

PERFORMANCE DI FRENATURA DI UN TRENO MERCI CON TRAZIONE DISTRIBUITA

L. Cantone^a, V. Vullo^b

Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" - Dipartimento di Ingegneria Industriale, Via del Politecnico, 00133 Roma, e-mail: ^a Luciano.Cantone@uniroma2.it, ^b Vincenzo.Vullo@uniroma2.it

Sommario

Il presente lavoro focalizza l'attenzione sulle performance di frenatura e sulla dinamica longitudinale di un convoglio ferroviario formato dall'unione di due sotto-treni identici, a configurazione di un treno con trazione e frenatura distribuite, avente lunghezza di 1500 m e massa di circa 3500 t e dotato di comunicazione radio tra le due locomotive. Attualmente non esistono treni del genere in Europa, ma essi contribuiranno, con la loro prossima entrata in circolazione, ad aumentare l'efficienza del trasporto ferroviario merci, specialmente per lunghe distanze. Il lavoro stimolato dal grande interesse europeo, propone una modalità operativa attraverso la quale il treno possa circolare, anche in condizioni degradate, cioè senza la comunicazione radio tra le locomotive. Infine, si dimostra come, attraverso un'opportuna distribuzione, delle masse sia possibile ottimizzare fortemente la dinamica longitudinale del treno.

Abstract

This paper is focused on the braking performance and on the longitudinal dynamics of a train-set built by coupling two equal sub-trains in way of assembling a train with distributed traction and braking, having overall length and mass of 1500 m and 3500 t, respectively, and provided by a radio connection between the locomotives. Nowadays such trains do not exist in Europe, but they will contribute with their circulation to the increase of railway freight efficiency, especially on long distance routes. This paper, claimed by an high European interest on the subject, proposes an operative rule by means of which the train can run also in degraded mode, i.e. without the radio communication among the locomotives. Lastly, it is shown that by means of an appropriate mass distribution it is possible to strongly optimize the longitudinal dynamics of the train.

Parole chiave: trasporto ferroviario merci, condizioni degradate di marcia, ottimizzazione della distribuzione delle masse.

1. INTRODUZIONE

Da tempo il trasporto ferroviario merci è in crisi in Europa ove, a causa della sua scarsa efficienza, ha subito una riduzione del "market share" a vantaggio del trasporto su gomma. Le strategie per aumentare l'efficienza, e quindi la competitività, del trasporto ferroviario merci passano per un aumento della massa trasportata per asse e della velocità commerciale nonché per un incremento della lunghezza dei treni. Tra le varie soluzioni proposte in conformità con tali strategie, quella più immediatamente percorribile è data dall'aumento della lunghezza del treno. In Europa, il sistema frenante utilizzato sui carri merci segue lo standard UIC e si basa sullo svuotamento della condotta generale dalla locomotiva di testa. Poiché l'informazione di svuotamento si propaga lungo la condotta generale con la velocità del suono nell'aria, la frenatura standard UIC non è contemporanea, in quanto iniziano a frenare dapprima i carri posti in testa al treno e via via i successivi sino a quelli in coda; un ulteriore fattore di ritardo nel sincronismo dell'azione frenante è da individuare nel fatto che i cilindri freno si attivano, cioè iniziano a riempirsi, solo quando la caduta di pressione in condotta generale è

mediamente superiore a 0.15 bar, e ciò dipende dalla quantità di aria che si è in grado di smaltire dalla testa della condotta generale.

Per ovviare a tale inconveniente, si può ricorrere all'installazione di una serie di valvole sui diversi carri, che scaricano la condotta generale localmente, cioè al livello dei singoli carri, comandandole o pneumaticamente (in questo primo caso si avrà una frenatura non sincrona, ma con ritardi dell'azione frenante molto minori rispetto al caso standard) od elettricamente (in questo secondo caso si avrà una frenatura sincrona). Entrambi i metodi, molto validi, richiedono un aggiornamento del parco circolante dei carri merci attuali e ciò risulta troppo dispendioso per gli Operatori Ferroviari e pertanto non applicabile su larga scala.

Altre strategie utilizzate per aumentare la lunghezza dei treni, sono le seguenti: i) l'impiego del regime di "locomotiva lunga", consistente nel porre i primi cinque carri del treno in regime di frenatura merci ed i rimanenti in regime passeggeri (questo sistema è già adottato in Paesi come la Germania ed è in via di accettazione in Francia ed in Italia [1]); ii) il ricorso alla comunicazione radio tra le locomotive e quindi la cosiddetta *frenatura distribuita*, ove la condotta generale è svuotata da più punti, in corrispondenza delle varie locomotive, opportunamente distribuite lungo il treno. In [2] si mostra chiaramente come tale soluzione (nella declinazione con tre locomotive) abbia performance di frenatura molto simili alla frenatura con valvole elettropneumatiche.

Il presente lavoro, stimolato dal grande interesse Europeo, focalizza l'attenzione su un particolare treno a frenatura distribuita, ove sono presenti due locomotive: una in testa ed una al centro: il treno è in pratica formato da due treni uguali collegati meccanicamente e pneumaticamente. L'attenzione non è qui focalizzata, se non marginalmente (al riguardo si riferisce pure in [2]), sulle performance nominali di frenatura, bensì su quelle *off design* o di funzionamento degradato, vale a dire quelle correlate con la perdita della comunicazione radio tra le locomotive. Infatti, è in tali condizioni che l'Operatore Ferroviario intende avere un funzionamento "sicuro" del treno, vale a dire forze longitudinali di compressione e spazi d'arresto limitati.

