



Validazione dinamica di *TrainDy* con dati sperimentali DB e TRENITALIA

Dott. Ingg. Luciano CANTONE^(*), Daniele NEGRETTI^(*),
Alessandro PALAZZOLO^(**), Robert KARBSTEIN^(***)

Parole chiave: forze longitudinali, interoperabilità, pneumatica impianti frenanti per treni merci.

1. Introduzione

Nel mese di gennaio 2007 la UIC, dopo una vasta indagine, ha deciso di sottoporre a processo di validazione e di certificazione internazionale il codice di calcolo *TrainDy* per lo studio della dinamica longitudinale dei treni. Il codice è nato inizialmente grazie alla collaborazione fra l'Università di Roma "Tor Vergata" e la Faiveley Transport Italia. Successivamente il software è stato acquisito dalla UIC che ha incaricato un team internazionale di esperti in dinamica longitudinale appartenenti a DB AG, TRENITALIA, SNCF, Faiveley Transport Italia, Università di Roma "Tor Vergata", di validare e certificare il software avvalendosi di numerosi test sperimentali messi a tale scopo a disposizione da DB AG, TRENITALIA e SNCF.

La validazione riguarda il calcolo delle forze longitudinali (FL) scambiate tra i veicoli adiacenti di un treno, che si sviluppano durante le manovre di frenatura e trazione. L'interesse per la loro determinazione nasce dall'esigenza di avere a disposizione uno strumento semplice ed efficace per prevedere i valori massimi di forze di compressione/trazione che si possono generare in composizioni non contemplate dall'attuale normativa UIC 421 [1], vale a dire, ad esempio, treni merci di lunghezza superiore ai 700 m e di massa trasportata superiore alle 1200 t viaggianti a 100 km/h e frenanti in regime P, in modo da estenderne il campo di applicazione, favorire l'interoperabilità del trasporto merci e ridurre i costi del trasporto merci.

L'UIC patrocinerà un Consorzio di Aziende Ferroviarie, Industrie di settore, Enti di Ricerca, Università, etc, i cui membri avranno a disposizione i codici sorgenti di *TrainDy*, in modo da incentivare, con modalità simili a quelli del software Open Source, il suo sviluppo negli anni futuri e renderlo una piattaforma di calcolo della dinamica dei treni ancora più affidabile e completa. In quest'ottica, sarà possibile aggiungere modelli di contatto ruota/rotaia e considerare un modello 3D del veicolo. Si potranno inoltre calcolare le forze scambiate tra la ruota e la rotaia durante la normale marcia del treno, tenendo conto dell'elasticità del binario, od analizzare il comportamento di impianti frenanti non costruiti secondo standard UIC.

In [2] si è già riferito del processo di certificazione di *TrainDy* voluto dalla UIC e diviso in due parti: validazione pneumatica e, successivamente, dell'intero "pacchetto" pneumatico e dinamico.

Relativamente alla certificazione dinamica, il processo di validazione si è articolato in tre fasi: le prime due hanno avuto come obiettivo il confronto delle forze longitudinali calcolate sia con *TrainDy* sia con *e-Train* (il precedente software della UIC utilizzato in ambito internazionale per il calcolo della dinamica longitudinale), adoperando le forze frenanti calcolate con *e-Train*: mentre però nella prima fase, il confronto ha riguardato configurazioni di treni virtuali appositamente allestiti, nella seconda, sono stati utilizzati treni reali di cui si disponeva di dati sperimentali. Lo scopo di queste due fasi è stato quello di validare gli algoritmi di calcolo delle forze longitudinali a partire dalle curve caratteristiche di respingenti e tiranti: al termine di queste due fasi, il team di validazione ha stabilito che i risultati del modulo dinamico di *TrainDy* erano congruenti con quelli di *e-Train*. La terza e più importante fase ha riguardato, infine, il confronto con i dati sperimentali, utilizzando, come input per il modulo dinamico, le pressioni ai cilindri freno calcolate con il modulo pneumatico di *TrainDy*; essa ha permesso di valutare l'efficacia del codice nel suo complesso. A conclusione di dette tre

^(*) Università di Roma "Tor Vergata", Dipartimento di Ingegneria Meccanica.

^(**) TRENITALIA SpA, Direzione Ingegneria, Sicurezza e Qualità di Sistema - Tecnologie Materiale Rotabile - Sistemi Frenanti, Firenze.

