunghezza [m]	33.94	13.13	19.74	19.64	19.74	19.64
Tara [t]	30	19.38		20		
Numero assi	6			4		
% partecipazione			1/6			
Tipo di freno			A ceppi, ghisa			
Regime frenatura	G (tempi caratteristici di riempimento del cilindro freno 24 s e 28 s [TRNDY])					

Tabella 2: Distribuzione del carico per ogni veicolo

	<b>Sggrms715</b>	<b>Sgmmns-738</b>	<b>Sgns691</b>	<b>Sgns692</b>	<b>Sgns705</b>	<b>Sgns735</b>
Massa [t] / Percentuale [%]	70 / 25	55 / 25	50 / 20	60 / 20	55 / 20	20 / 30
	135 / 75	90 / 75	90 / 80	90 / 80	90 / 80	90 / 70

S'intende esplicitamente evidenziare che il caso di studio qui riportato è solo un esempio e non corrisponde a nessun problema concreto specifico, sebbene i valori utilizzati in Tabella 2 siano plausibili, mentre i dati di Tabella 1 sono desumibili dal database di *TrainDy*. Nonostante ciò le conclusioni generali che si ottengono sono un sicuro contributo alla definizione di configurazioni di treni interoperabili a trazione e frenatura distribuita.

I treni che si analizzeranno nel seguito sono costituiti, in una prima fase, da due sotto-treni, aventi medesima lunghezza e massa e poi si analizzerà l'effetto dello spostamento della seconda locomotiva verso la coda del treno: in questo caso il primo sotto-treno sarà via via più lungo e pesante. L'intervallo di lunghezza del singolo sotto-treno varia da 500 m a 850 m (locomotiva esclusa), vale a

dire da una lunghezza di treno relativamente importante (è questa la lunghezza dei treni “lunghi” circolanti in Italia) ad una di recente approvazione in Germania (per il trasporto merci con la Danimarca). Invece, per quanto concerne la massa del singolo sotto-treno, s’indaga l’intervallo 2000 t – 2600 t (locomotiva esclusa); a questo proposito si ricordi che 2500 t è il valore massimo di massa di un treno interoperabile, secondo la [4], che può circolare in Europa

#### 4. Risultati

Fissata la lunghezza e la massa (entrambe senza locomotive) del singolo sotto-treno è stata generata automaticamente una serie di composizioni rispettanti detti limiti con un errore sempre inferiore allo 0.5%, aventi una diversa disposizione dei veicoli lungo il treno. Al fine di stabilire il numero di simulazioni da eseguire, sono state compiute 1500 simulazioni sul caso presumibilmente più complesso, vale a dire quello con massa e lunghezza del sotto-treno, rispettivamente di 2600 t e 850 m. Considerando una frenatura di emergenza contemporanea tra le due locomotive dalla velocità di 30 km/h, la Figura 1 riporta l’andamento della deviazione standard al variare del numero di simulazioni effettuate: si nota che dopo 300 simulazioni l’oscillazione è confinata sotto il 10% di variabilità rispetto al valore che essa ha per 1500 simulazioni (la banda  $\pm 10\%$  è rappresentata in Figura 1 mediante due linee orizzontali tratteggiate). I risultati che si mostrano a riguardo dell’effetto della variabilità della posizione dei veicoli sono tutti ottenuti considerando 300 simulazioni al fine di ridurre l’onere computazionale e non richiedere una precisione eccessiva su un caso che è comunque esemplificativo.

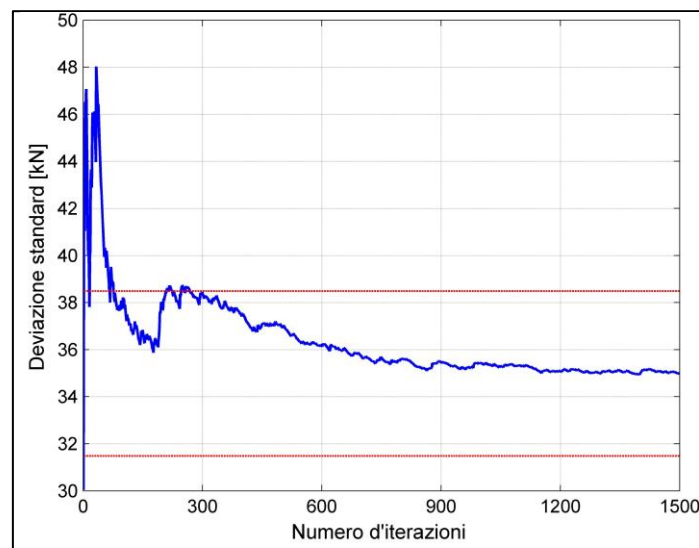


Figura 1: Andamento della deviazione standard con il numero di simulazioni.