È stata, quindi, sviluppata una versione dedicata del codice *TrainDy* [3] adatta a simulare con accuratezza accresciuta gli spazi d'arresto del treno in funzione della percentuale di peso frenato e della velocità iniziale. Con tale nuova versione di *TrainDy*, sono stati presi in considerazione quattro scenari pericolosi di assenza di comunicazione radio: i) frenatura di emergenza; ii) primo tempo di frenatura, seguito da una frenatura di emergenza; iii) trazione, seguita da una frenatura di emergenza; iv) primo tempo di frenatura, seguito da una trazione. Vengono mostrati i campi di funzionamento (in termini di velocità di marcia) accettabili dal punto di vista della sicurezza, sia rispetto allo svio, mediante il parametro semplificato delle massime forze di compressione a 10 m, sia rispetto agli spazi d'arresto. Quindi si analizza, sebbene in maniera non esaustiva per ragioni di spazio, il comportamento di dinamica longitudinale del treno al variare della distribuzione delle masse trasportate dai diversi carri, evidenziando quelle che sono le ottimali distribuzioni delle medesime.

2. CONDIZIONI NOMINALI

Il treno oggetto delle analisi presentate in questo lavoro è costituito da due sotto-treni identici accoppiati meccanicamente, mediante accoppiatore centrale, e pneumaticamente, mediante la continuità della condotta generale. Ogni sotto-treno è costituito da una locomotiva, un primo sottogruppo di 10 carri del tipo 1, un secondo sottogruppo di 8 carri del tipo 1 (il primo ed il secondo sottogruppo di carri sono collegati meccanicamente per mezzo di respingenti e tiranti con massima capacità di carico di 1350 t, di Categoria A secondo [4], mentre i vari carri sono collegati con accoppiatori centrali, aventi massima capacità di carico di 1400 t, corsa massima di 53 mm e smorzamento del 30%), 3 carri del tipo 2 e 2 carri del tipo 3. Questi ultimi carri sono collegati con respingenti e tiranti aventi le minime caratteristiche elastiche ammesse.

Allo scopo di avere un termine di riferimento, si riportano in Tabella 1 gli spazi d'arresto, le forze longitudinali massime di compressione a 10 m (LCF 10m), le forze massime di compressione a 2 m (LCF 2m), le forze massime di trazione (LTF) e le forze massime di trazione a 2 m (LTF 2m) del singolo sotto-treno e del treno accoppiato, per le velocità di marcia di 100 km/h e 30 km/h, per frenature di emergenza e di servizio. Si ricorda che le forze di compressione a 10 m sono importanti per valutare la sicurezza della composizione ferroviaria ai fini dello svio, mentre le forze longitudinali

a 2 m sono maggiormente importanti ai fini della manutenzione del materiale rotabile; infine, gli spazi d'arresto devono essere tali da consentire il rispetto delle distanze di segnalamento sulla linea ferroviaria percorsa dal treno. Si riportano anche, nella medesima tabella, le stesse quantità riferite al treno accoppiato dotato di dispositivo *End Of Train* (EOT), vale a dire di una valvola pneumatica posta in coda al treno, che si apre non appena "avverte" una riduzione di pressione, determinando un più repentino svuotamento della condotta generale e un'azione frenante più sincrona tra i diversi carri e, di conseguenza, una generale riduzione sia delle forze massime longitudinali sia degli spazi d'arresto del treno.

Tabella 1: Performance di dinamica longitudinale in condizioni nominali

Velocità [km/h]	Distanza d'arresto [m] (permessa da UIC 544-1) ¹	Manovra E, emerg. S, servizio	Distanza d'arresto [m]	LCF 10m [kN]	LCF 2m [kN]	LTF [kN]	LTF 2m [kN]
100	670	E	665.37	214.89	340.03	178.03	128.76
		S	749.47	197.39	256.63	154.74	92.94
30	71.5	E	69.926	325.64	442.68	109.78	44.71
		S	87.19	271.32	361.55	119.85	62.86
<i>Treno accoppiato</i>							
100	670	E	640.46	187.58	193.97	270.56	125.31
		S	665.54	196.53	197.39	218.95	113.75
30	71.5	E	63.37	438.49	499.20	175.16	78.65
		S	69.46	424.62	525.97	108.02	93.26
<i>Treno accoppiato ed EOT</i>							
100	670	E	633.77	156.06	159.02	236.88	127.78
		S	656.17	151.41	155.96	197.24	125.81
30	71.5	E	62.52	312.99	359.73	258.17	78.65
		S	68.60	287.45	381.69	295.28	93.27

I risultati mostrano che gli spazi d'arresto del treno accoppiato sono inferiori a quelli del treno classico, visto che lo svuotamento della condotta generale avviene anche dal centro del treno, determinando una più repentina azione frenante di tutti i veicoli centrali accanto alla locomotiva secondaria, cosa che non accade nel caso di treno classico dove gli ultimi veicoli frenano con notevole ritardo. Inoltre, la valvola *End Of Train* causa un'ulteriore diminuzione degli spazi d'arresto, poiché provoca un più repentino riempimento dei cilindri freno dei veicoli posti in coda al treno. Questa valvola, infine, ponendo in trazione la seconda metà del treno accoppiato, riduce, di solito, anche le forze longitudinali di compressione massime.