^(***) Deutsche Bahn AG, DB Systemtechnik, Minden, Germany.

fasi, la UIC ha rilasciato la certificazione ufficiale del modulo dinamico e di quello pneumatico operanti contemporaneamente, cioè in grado di consentire la simulazione di complesse manovre controllate in tempo, posizione e velocità.

Le prove di confronto utilizzate nel processo di certificazione hanno riguardato 14 frenature di emergenza ed altrettante di servizio, condotte su treni con uno o due locomotive anche contemporaneamente attivi, in modo da certificare l'utilizzo di *TrainDy* anche con configurazioni che prevedono la cosiddetta *frenata distribuita*, vale a dire con più locomotive attive durante la frenatura e, quindi, con più punti di scarico della condotta generale. La UIC ha certificato la versione finale del codice *TrainDy* il 22-01-2009. In questa sede, si riportano alcuni confronti, in termini sia di FL sia di pressioni in condotta generale (CG) ed ai cilindri freno, tra le simulazioni numeriche ed i dati sperimentali messi a disposizione dalla DB AG e da TRENITALIA, con lo scopo di mettere in evidenza la corrispondenza tra i dati e, dov'è il caso, di discutere alcuni aspetti che meritano un'ulteriore indagine.

2. Modelli di calcolo

Il calcolo della pressione ai cilindri freno si basa, dapprima, sulla determinazione della pressione in condotta generale, eseguita mediante risoluzione delle equazioni di Navier Stokes applicate al caso di un flusso quasi monodimensionale, e, successivamente, sull'emulazione del comportamento del distributore, mediante un modello che utilizza congiuntamente le curve di trasferimento e le curve limite, stabilite per ogni regime di frenatura [3]-[5]. Questo modello, come si è avuto modo di discutere in [2], è accurato per quanto concerne la simulazione della pressione in condotta generale e maggiormente approssimato (ma non potrebbe essere diversamente a meno di non appesantire notevolmente il calcolo) per il calcolo della pressione dell'aria nei cilindri freno. Al fine di determinare le FL scambiate tra i veicoli adiacenti di un convoglio durante una frenatura od una trazione, è però necessario calcolare le forze che a causa di queste manovre sono applicate direttamente ai veicoli.

La modellazione della trazione è realizzata in *TrainDy* utilizzando le curve isopotenza caratteristiche delle locomotive ferroviarie in cui la forza di trazione è funzione della velocità ($F-v$) e del tempo trascorso dall'inizio dell'applicazione della trazione stessa ($F-t$) per consentire di modellare anche i transitori di inserzione/disinserzione della trazione. E' inoltre possibile simulare una eventuale percentuale di applicazione della trazione (% F). In pratica, nota la forza di trazione dal diagramma ($F-v$), eventualmente scalata con il coefficiente di applicazione della trazione, l'effettiva forza di trazione è pari al valore precedente od è ad essa inferiore, secondo un diagramma ($F-t$) per considerare il fatto che le forze del diagramma ($F-v$) non sono applicate istantaneamente, ma con un certo gra-

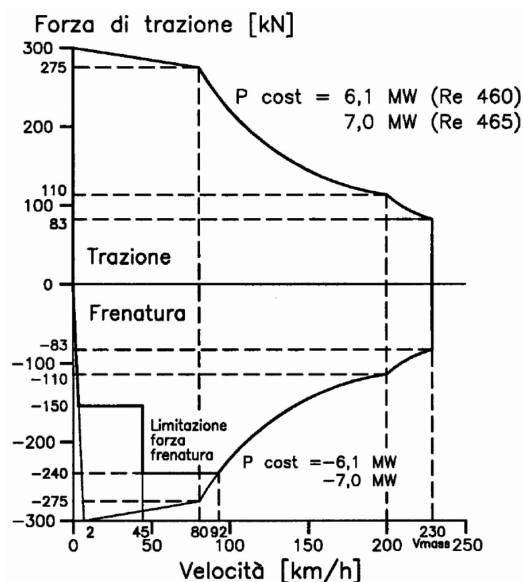


Fig. 1 - Esempio di curva caratteristica di una locomotiva.

diente temporale. Analoghi ragionamenti si seguono per determinare la forza di frenatura elettrodinamica, si veda, come esempio di caratteristica di una locomotiva, la fig. 1. Questa locomotiva, di tipo elettronico, ha una caratteristica meccanica uguale sia in trazione che in frenatura elettrica, funzionando con tensioni di 15 kV AC e, quindi, potendo frenare elettricamente a recupero, non ha limitazioni massime imposte dalla potenza termica massima smaltibile dai reostati. Nel caso specifico, la sigla Re460 si riferisce al tipo di locomotiva che sviluppa 6.1MW, mentre la RE465 a quella che ne sviluppa 7.0.