La Figura 2 riporta il valore di forze longitudinali di compressione a 10 m ( $FLC_{10}$ ) per diverse lunghezze e masse complessive dei treni, con il segno cambiato. La Figura 2 (a) riporta per ogni treno il valore riguardante il percentile 1% (solo l’1% dei treni hanno forze di compressione più grandi del valore riportato), mentre la (b) si riferisce al percentile 99% (solo l’1% dei treni ha forze di compressione più piccole dei valori indicati). I valori della parte (a) servono a fornire un’idea delle forze longitudinali in compressione a 10 m che si hanno distribuendo casualmente il carico lungo il treno, mentre i valori della parte (b) sono indicativi delle migliori performance ottenibili ottimizzando la distribuzione delle masse lungo il treno. E’ evidente come, ottimizzando la distribuzione delle masse lungo il treno, sia possibile trasportare elevate quantità di massa in sicurezza. La Figura 2 riporta, per ogni percentile, una superficie polinomiale interpolante i dati, rappresentati mediante circonferenze; dalla figura è altresì evidente come le forze di compressione a 10 m aumentano maggiormente con la lunghezza del treno, fissata la massa trasportata, piuttosto che con la massa del treno, fissata la lunghezza complessiva.

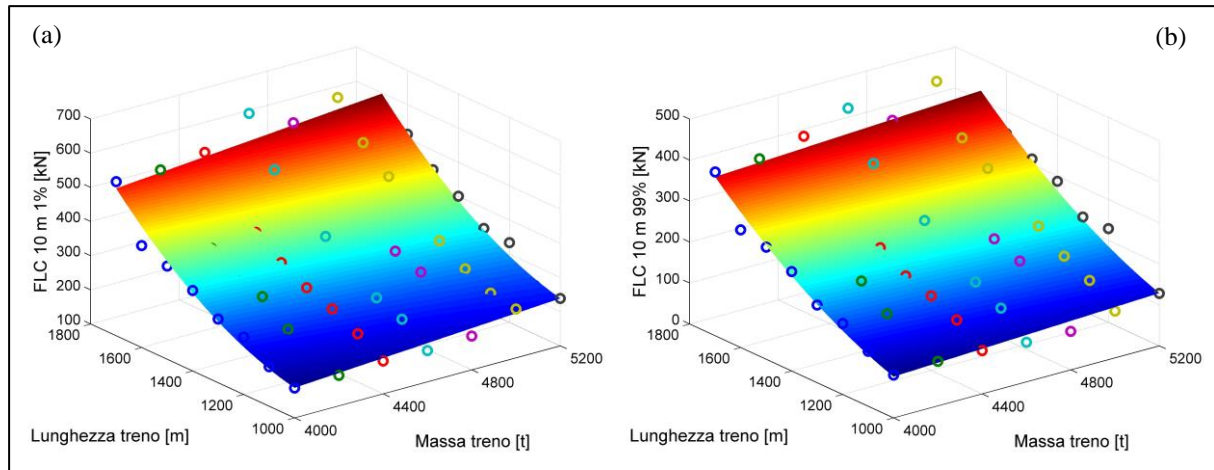


Figura 2: (a)  $FLC_{10}$  1% percentile, (b)  $FLC_{10}$  99% percentile.

La Figura 3 riporta le linee di livello correlate alla figura precedente: in questo modo è molto più facile compiere scelte di massima sull'entità del carico che si può trasportare fissata una certa lunghezza del treno e noto il livello di forze longitudinali ammissibili.