La Tabella 2 riporta le massime velocità cui può circolare il treno accoppiato su tracciati aventi uno stretto raggio di curvatura (tipici degli scambi o delle zone di manovra): in tali condizioni il limite è dato dalle forze longitudinali di compressione ammissibili, che, per i veicoli considerati, sono di 500 kN e sono determinate mediante *pushing tests* come quelli descritti in [5]-[8] e si veda in proposito anche [9]-[10] ai fini dell'interazione tra le dinamica longitudinale del treno e quella laterale del veicolo. La manovra presa in considerazione è quella tipica che può avvenire a bassa velocità, vale a dire una trazione seguita da una frenatura (di emergenza o di servizio). Si noti che, nei risultati presentati, la forza di trazione (applicata con un gradiente di 100 kN/s) è rimossa istantaneamente dalle locomotive, così come avviene nelle locomotive diesel, altrimenti essa può essere rimossa seconda un fissato gradiente, così come accade nelle locomotive elettriche.

È da notare che nella Tabella 2 le forze di trazione sono le medesime per tutti i casi, in quanto determinate dalla prima parte della manovra di trazione, che è comune (indipendentemente dalla velocità massima della manovra). La tabella evidenzia un comportamento tipico delle frenate in regime G, nelle quali le frenature di servizio sono molte volte causa di forze longitudinali di compressione maggiori rispetto a quelle che si hanno per frenature di emergenza: nella manovra di

¹ I limiti riportati sono validi per frenature di emergenza in regime G e per treni la cui lunghezza è di 500 m o 700m; la percentuale di peso frenato del treno analizzato è di circa il 100 %.

trazione e frenatura, le velocità massime consentite sono maggiori se si applica una frenatura di emergenza dopo la trazione anziché una frenatura di servizio. Questo comportamento viene meno se è presente un dispositivo EOT, che consente una maggiore velocità massima. In condizioni nominali, il treno accoppiato può quindi circolare su curve di stretto raggio purché la sua velocità sia inferiore ai valori riportati in Tabella 2, a seconda della presenza o meno di EOT e del tipo di manovra consentita dall'Operatore Ferroviario.

Tabella 2: Massime velocità per curve a stretto raggio e diverse manovre

Manovra	Velocità [km/h]	EOT	LCF 10m [kN]	LCF 2m [kN]	LTF [kN]	LTF 2m [kN]
Trazione e frenatura di emergenza	22	NO	488.88	831.63	521.30	495.63
	23	SI	501.47	762.27	521.30	495.63
Trazione e frenatura di servizio	21	NO	504.56	659.37	521.30	495.63
	23	SI	502.02	610.07	521.30	495.60

3. CONDIZIONI DEGRADATE

Nel paragrafo 2 si sono analizzate condizioni nominali di funzionamento, caratterizzate da una perfetta comunicazione radio tra le locomotive; questa condizione può non essere sempre garantita, a causa, ad esempio, di una rottura/malfunzionamento dei dispositivi radio, della presenza di zone d'ombra per la radio o altro, per cui è indispensabile studiare quale sia il comportamento di dinamica longitudinale del treno allorché la comunicazione radio tra le locomotive sia assente. In questa circostanza, è necessario definire il comportamento che deve avere la locomotiva secondaria per garantire condizioni di funzionamento sicure: tra le diverse possibilità, la strategia migliore è quella di imporre un'automatica frenatura di servizio. Con il termine "automatica" non si intende dire che è necessario attivare una frenatura di servizio non appena si perde la comunicazione radio tra le due locomotive (la qual cosa potrebbe causare non necessarie fermate del treno, con conseguente perdita di efficienza di trasporto), ma che è necessario prevedere una regola generale che deve essere eseguita dalla locomotiva secondaria in condizioni di assenza di comunicazione radio. La "regola" che viene qui proposta è quella di effettuare una frenatura di servizio non appena ci sia una perdita di comunicazione radio e contemporaneamente si rilevi una determinata riduzione della pressione in condotta generale, in corrispondenza della locomotiva secondaria, rispetto al valore previsto. In pratica, ad ogni istante è nota la pressione in condotta generale che si deve avere in corrispondenza della locomotiva secondaria; se invece si rilevasse una pressione inferiore, diciamo di 0.2 bar, rispetto a tale valore, vorrebbe dire che è in atto una frenatura la quale viene "aiutata" dall'applicazione di una frenatura massima di servizio (pressione di target di 3.5 bar) da parte della locomotiva secondaria.

In condizioni di funzionamento degradato, gli scenari operativi da considerare sono superiori rispetto al caso di perfetta comunicazione radio tra le medesime; in assenza di comunicazione radio, l'informazione di frenatura è data dallo svuotamento della condotta generale che avviene con una velocità diversa, a seconda che le camere acceleratrici abbiano o meno svolto il loro compito. Ad esempio, se la pressione iniziale in condotta generale è pari a 5 bar e si effettua una frenatura in testa e contemporaneamente c'è la mancanza della comunicazione radio, la pressione in corrispondenza della locomotiva secondaria scende al di sotto di 4.8 bar in circa 5 s; diversamente, se è già in atto una frenatura, ad esempio un "accostamento ceppi" (vale a dire una frenatura in cui la pressione di target della condotta generale è impostata a 4.5 bar), e, contemporaneamente alla perdita di collegamento radio, la locomotiva primaria effettua una frenatura di emergenza, la pressione in corrispondenza della seconda locomotiva scenderà sotto i 4.3 bar dopo ben oltre 10 s. E' chiaro che, in tali scenari operativi degradati, le velocità massime di marcia devono essere ridotte rispetto al caso precedente di funzionamento nominale, al fine di evitare pericolose forze longitudinali a 10 m.

In questo paragrafo si analizzano quattro scenari operativi, per ognuno dei quali sono indicate le condizioni di funzionamento sicure.

3.1. Scenario operativo 1

Questo primo scenario è costituito da una frenatura di emergenza applicata in corrispondenza della locomotiva primaria contemporaneamente alla perdita di comunicazione radio: la seconda locomotiva frenerà, applicando una frenatura massima di servizio, non appena rileverà una pressione in condotta generale inferiore di una certa quantità (0.1 o 0.2 bar) rispetto alla pressione di target (5 bar). La Tabella 3 riporta alcuni parametri di dinamica longitudinale riferiti a tale caso.