Per la frenatura dei carri, invece, sono stati modellati due differenti tipi di impianto frenante, il primo basato su freno a ceppi, il secondo su freni a disco. E' data inoltre all'utilizzatore la possibilità di simulare rotabili con impianti combinati, secondo una percentuale di applicazione liberamente impostabile. Il calcolo segue la UIC 544-1 [6] ed è possibile determinare la forza frenante sia a partire dalla conoscenza dei parametri fisici del freno (rapporti di timoneria, forze delle molle antagoniste, raggio di applicazione del disco-freno, etc.) sia da quella dei pesi frenati. In entrambi i casi, è possibile impostare una legge di coefficiente d'attrito tra la ruota ed il ceppo del freno o tra la ruota ed il disco, del tipo di quella rappresentata in fig. 2, ove sono riportati due esempi di queste leggi in fig. 2 (a) e fig. 2 (b). Nel caso dei freni a ceppi, il coefficiente d'attrito è funzione oltre che della velocità anche della pressione specifica tra la ruota ed il ceppo, mentre per i freni a disco esso è ritenuto funzione della sola velocità. Si noti che *TrainDy*, oltre a dare all'utente la possibi-

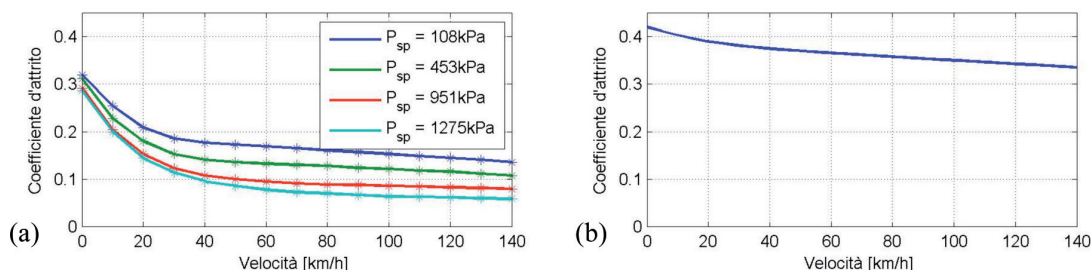


Fig. 2 - Esempi di leggi di variazione del valore del coefficiente d'attrito ruota ceppi (a) e ruota disco (b).

lità di inserire nuove leggi di attrito, in relazione all'avanzamento delle conoscenze, ne ha già implementate un certo numero di tipo analitico, i cui dettagli sono reperibili, ad esempio, nei lavori [7], [8].

Note le forze agenti sui diversi veicoli, a seguito della manovra impostata, si determinano le forze longitudinali scambiate tra di essi mediante la risoluzione delle equazioni del moto. Per caratterizzare il comportamento degli organi di trazione e repulsione (fig. 3), il modello considerato è stato quello ad attrito, secondo cui la forza scambiata, quando la velocità relativa dei veicoli è compresa tra la velocità di carico (v_{load}) e quella di scarico ($v_{un-load}$), è calcolata tramite la seguente:

$$F(x, v) = c(v) \cdot F_{un-load}(x) + [1 - c(v)] \cdot F_{load}(x) \quad (1)$$

dove il coefficiente $c(v)$ è una polinomiale di raccordo tra le curve di carico (F_{load}) e di scarico ($F_{un-load}$). In pratica, focalizzando l'attenzione sui respingenti, se i vagoni si avvicinano tra loro con una velocità che è maggiore, in modulo, a quella di carico, la curva caratteristica che determina il comportamento del respingente è quella di carico F_{load} ; mentre, se i respingenti sono compressi, ma i vagoni si allontanano con una velocità relativa che è maggiore, in modulo, della velocità di scarico, la curva caratteristica è quella di scarico $F_{un-load}$. In fig. 3 (a) si riportano le curve di carico e scarico di una coppia di respingenti (uno appartenente ad un veicolo e l'altro a quello adiacente) ed i punti di calcolo di una tipica simulazione, che evidentemente si trovano compresi tra le curve caratteristiche.

Per quanto concerne le manovre impostabili, esse possono essere definite in maniera indipendente per ogni locomotiva; in altri termini, per un treno con due locomotive in composizione, sarà per esempio possibile attivare una frenatura di servizio dalla loco-

motiva di testa e continuare con la manovra di accelerazione dalla locomotiva di coda fino all'attivazione del pressostato di esclusione dell'azione di trazione, etc.