È peraltro da notare che avere un elevato valore di forza longitudinale di compressione a 10 m non comporta assolutamente il deragliamento dei veicoli coinvolti: ciò avviene quando questo valore si verifica in curva (o su uno scambio) ed i veicoli sono caratterizzati da un carico notevolmente diverso tra loro, tale da produrre una differente altezza tra i respingenti, cosa che causa il sollevamento e, quindi, il deragliamento del veicolo più leggero. Ciò vuol dire che, ai fini di una più completa analisi di sicurezza, è necessario associare al calcolo della dinamica longitudinale quello del contatto tridimensionale tra le teste dei respingenti, per stabilire l'effettiva possibilità di deragliamento del treno [5].

La Figura 3 (b) rende evidente che, ottimizzando la distribuzione delle masse lungo il treno e scegliendo veicoli in grado di sopportare 400 kN di  $FLC_{10}$ , è possibile avere treni che trasportano oltre 5000 t e lunghi oltre 1600 m; è però da notare che, come evidenziato in [6], è necessario garantire la sicurezza dei treni a trazione e frenatura distribuita con comando radio anche nel caso in cui la radio venga meno. Sulle diverse e specifiche strategie che possono essere messe in atto al riguardo non si riferisce in questa sede.

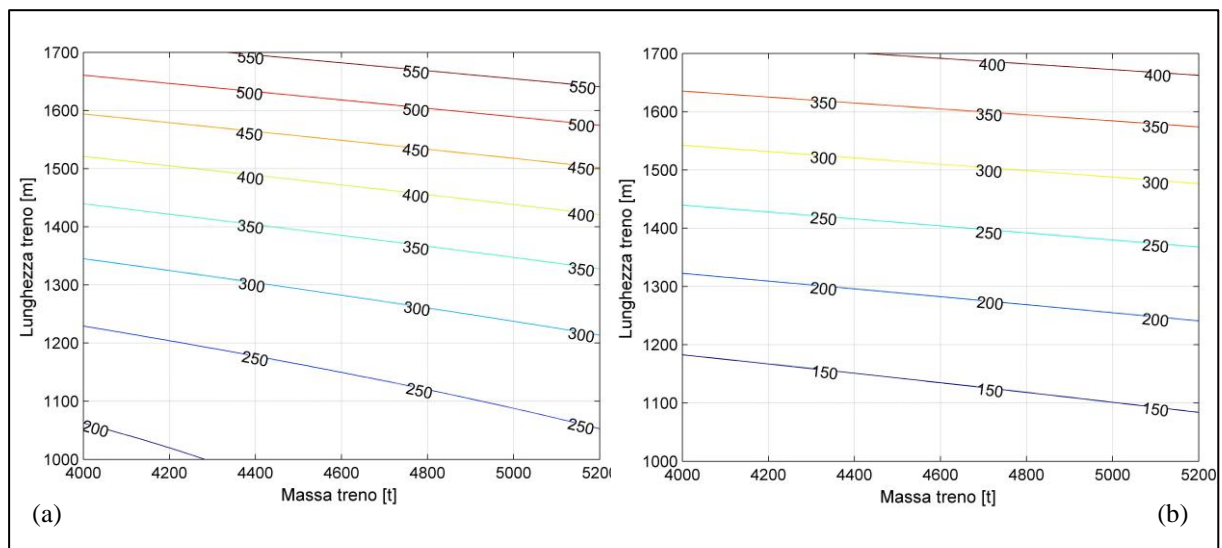


Figura 3: Linee di livello per  $FLC_{10}$  del percentile 1% in (a) e 99% in (b).

Al fine di fornire un'idea circa la variabilità delle forze longitudinali di compressione al variare della disposizione dei veicoli, fissata la massa e la lunghezza complessiva del treno, si osservi la Figura 4 che riporta la deviazione standard per i diversi casi sin qui esaminati, in (a) mediante il grafico

tridimensionale con superficie interpolante polinomiale ed in (b) per mezzo delle linee di contorno: è evidente che la deviazione standard aumenta all'aumentare sia della massa sia della lunghezza del treno.