Tabella 3: Massima velocità in caso di frenatura di emergenza e mancanza di comunicazione radio

Velocità [km/h]	EOT	Differenza di pressione per l'attivazione [bar]	Distanza d'arresto [m]	LCF 10m [kN]	LCF 2m [kN]	LTF [kN]	LTF 2m [kN]
14	NO	0.1	20.11	420.41	1546.46	48.07	6.53
14	SI	0.1	20.09	420.41	1526.23	43.22	24.54
13	NO	0.2	18.91	338.72	1644.72	44.24	7.45
13	SI	0.2	18.93	338.72	1649.28	28.37	9.07

Le velocità di marcia ammissibili per evitare che, a causa di assenza di comunicazione radio, si creino troppo elevate forze di compressione, sono molto ridotte rispetto al caso nominale, ove per tutte le velocità la forza di compressione longitudinale a 10 m era inferiore a 500 kN, per frenature di emergenza. Ovviamente, i risultati precedenti sono influenzati, anche se marginalmente, dalla soglia alla quale si attiva automaticamente la frenatura di servizio nella locomotiva secondaria. A questo proposito è da rimarcare che, impostando una soglia troppo bassa, è possibile che il software di gestione della locomotiva secondaria interpreti una normale fluttuazione di pressione in condotta generale come una frenatura, attivando inutilmente l'azione frenante.

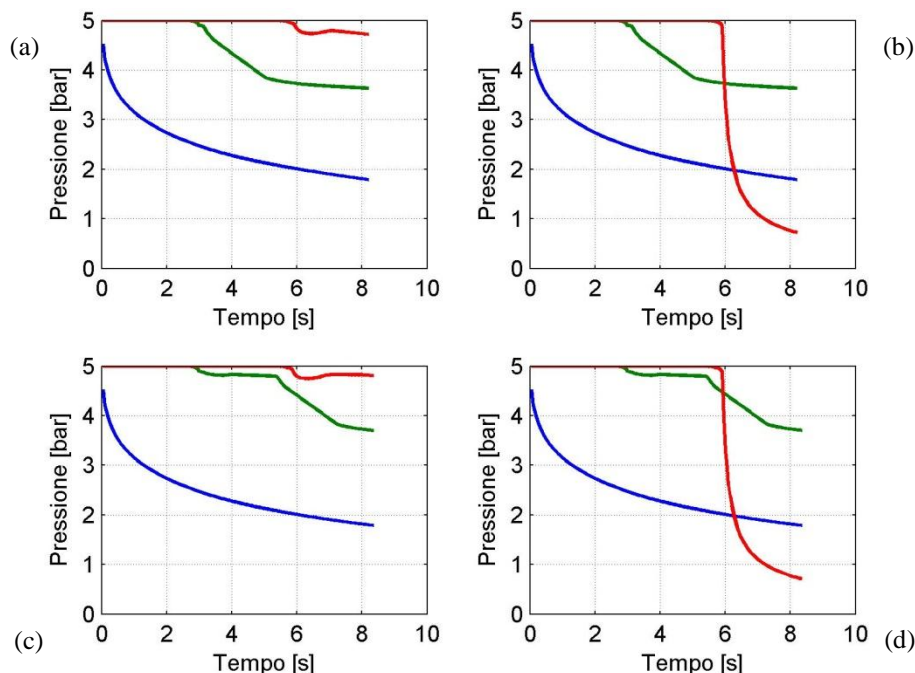


Figura 1: Andamento della pressione in condotta generale per i veicoli 1, 25 e 48. Le differenze di pressione considerate sono di 0.1 e 0.2 bar, rispettivamente, per (a) e (b) e per (c) e (d); (a) e (c) senza EOT; (b) e (d) con EOT.

La Figura 1 riporta l'andamento di pressione dell'aria in condotta generale per il primo e l'ultimo veicolo nonché per quello centrale: (a) e (c) sono senza EOT, mentre (b) e (d) sono con EOT attivo; i valori di rilevabilità sono pari a 0.1 bar in (a) e (b) ed a 0.2 bar in (c) e (d). E' evidente come, all'aumentare della soglia di pressione d'attivazione, il ritardo dell'applicazione frenante da parte della locomotiva secondaria aumenti; la presenza dell'EOT, inoltre, determinando un ulteriore svuotamento della condotta generale, è in grado di ridurre leggermente tale ritardo. Inoltre, si noti che, essendo il

diametro equivalente di scarico dell'EOT maggiore di quello della locomotiva primaria, la caduta di pressione è molto più repentina.

Tabella 4: Performance di dinamica longitudinale per frenatura di emergenza da 100 km/h

Distanza d'arresto [m] (permessa da UIC 544-1)	EOT	Distanza d'arresto [m]	LCF 10m [kN]	LCF 2m [kN]	LTF [kN]	LTF 2m [kN]
670	NO	741.27	616.85	676.65	148.75	78.51
	SI	718.48	533.23	578.85	247.03	204.95

La Tabella 4 riporta, infine, gli spazi d'arresto del treno per una velocità di 100 km/h, in caso di differenza di pressione per l'attivazione automatica della frenatura massima di servizio di 0.2 bar: sebbene i limiti forniti dalla UIC 544-1 siano superati, anche in condizioni degradate, il treno si arresta entro uno spazio che è inferiore a quello tipico della distanza di segnalamento. Si noti inoltre che, sebbene le massime forze longitudinali di compressione a 10 m siano superiori a 500 kN, il funzionamento del treno è da considerare sicuro, in quanto quel limite si applica a curve di stretto raggio (190 m) ove sicuramente la velocità di marcia del treno non è 100 km/h. I risultati di Tabella 4 mostrano che, se durante la marcia normale del treno si verifica una perdita di comunicazione radio, il treno può continuare a viaggiare a meno che non si rilevi una caduta di pressione in corrispondenza della locomotiva secondaria, chiaro indice di una frenatura comandata dalla locomotiva primaria.