Prima di presentare alcuni risultati conseguiti durante il processo di validazione, non potendoli riportare tutti, si ritiene utile fornire qualche dato sintetico sull'intera serie di prove condotte: le differenze rispetto ai dati sperimentali si sono attestate a valori inferiori al 10% per le grandezze pneumatiche (pressioni ai cilindri freno ed in condotta generale) ed al 25% per quelle meccaniche (FL e spazi di arresto), considerando sia configurazioni standard, con una sola locomotiva in testa, sia configurazioni più complesse, con due locomotive e treni lunghi fino a 1200 m, ed utilizzando, in tutti i casi, i parametri di riferimento dei rotabili. Inoltre, per le pressioni ai cilindri freno, le differenze percentualmente maggiori si sono riscontrate nella prima parte del riempimento, quando le

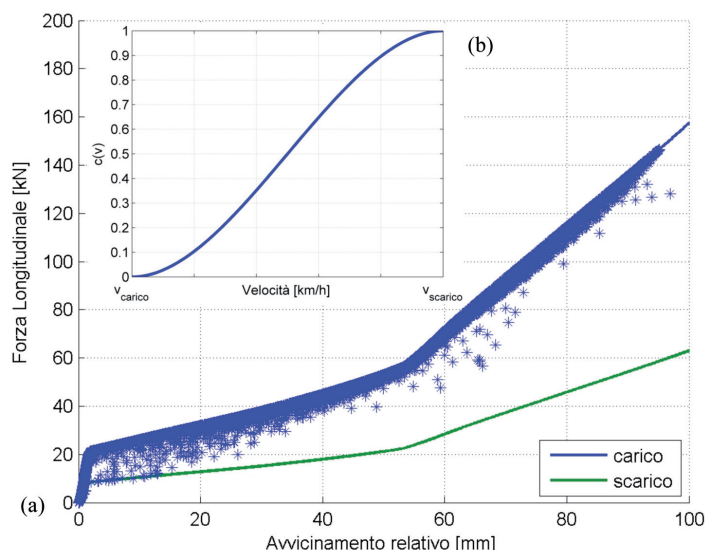


Fig. 3 - Esempio di curva caratteristica di respingenti, con punti sperimentali durante il calcolo (a) e curva di transizione (b).

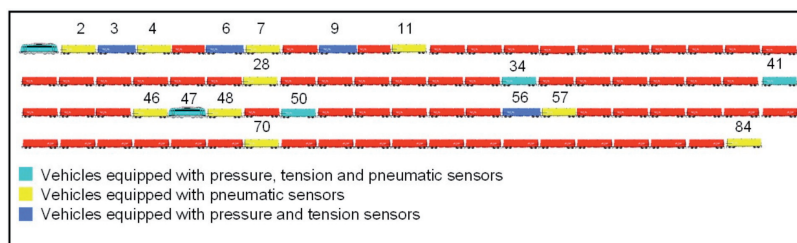


Fig. 4 - Schema treni TCS.

pressioni sono in valore assoluto basse; mentre, per le FL, l'andamento generale delle curve è stato sempre rispettato anche se, soprattutto per veicoli dotati di respingenti e tiranti con caratteristiche fortemente dipendenti dalla velocità relativa, si sono registrati sfasamenti temporali nella risposta, per cui il massimo scarto relativo è stato valutato sui valori massimi delle forze scambiate.

3. Prova TCS

La prima campagna sperimentale che si considera è denominata TCS (*Train Coupling Sharing*); essa è stata effettuata con treni aventi lunghezza di 500 m e di 1200 m dalla DB AG. Il treno da 1200 m è costituito da due treni di lunghezza, rispettivamente, di 500 m e di 700 m, che sono stati collegati per studiare gli effetti dinamici in una configurazione nella quale due treni provenienti da linee diverse percorrono un tratto di linea insieme e poi vengono di nuovo separati. Valutando le forze longitudinali massime nelle due configurazioni di treno, è possibile prescrivere i limiti operativi per una marcia sicura. La fig. 4 riporta uno schema del treno da 1200 m, con indicazione dei sensori montati sui diversi veicoli.