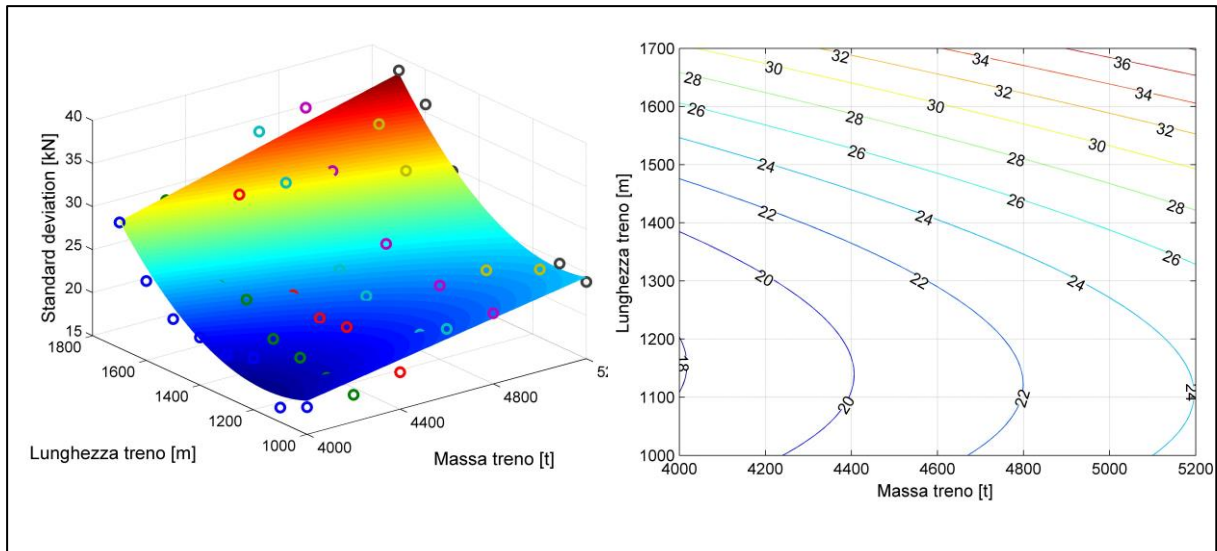


Figura 4: Deviazione standard 3D (a) e linee di contorno (b).

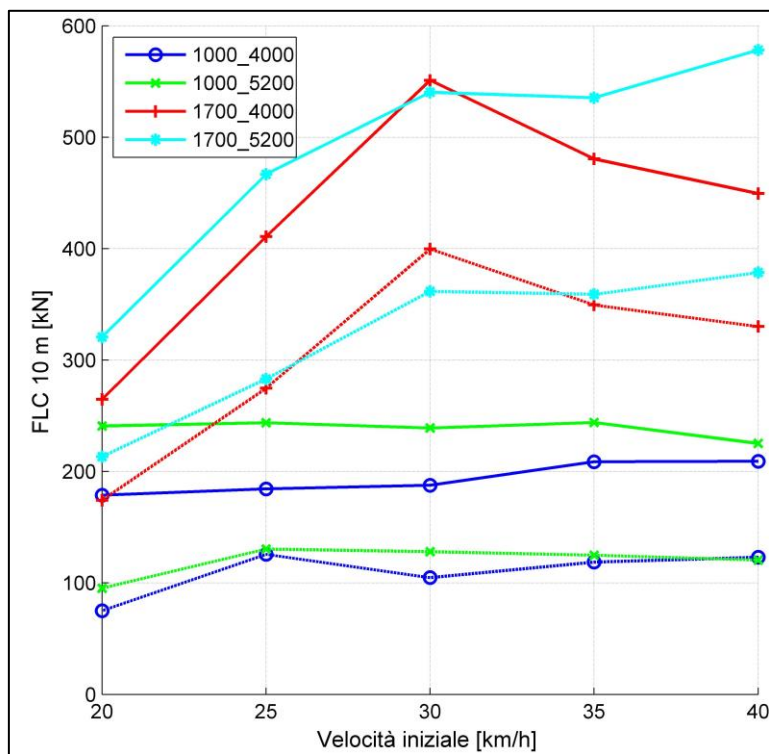


Figura 5: Dipendenza delle FLC<sub>10</sub> dalla velocità iniziale di frenatura.