3.2. Scenario operativo 2

Questo secondo scenario è costituito da una frenatura di "accostamento ceppi" applicata in corrispondenza della locomotiva primaria; successivamente, quando la pressione in condotta generale sulla locomotiva secondaria ha circa raggiunto il valore di target (4.5 bar) ed è quindi arrivata a 4.6 bar, la locomotiva primaria effettua una frenatura di emergenza ed allo stesso tempo si verifica una perdita di comunicazione radio; la seconda locomotiva effettuerà una frenatura massima di servizio solo quando la pressione in condotta generale scenderà di una certa quantità al di sotto della pressione di target (4.5 bar). Si noti che ha senso prendere in considerazione uno scenario operativo del genere solo nell'ambito di un funzionamento degradato del treno, vale a dire in assenza di comunicazione radio tra le locomotive. La Tabella 5 riporta la massima velocità cui può circolare il treno su curve di stretto raggio, oltre ad altri parametri di dinamica longitudinale, nel caso in cui la differenza di pressione rilevabile in corrispondenza della locomotiva secondaria è di 0.2 bar.

Tabella 5: Velocità massima per accostamento ceppi seguito da frenatura di emergenza.

Velocità [km/h]	EOT	Distanza d'arresto [m]	LCF 10m [kN]	LCF 2m [kN]	LTF [kN]	LTF 2m [kN]
21	NO	38.68	509.35	1517.76	107.43	79.89
21	SI	37.34	335.59	1194.32	107.43	79.89

La Tabella 6 riporta, invece, i parametri di dinamica longitudinale per frenature da 100 km/h in condizioni degradate, per una rilevabilità della pressione in condotta generale sempre di 0.2 bar; anche in questo caso gli spazi d'arresto non si discostano molto dai limiti imposti dalla UIC per il corrispondente peso frenato del treno.

Tabella 6: Performance di dinamica longitudinale per accostamento ceppi seguito da frenatura di emergenza da 100 km/h

Distanza d'arresto [m] (permessa da UIC 544-1)	EOT	Distanza d'arresto [m]	LCF 10m [kN]	LCF 2m [kN]	LTF [kN]	LTF 2m [kN]
670	NO	749.32	530.29	544.28	150.72	89.67
	SI	719.73	357.97	368.74	149.75	77.09

La Figura 2 mostra infine l'andamento della pressione in condotta generale (per gli stessi veicoli mostrati in precedenza), per frenatura da 100 km/h secondo la manovra qui presa in considerazione: a sinistra vi è il caso senza EOT, a destra quello con EOT attivo: è ben evidente il ritardo con cui si attiva la frenatura nella locomotiva secondaria (indicato mediante una freccia) e come la presenza del dispositivo EOT riduca un po' tale ritardo, causando minori spazi d'arresto e minori forze di compressione longitudinali.

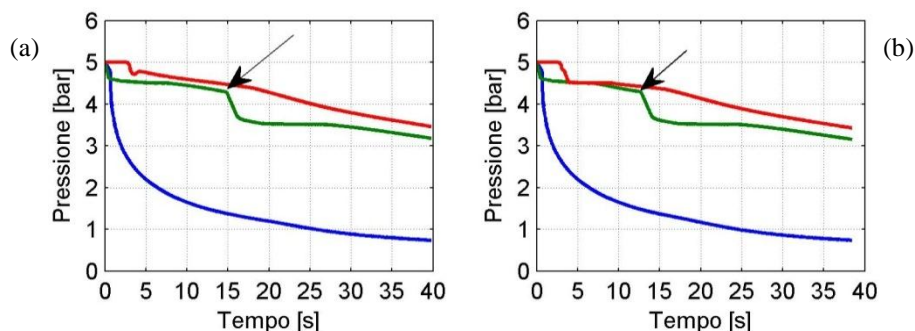


Figura 2: Andamento della pressione in condotta generale per i veicoli 1, 25 e 48. (a) assenza di EOT, (b) presenza EOT.

3.3. Scenario operativo 3

Questo terzo scenario è costituito dalla trazione di entrambe le locomotive fino ad una certa velocità, quindi da una richiesta di frenatura di emergenza dalla locomotiva principale con contemporanea perdita di comunicazione radio. A questo punto, sono possibili due scenari operativi da esplorare: a) la locomotiva secondaria, pur in assenza di comunicazione radio, continua la sua azione di trazione; b) l'azione di trazione è automaticamente interrotta quando si registra una perdita di comunicazione radio. In entrambi i casi, allorché la pressione in condotta generale in corrispondenza della seconda locomotiva raggiunge il prefissato differenziale di pressione (si analizza in questa sede solamente cosa succede per 0.2 bar), si aziona una frenatura massima di servizio sulla locomotiva secondaria con contemporaneo distacco della forza motrice di tale locomotiva.

La Tabella 7 mostra le massime velocità di marcia consentite su curve di stretto raggio per lo scenario operativo preso qui in considerazione: i risultati mostrano chiaramente che è necessario, su treni di questo genere, a trazione distribuita, richiedere una rimozione della trazione non appena viene rilevata una perdita di comunicazione radio; questo almeno a bassa velocità onde evitare possibili elevate forze di compressione, a causa di una contemporanea frenatura. Si noti che i valori delle forze longitudinali in trazione sono correttamente sempre i medesimi perché la prima parte della manovra di trazione è di fatto comune a tutti i casi trattati.