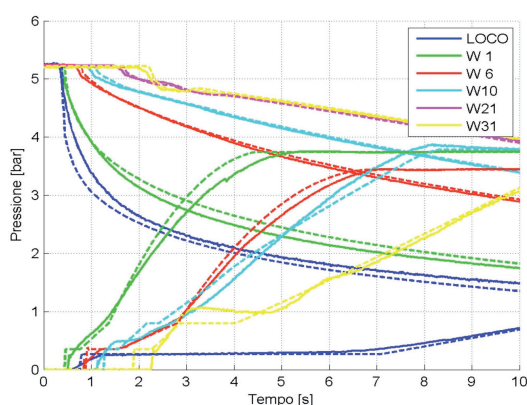


Fig. 5 - Pressioni in condotta generale ed ai cilindri freno per TCS 500. Sperimentale (—) e *TrainDy* (- -).

Le prove di frenatura, condotte sia in emergenza che in servizio, sono state tutte tese a determinare le massime forze longitudinali scambiate tra i veicoli. Per tale motivo sono state prese in considerazione velocità iniziali di frenatura comprese tra 20 e 30 km/h, mentre la distanza tra i piatti dei respingenti dei diversi carri è stata posta pari

a zero per i primi test e successivamente incrementata fino al valore di 40 mm. Inoltre, sono state effettuate frenature sia a partire da condizioni di coasting (forze longitudinali iniziali interne al treno circa pari a zero) oppure immediatamente dopo una trazione; è stato, infine, valutato l'effetto di un ritardo nell'attivazione della frenatura per il treno lungo 1200 m.

La fig. 5 riporta le pressioni in condotta generale ed ai cilindri freno per una frenatura di servizio effettuata dal treno TCS 500: la corrispondenza tra i risultati numerici e quelli sperimentali è molto soddisfacente: si noti come venga ben simulato l'effetto delle camere acceleratrici sullo svuotamento della condotta generale. Inoltre, impostando i parametri che determinano la salita di pressione ai cilindri freno durante il "primo tempo" di frenatura, è possibile replicare lo stesso andamento sperimentale della pressione al cilindro freno della locomotiva qui utilizzata: è evidente, infatti, che la pressione al cilindro freno della locomotiva sale molto lentamente e questo comportamento deve essere adeguatamente simulato al fine di ottenere accurate forze longitudinali scambiate tra i veicoli. Chiaramente, essendo la modellazione della salita di pressione ai cilindri freno effettuata mediante sole condizioni algebriche, non si riescono a cogliere alcuni effetti locali come la caduta di pressione del vagone 31 seguente all'iniziale fenomeno dell'"accostamento ceppi"; ovviamente, l'approssimazione è solo di tipo qualitativo in quanto i suoi effetti quantitativi sulle forze longitudinali sono trascurabili. Si noti che quest'effetto locale è dovuto ad una transitoria oscillazione della pressione in CG dovuta all'intervento delle camere acceleratrici, che determina un breve rilascio dell'azione frenante: tali effetti sono tipici degli ultimi vagoni di treni lunghi, anche se i valori quantitativi specifici dipendono dal particolare modello di distributore equipaggiante il vagone.

La fig. 6 riporta le forze longitudinali scambiate tra alcuni carri per una frenatura di servizio condotta a seguito di una trazione, nel caso in cui i carri sono montati con uno spazio tra i respingenti pari a 40 mm. L'accordo complessivo tra i risultati simulati e quelli sperimentali è ancora una volta soddisfacente, sebbene vi sia una serie di effetti locali non colti dal simulatore e ciò è dovuto al fatto che lo spazio tra i respingenti è semplicemente simulato come una zona in cui la forza scambiata tra i carri è

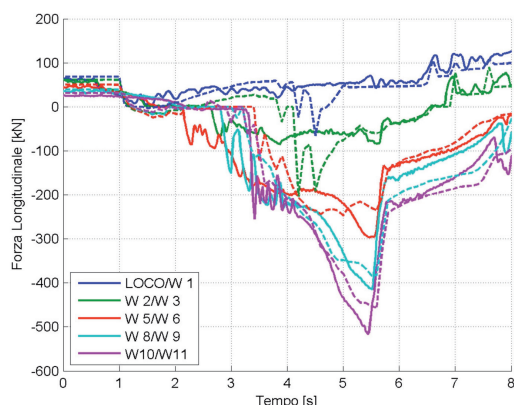


Fig. 6 - Forze longitudinali per treno TCS 500. Sperimentale (—) e *TrainDy* (- -).

nulla, nonostante vi sia un avvicinamento relativo. Ad ogni modo, le massime forze longitudinali sono colte con soddisfacente approssimazione essendo l'errore inferiore al 15%. Queste considerazioni confermano che le approssimazioni condotte, allo scopo di migliorare l'efficienza computazionale, mantengono i risultati delle simulazioni ingegneristicamente significativi.