I risultati fin qui mostrati sono riferiti, come detto, ad una frenatura di emergenza contemporanea tra le due locomotive a partire da 30 km/h. La Figura 5 mostra l'andamento delle FLC<sub>10</sub> 1% percentile (tratto pieno) e 99% percentile (tratto discontinuo) per velocità iniziali che variano tra 20 e 40 km/h con incremento di 5 km/h. Le diverse curve di Figura 5 si riferiscono ai quattro estremi di variazione della lunghezza e della massa del treno: aumentando la massa e la lunghezza del treno si assiste anche ad una maggiore variabilità delle forze con la velocità iniziale di frenatura. La notevole variabilità delle forze FLC<sub>10</sub> con la velocità di marcia rende evidente che per mettere in circolazione treni di

elevata lunghezza e massa trasportata è anche necessario studiarne il comportamento per diverse velocità operative.

Finora le configurazioni analizzate erano tali da avere la seconda locomotiva sempre posta nel mezzo del treno. La Figura 6 mostra, invece, la variazione dei percentili all'1% e 99% della  $FLC_{10}$ , nella parte (a), per diverse posizioni della seconda locomotiva: nella leggenda di figura, la designazione '800\_600' indica che la lunghezza del primo sotto-treno (senza locomotiva) è 800 m, mentre quella del secondo è 600 m. La parte (b) di questa figura riporta, invece, le massime forze di trazione a 10 m ( $FLT_{10}$ ). La massa complessivamente trasportata dal treno è 5000 t. La Figura 6 mostra chiaramente che uno spostamento della seconda locomotiva verso la coda del treno, a parità di lunghezza e massa complessivamente trasportate, porta ad una riduzione delle forze longitudinali di compressione ed ad un aumento di quelle di trazione: svuotando la condotta generale nel punto in cui si trova la seconda locomotiva, la prima parte del treno è sempre più posta in trazione. Si fa notare che è stato esaminato detto caso perché esso rappresenta un treno che è complessivamente doppio rispetto a quanto previsto dall'attuale normativa [4], che prevede treni di lunghezza 700 m e massa trasportata di 2500 t (sempre escludendo le locomotive). I risultati di Figura 6 consentono di affermare che, per treni a trazione distribuita con configurazione "bloccata", è sicuramente migliore porre la seconda locomotiva verso i 2/3 del treno; tra l'altro, come mostra il confronto con il caso di configurazione simmetrica (700\_700), si ottiene in questo modo anche una minore dipendenza dei risultati dalla velocità di marcia.

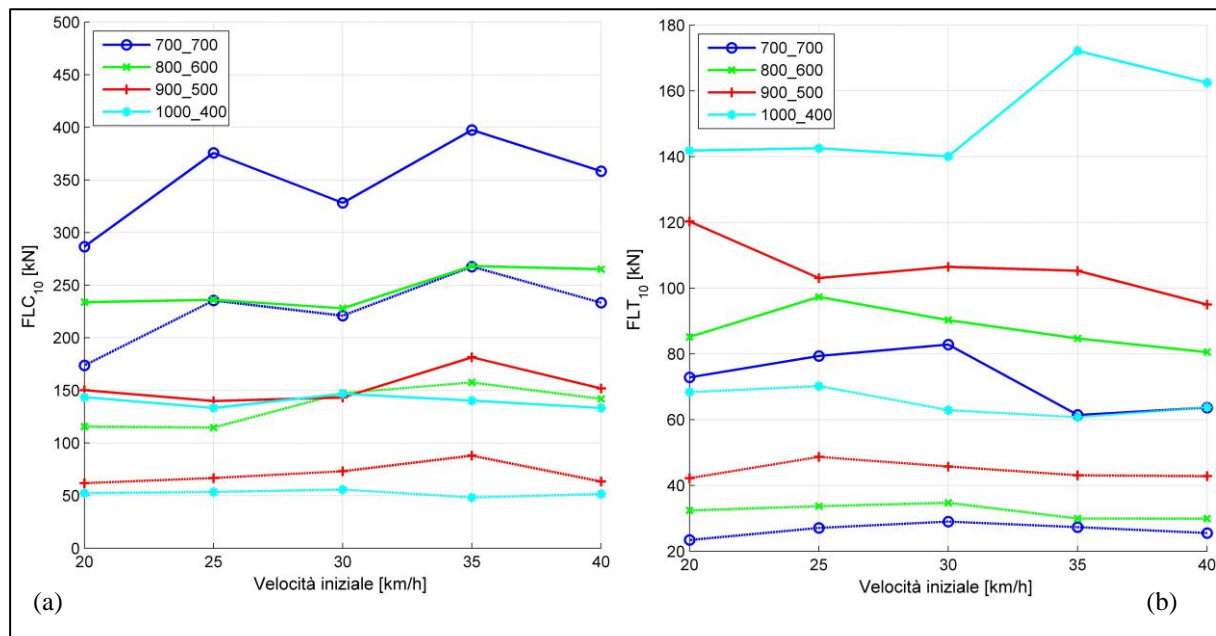


Figura 6: Dipendenza delle  $FLC_{10}$  dalla velocità iniziale di frenatura, al variare della posizione della seconda locomotiva (a). In (b) sono riportate le  $FLT_{10}$ .