Tabella 7: Velocità massima per trazione seguita da frenatura di emergenza.

Perdita di comunicazione radio e trazione attiva	Velocità [km/h]	EOT	Distanza percorsa [m]	LCF 10m [kN]	LCF 2m [kN]	LTF [kN]	LTF 2m [kN]
SI	11	NO	41.54	459.68	1708.52	521.30	495.63
	11	SI	41.54	459.67	1709.41	521.30	495.63
NO	13	NO	54.15	187.64	1583.44	521.30	495.63
	13	SI	54.11	189.84	1698.20	521.30	495.63

La Figura 3 mostra gli andamenti delle forze di trazione e della velocità in (a) e (c) rispettivamente per il caso in cui la trazione non è rimossa e per quello in cui essa è disattivata a seguito di una perdita di comunicazione radio: si noti che in (a) la forza di trazione della locomotiva secondaria viene correttamente ad incrementarsi a causa della riduzione della velocità del treno causata dalla frenatura operata dalla locomotiva primaria. In (b) e (d) si riportano gli andamenti delle massime forze longitudinali di compressione a 2 m ed a 10 m per gli accoppiamenti indicati: in entrambi i casi

l'accoppiamento dove si raggiunge la massima forza di compressione a 10 m è il medesimo, mentre cambia quello dove si raggiunge la massima forza di compressione a 2 m.

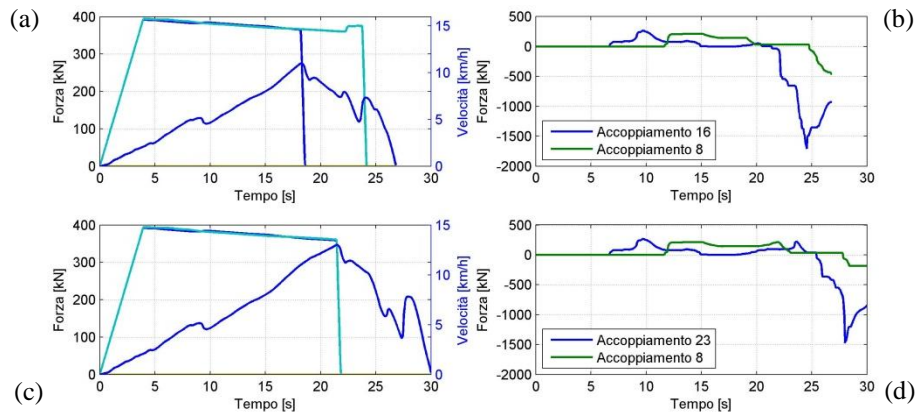


Figura 3: Forze di trazione, forze longitudinali e velocità: (a) e (c) forze di trazione e velocità, rispettivamente, per i casi in cui la trazione non sia oppure sia disattivata a causa della perdita di comunicazione radio; (b) e (d) corrispondenti andamenti delle massime forze longitudinali di compressione a 2 m ed a 10 m.

3.4. Scenario operativo 4

Anche questo quarto ed ultimo scenario considerato ha senso solo in un ambito di funzionamento degradato e consiste nell'applicazione di un primo "accostamento ceppi", seguito da una perdita di comunicazione radio e da una contemporanea trazione applicata alla prima locomotiva: la seconda locomotiva, in assenza di comunicazione radio, continuerà a frenare il treno, mentre la prima continuerà a trazionarlo; in questo caso la presenza del dispositivo EOT si concretizza in un'azione frenante, cioè in un "accostamento ceppi", che si attiva non appena si riscontra una perdita di pressione in condotta generale e che continua fino all'arresto del treno.

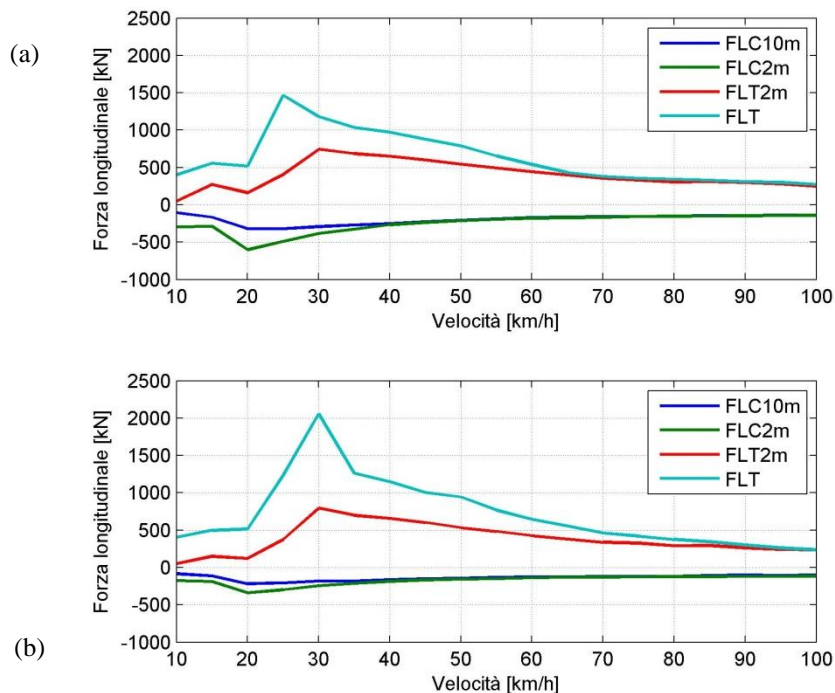


Figura 4: Andamento delle forze longitudinali per il quarto scenario: (a) senza EOT, (b) con EOT.