La fig. 7 riporta la caduta di pressione nella condotta generale e nei cilindri freno per il caso TCS 1200 durante una frenatura di emergenza, a partire dalla velocità di 24 km/h, considerando un ritardo di circa 4 s tra l'inizio della frenatura della locomotiva di testa e quella centrale. Come prima, non si riportano le misure di tutti i veicoli strumentati semplicemente per ragioni di leggibilità e concisione. Fissando l'attenzione sul vagone 56, è evidente come l'iniziale caduta di pressione sia dovuta all'attivazione della frenatura nella LOCO 1, mentre successivamente, dopo la cuspidi, la riduzione di pressione è dovuta all'attivazione della frenatura nella LOCO 2: il software è bene in grado di cogliere il fenomeno, semplicemente imponendo un ritardo per l'inizio della frenatura della seconda locomotiva e null'altro. La stessa figura mostra anche la salita di pressione nei cilindri freno che viene complessivamente ben simulata da *TrainDy*: come al solito, ci sono alcune piccole differenze all'inizio del fenomeno di riempimento ed esse sono dovute al fatto che il modello di riempimento della pressione ai cilindri freno è algebrico, e ciò mostra in questo caso i suoi limiti specialmente per il vagone 83. Come già riferito in [3], queste differenze non alterano in maniera apprezzabile i valori delle forze longitudinali scambiate tra i veicoli. Inoltre, la versatilità del modello algebrico messo a punto è in grado di riprodurre il particolare comportamento delle due locomotive, che iniziano la loro salita di pressione molto tardi e ciò rende il software adatto a riprodurre comportamenti del tutto particolari osservati sperimentalmente.

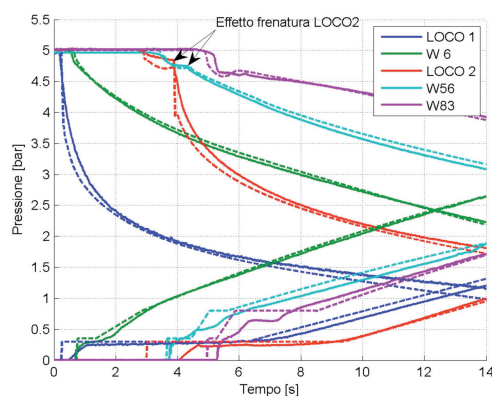


Fig. 7 - Svuotamento della condotta generale e riempimento dei cilindri freno per TCS 1200. Sperimentale (—) e *TrainDy* (- -).

La fig. 8 riporta le forze longitudinali scambiate da alcuni veicoli del treno TCS 1200. In questo caso, le differenze tra i valori numerici e quelli sperimentali sono maggiormente evidenti; ci sono diverse motivazioni che portano a tali differenze:

- le forze longitudinali sono il risultato di un processo che in cascata prevede la modellazione del sistema frenante pneumatico, del coefficiente d'attrito tra la ruota ed il ceppo-freno e della caratteristica equivalente del generico accoppiamento respingente/tirante: le approssimazioni nelle precedenti modellazioni si riflettono chiaramente nelle forze longitudinali calcolate;
- l'effettivo comportamento dei dispositivi pneumatici e meccanici del treno è compreso all'interno di tolleranze fissate da normative di settore; i risultati che si riportano sono stati ottenuti mediante parametri nomi-

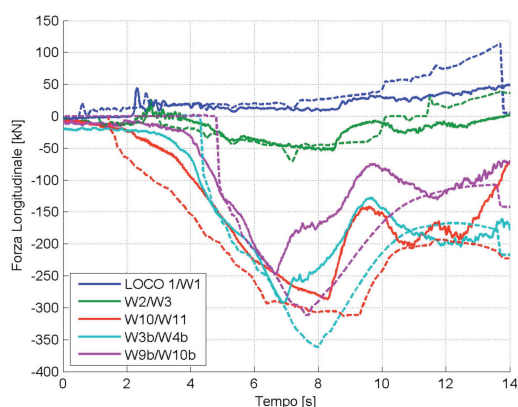


Fig. 8 - Forze longitudinali per treno TCS 1200. Sperimentale (—) e *TrainDy* (- -).

nali per tutti i diversi dispositivi ed è pertanto atteso che si possano verificare le rilevate differenze, specialmente per treni lunghi come nel presente caso.

In ogni caso, le differenze massime tra i risultati numerici e quelli sperimentali si attestano al di sotto del 20%; è questo un valore ritenuto soddisfacente, in base alle argomentazioni precedenti, anche perché la “forma” delle curve è in generale ben colta.