Infine, in Figura 7, si valuta l'influenza dei cosiddetti parametri "tecnici" sulle forze longitudinali in compressione e trazione a 10 m; con questa denominazione s'intendono tutte quelle grandezze che non possono essere controllate direttamente dall'Operatore Ferroviario, come gli effettivi parametri di funzionamento di un distributore (l'effettivo tempo di salita della pressione al cilindro freno, il suo effettivo valore di pressione massima e così via), il fatto che il tracciato possa essere in una leggera pendenza o salita e così via. Per il tipo di parametri tecnici usati e per la loro variabilità si faccia riferimento a [7]. I risultati presentati in Figura 7 si riferiscono al treno avente la prima parte lunga 900 m e la seconda 500 m; in Figura 7 (a) è rappresentata la variabilità della deviazione standard riferita sia alle forze di compressione a 10 m ( $\sigma_{FLC}$ ) sia a quelle di trazione a 10 m ( $\sigma_{FLT}$ ), considerando come specifica composizione del treno quella che ha fornito le massime forze longitudinali in compressione a 10 m. Si osserva che gli andamenti delle due deviazioni standard sono del tutto simili e raggiungono un valore all'incirca costante (vale a dire entro la banda del  $\pm 10\%$  di variabilità) già dopo 100 simulazioni. Comportamento simile (si veda in proposito la Figura 7 (b)) hanno le deviazioni standard riferite a tutte le composizioni di treno aventi lunghezza 900 m nella prima parte e 500 m nella



seconda; anche in questo caso la variabilità delle forze in compressione e di quelle in trazione è del tutto simile. Ad ogni modo, l'informazione ancora più importante data dalla Figura 7 è che la variabilità introdotta dalla posizione delle masse lungo il treno è altrettanto importante della variabilità fornita dall'incertezza sui parametri tecnici. Val qui la pena ricordare che quest'ultima incertezza può essere a rigore misurata solo dall'Operatore Ferroviario mediante analisi sul suo materiale rotabile circolante; i valori qui usati sono stati desunti dal processo di validazione di *TrainDy* considerando materiale rotabile proveniente da diversi Operatori Ferroviari e di differente tipo: vagoni con freni a ceppi e dischi, con dispositivo di frenatura auto-continuo e vuoto-carico e così via.