La Figura 4 riporta l'andamento del massimo valore della forza longitudinale di compressione a 10 m ed a 2 m e di quella di trazione a 2 m nonché di quella istantanea per diverse velocità iniziali di questo scenario operativo; (a) e (b) si riferiscono, rispettivamente, ai casi in cui si sia in assenza o in presenza di EOT. In quest'ultima circostanza la presenza del dispositivo EOT è negativa, perché causa maggiori forze longitudinali di trazione. In generale, però, i valori assunti dalle forze longitudinali non sono mai preoccupanti, anche perché si tratta di manovre che si presentano con una bassissima frequenza.

4. OTTIMIZZAZIONE DELLA DISTRIBUZIONE DELLE MASSE

Si analizza qui l'effetto di una opportuna distribuzione delle masse lungo il treno ai fini di una riduzione delle massime forze longitudinali di compressione; l'argomento è ben noto [11] e in questa sede si mostrano alcuni risultati ottenuti per mezzo di un codice automatico di ottimizzazione, in sviluppo presso l'Università di Tor Vergata, in grado di ottimizzare la distribuzione delle masse, tenendo conto anche di complesse funzioni obiettivo.

Il primo caso che si analizza è quello di un treno in frenatura di emergenza da 30 km/h, costituito da vagoni tutti dello stesso tipo (tipo 1) ed egualmente carichi: nota la massa totale del treno, la funzione di ottimizzazione calcola la migliore distribuzione delle masse (rispetto a quella uniforme) affinché le massime forze longitudinali di compressione siano minimizzate. La Figura 5 riporta l'andamento della distribuzione delle masse lungo il treno; come si vede, i primi veicoli sono mediamente più carichi degli ultimi. La distribuzione ottimizzata è stata calcolata mediante 1000 iterazioni e porta ad un valore della massima forza di compressione longitudinale a 10 m di 395 kN, contro i 545 kN che si ottengono con la distribuzione uniforme della massa.

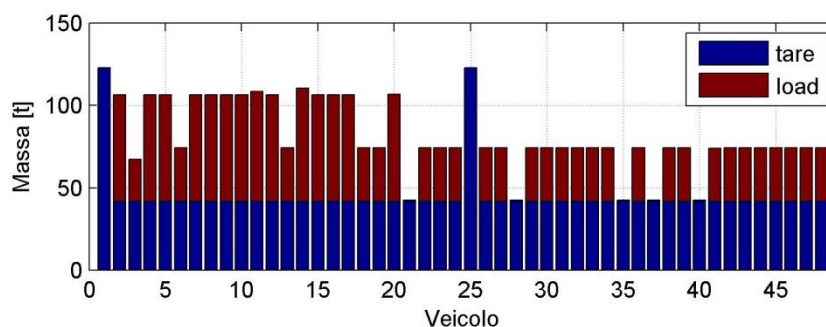


Figura 5: Distribuzione ottimizzata delle masse.

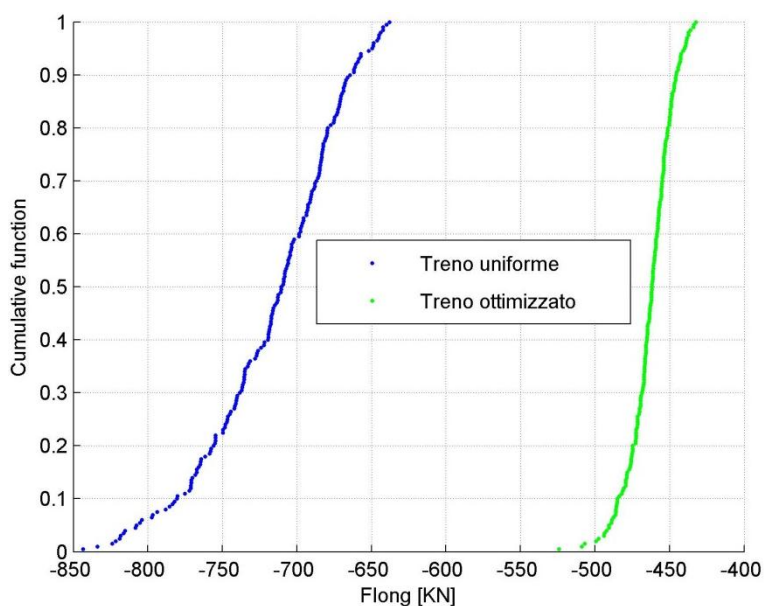


Figura 6: Funzioni cumulative per la distribuzione ottimizzata e quella uniforme.

E' da notare che, sebbene la maggior parte del carico sia distribuita in maniera pressoché uniforme sul primo treno, così come sul secondo (seppur con valori diversi), non è assolutamente possibile stabilire a priori quale debba essere il rapporto tra le masse trasportate dal primo e dal secondo senza una preliminare sistematica campagna di simulazioni numeriche.

La Figura 6 mostra poi l'andamento delle funzioni cumulative relativamente ad una serie di 200 simulazioni statistiche, condotte sul treno a massa uniforme e su quello a massa ottimizzata, ove è stata variata casualmente una serie di "parametri tecnici" sui quali l'Operatore Ferroviario non ha controllo all'atto della messa in circolazione del treno, quali, ad esempio, la massima pressione al cilindro freno. E' evidente che la distribuzione delle masse ottimizzate è sempre migliore di quella uniforme e la variabilità dei risultati, valutata in termini di deviazione standard, è minore nel caso di distribuzione ottimizzata: essa ammonta infatti a 15 kN contro i 45 kN del caso non ottimizzato.