La fig. 9 mostra la velocità del treno, in funzione dello spazio percorso, a partire dall’inizio della frenatura di emergenza per i test TCS 500 e TCS 1200, in modo da poter confrontare i risultati della simulazione con quelli sperimentali. Anche in questa circostanza, sebbene siano evidenti alcune differenze tra la curva simulata e quella sperimentale, si ha un buon riscontro circa la distanza di arresto, il cui errore rispetto alla misurazione in linea risulta inferiore al 10% per entrambe le prove; questo dato è ritenuto più che accettabile. È da notare come lo spazio d’arresto simulato, per il TCS 1200, sia inferiore a quello reale e questo trova riscontro nel fatto che le massime forze di compressione dei respingenti siano maggiori per *TrainDy* rispetto al caso reale, come conferma il grafico della fig. 8; discorso duale si può ripetere per il TCS 500, come conferma il grafico di fig. 9.

4. Campagna prove su carri Saadkms

La campagna di prova utilizzata per la validazione della parte dinamica di *TrainDy* è stata svolta su un treno composto da carri Saadkms. Tali prove sono state realizzate per valutare la correlazione corsa/forza dei respingenti diagonali installati negli accoppiamenti ribassati dei carri Saadkms del treno di prova e per la valutazione degli sforzi longitudinali che si vengono a creare in una tale composizione. In particolare, sono state effettuate prove di frenatura nelle seguenti configurazioni:

1. carri in regime G / locomotive in regime G o G+E ;
2. carri in regime P / locomotive in regime G o G+E ;
3. carri in regime P / locomotive in regime P o P+E ;
4. carri in ep / locomotive in regime P o P+E ;

(la lettera “E” indica l’attivazione del freno elettrico nelle locomotive, mentre la sigla ep è usata per la frenatura elettropneumatica).

Il convoglio utilizzato per le prove di frenatura risultava composto dai seguenti rotabili:

- 2 locomotive in testa;
- 1 carrozza di strumentata;
- 1 carrozza di misure;
- 15 carri ultrabassi Saadkms;
- 1 carrozza di misure;
- 15 carri ultrabassi Saadkms.

I rotabili, disposti a partire dalla testa del treno nell’ordine elencato, sono stati accoppiati prima delle prove con i respingenti posti in contatto. Il comando di frenatura (inizio della frenatura) è stato impartito esclusivamente dalla testa del treno. Le prove effettuate hanno consentito di acquisire differenti parametri sia pneumatici che meccanici.

Nel seguito si riportano alcune prove comparative, limitate alla frenatura rapida in regime P e G per tutti i veicoli, non essendo possibile, allo stato attuale, simulare compiutamente in *TrainDy* la frenatura elettropneumatica.

La fig. 10 riporta le pressioni in condotta generale ed ai cilindri freno in corrispondenza dei vagoni 5 e 35 del treno, per entrambe le manovre di frenatura effettuate (in regime P e G). Chiaramente, per dette frenature, le pressioni in condotta generale sono le medesime, mentre cambiano quelle ai cilindri freno: in particolare sono tra loro molto differenti le pressioni ai cilindri freno in corrispondenza del vagone 5, in quanto più vicino al rubinetto freno ed avente, quindi, la salita di pressione maggiormente governata dalla curva limite di riempimento per il dato regime di frenatura. Si fa a tal proposito notare esplicitamente che la salita di pressione simulata nel cilindro freno dell’ultimo vagone è identica nelle due prove, visto che essa è regolata dalla sola pressione in condotta generale: questa situazione non si verifica sperimentalmente, specialmente nella prima parte della curva di salita di pressione, quella che nel software è determinata matematicamente (è la fase del “primo tempo” di frenatura). Questa è un’altra evidenza dell’approssimazione del-

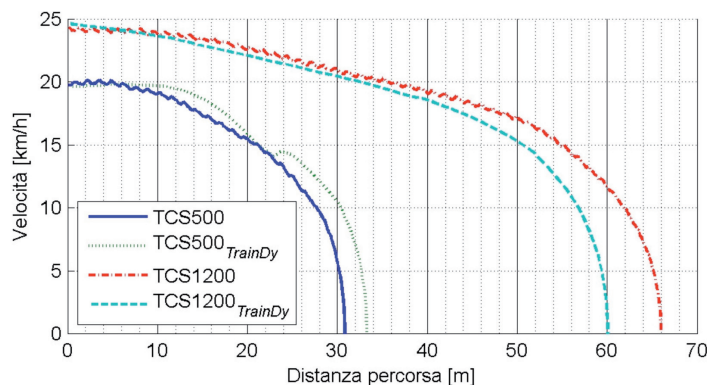


Fig. 9 - Andamento di velocità e spazio percorso per TCS 500 e TCS 1200.