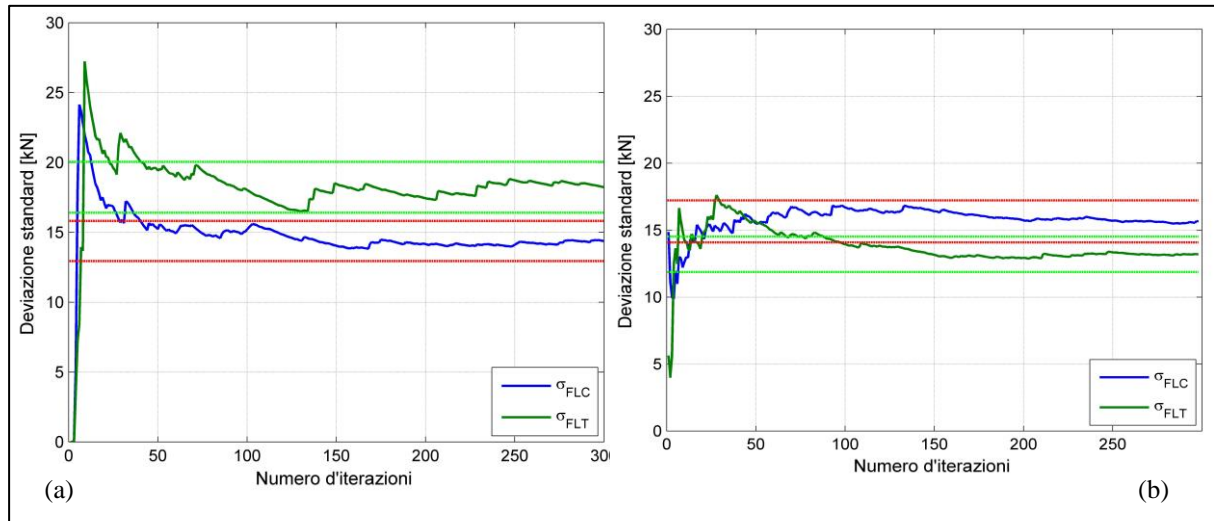


Figura 7: Deviazione standard delle forze longitudinali al variare del numero di simulazioni.

## 5. Conclusioni

L'utilizzo di composizioni ferroviarie a trazione distribuita è sicuramente un ottimo metodo per incrementare l'efficienza del trasporto ferroviario merci in sicurezza. All'aumentare della lunghezza e della massa complessivamente trasportata, aumentano anche le forze longitudinali di compressione che possono causare deragliamento del treno se si verificano tra vagoni molto differentemente carichi. Le simulazioni effettuate in questa sede, svolte con lo strumento certificato dall'UIC a tale scopo, mostrano chiaramente che all'aumentare della massa e della lunghezza del treno diviene sempre più importante un'opportuna scelta della disposizione dei veicoli al fine di ridurre le massime forze longitudinali. In altri termini, per aumentare con profitto ed in sicurezza l'efficienza di trasporto merci è necessario utilizzare un approccio più razionale alla realizzazione della composizione dei treni, che fa uso di affidabili strumenti software il cui utilizzo, come mostrato in questa sede, può essere automatizzato.

Il presente lavoro mostra chiaramente che è cruciale la disposizione della seconda locomotiva lungo il treno al fine di ridurre le forze longitudinali in compressione ed, in ultima analisi, il rischio di deragliamento: ovviamente la soluzione qui proposta meglio si adatta a treni con configurazioni bloccate essendo non sicuro il procedere di un treno da oltre 900 m con la sola locomotiva in testa. Un'ultima osservazione conclusiva merita quanto mostrato a proposito della variabilità dei risultati con i parametri tecnici: questa variabilità, la cui entità dipende fortemente dall'intervallo di variazione impostato per i diversi parametri, è del tutto paragonabile, per le simulazioni qui mostrate, a quella data dalla distribuzione delle masse lungo il treno; ciò significa che, nella valutazione del rischio di un'innovativa tipologia di composizione di treno, è necessario tenerne conto opportunamente.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Pugi, L. et al., “Attività di studio e simulazione per l'introduzione del regime di "locomotiva lunga", *Ingegneria Ferroviaria*, Roma, ISSN 0020 0956, vol. LXIV, n° 10, Ottobre 2009, p. 833 - 852.
- [2] L. Cantone, V. Vullo, “Performance di frenatura di un treno merci con trazione distribuita”, 41° Convegno Nazionale Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni (AIAS 2012), 5-8 Settembre 2012, Università degli Studi di Padova.
- [3] L. Cantone, “*TrainDy*: the new Union Internationale des Chemins de Fer software for freight train interoperability”, *Proc. IMechE, Part F: J. Rail and Rapid Transit*, 2011, 225 (F1), 57-70. DOI 10.1243/09544097JRRT347.
- [4] UIC 421 OR, “Rules of the consist and braking of international freight trains”, 9<sup>th</sup> edition, January 2012.
- [5] L. Cantone, D. Negretti, V. Vullo “Evaluation of the Admissible Longitudinal Compressive Forces by Means of Multibody Train Simulations”, Proceedings of the First International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 18-20 April, 2012.
- [6] L. Cantone, V. Vullo, “Performance di frenatura di un treno merci con trazione distribuita”, 41° Convegno Nazionale Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni (AIAS 2012), 5-8 Settembre 2012, Università degli Studi di Padova
- [7] L. Cantone, “Analisi Della Variabilità Delle Forze Longitudinali In Treni Merci Lunghi”, *AIAS XXXIX Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni*, 7-10 Settembre 2010, Maratea.