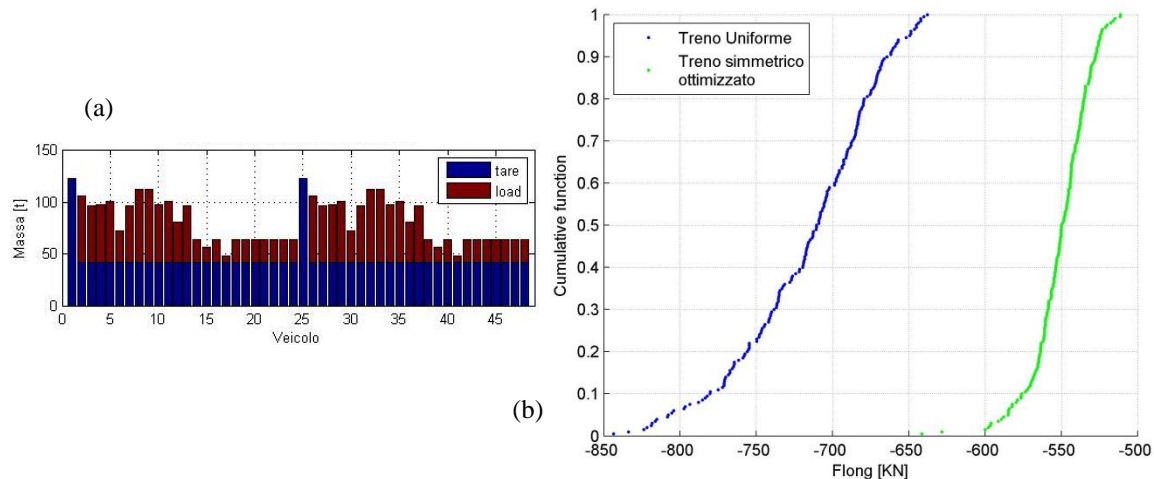


Figura 7: Ottimizzazione con sotto-treni identici. (a) distribuzione delle masse, (b) funzioni cumulative.

Infine, la Figura 7 riporta in (a) la migliore distribuzione delle masse, ipotizzando che i due sotto-treni siano identici ed in (b) le funzioni cumulative corrispondenti al caso standard (ovviamente identico al caso precedente) ed a quello ottimizzato; anche in questa circostanza, il treno ottimizzato risulta pressoché sempre migliore di quello standard, dato che la probabilità di avere forze longitudinali di compressioni maggiori (in valore assoluto) nel caso standard rispetto a quello ottimizzato è pari al 99.7%.

5. Conclusioni

Utilizzando il codice di calcolo della dinamica longitudinale di un treno denominato *TrainDy*, sviluppato presso l'Università di Roma "Tor Vergata" e certificato dalla UIC, si sono analizzate le performance di frenatura di un treno merci innovativo, di grande interesse Europeo, con frenatura e trazione distribuita, ove le locomotive sono in comunicazione continua mediante collegamento radio. L'analisi del treno nelle condizioni di funzionamento nominali, cioè con comunicazione radio sempre funzionante, non è per niente esaustiva per un treno del genere, in quanto i rischi maggiori si hanno, com'è ovvio, quando la radio non è funzionante. Per tali treni è quindi necessario stabilire la procedura da porre in essere nel caso in cui la radio sia non funzionante. Nel lavoro si mostra che, con l'applicazione della frenatura massima di servizio da parte della locomotiva secondaria, non appena sia rilevata una caduta di pressione, dell'ordine di 0.1-0.2 bar, indicatrice di una manovra di frenatura, è possibile garantire condizioni operative di sicurezza sia alle alte che alle basse velocità, per diversi scenari operativi. Vengono infine mostrati i primi risultati ottenuti in relazione ai miglioramenti che si possono realizzare, in termini di forze longitudinali di compressione a 10 m (ma può essere utilizzato un qualsiasi altro parametro), mediante un'ottimale distribuzione delle masse lungo il treno, rilevando che si riescono ad ottenere miglioramenti di oltre il 25 % rispetto ad una configurazione con massa distribuita uniformemente.

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, F. De Maria, A. Palazzolo, D. Negretti, “Supporting freight operators decision on investing in technology for rolling stock”, WCRR 2011, 9th World Congress on Railway Research, Lille France 22-26 Maggio, 2011.
- [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 526-1, “Wagons – Buffers with a stroke of 105 mm”, 3rd edition July 2008.
- [5] ORE Question B 12, Report No. 40, “Propelling tests with long two-axle wagons”, UTRECHT, April 1984.
- [6] ORE Question C 138, “Permissible maximum values for the Y- and Q- forces and derailment criteria”, UTRECHT, September 1986.
- [7] ORE DT 97 (C138) E, “Statistical evaluation of derailment tests in derby (September, 1977) with two-axled goods wagon”, UTRECHT, February 1979.
- [8] ERRI B 12/RP 58, “Relative to two-axle wagons in train formation and negotiating track sections with small-radius s-curves and short straight intermediate sections, studies of the permissible longitudinal compressive forces resulting from braking forces and pushing forces from low speeds”, UTRECHT, January 1994.
- [9] L. Cantone, D. Negretti, V. Vullo “Wheel rail contact and longitudinal lateral interaction between vehicles on train dynamics”, CC2011 6-9 September, Chania, Creta, 2011.
- [10] 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.
- [11] M. Ansari, E. Esmailzadeh and D. Younesian, “Longitudinal dynamics of freight trains”, *Int. J. Heavy Vehicle Systems*, Vol. 16, Nos. 1/2, 2009.