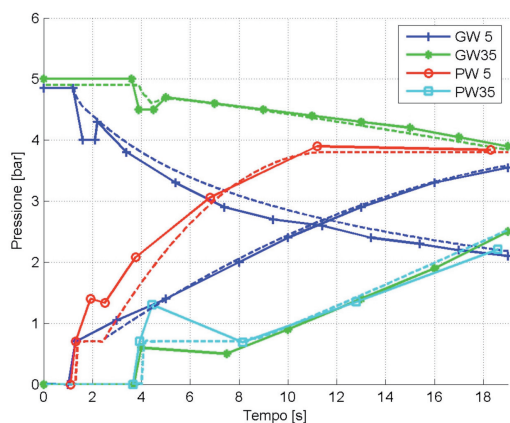


Fig. 10 - Pressioni in condotta generale ed ai cilindri freno per le due manovre prese in considerazione. Sperimentale (—) e *TrainDy* (- -).

la modellazione del riempimento dei cilindri freno, anche se, come si è avuto modo di affermare in precedenza, quest'approssimazione ha scarsa rilevanza sul calcolo delle forze longitudinali del treno.

La fig. 11 riporta gli andamenti delle forze longitudinali relativamente all'accoppiamento tra i veicoli 20 e 21, per le due diverse frenature di emergenza prese precedentemente in considerazione. Per entrambe le frenature, non si riesce ad ottenere una puntuale corrispondenza dei valori delle forze longitudinali simulate e sperimentali, sebbene l'andamento complessivo sia colto con soddisfacente approssimazione, soprattutto per ciò che concerne i valori massimi registrati. Il motivo principale di tale discordanza, che risultava ancora maggiore utilizzando il precedente strumento di calcolo della UIC [9], è da ricer-

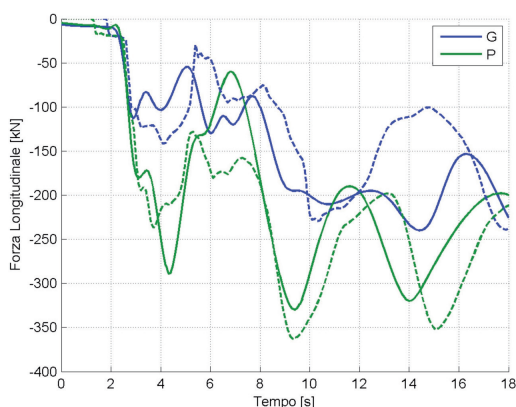


Fig. 11 - Forze longitudinali per le due manovre di frenatura della campagna sperimentale FS. Sperimentale (—) e *TrainDy* (- -).

carsi nel fatto che i respingenti montati sui carri del convoglio, utilizzando la gomma come materiale smorzante, presentano spiccate caratteristiche di non linearità, per cui la loro caratteristica elastica, in condizioni reali di funzionamento, risulta alquanto differente da quella desumibile mediante le comuni prove di caratterizzazione da laboratorio.

A prova di quanto detto, la fig. 12 si riferisce ad una prova sperimentale fornita da SNCF in cui sono state misurate, oltre alle forze scambiate tra i veicoli, anche le velocità e le posizioni relative: in questo modo è possibile desumere una curva caratteristica dei respingenti in base ai dati sperimentali. Utilizzando le curve caratteristiche così calcolate e quelle determinate mediante le comuni prove da laboratorio, si possono determinare le corrispondenti forze longitudinali con *TrainDy*, e confrontarle con quelle sperimentali. L'analisi del grafico mostra chiaramente come, utilizzando la "corretta" curva caratteristica, si riescono ad ottenere risultati numerici molto più prossimi al dato sperimentale. Questa circostanza suggerisce anche la possibilità di utilizzare *TrainDy* per creare specifiche particolari per nuovi respingenti e/o tiranti tali da minimizzare le forze longitudinali.

5. Conclusioni

Nel lavoro sono stati presentati alcuni dei risultati più salienti del processo di validazione cui è stato sottoposto *TrainDy*. Tale processo ha riguardato sia il modulo pneumatico sia quello dinamico ed è stato articolato in due fasi distinte e consecutive, entrambe concluse con il parere positivo del team internazionale di validazione costituito da esperti provenienti dalle principali Aziende Ferroviarie europee. La certificazione di *TrainDy* da parte della

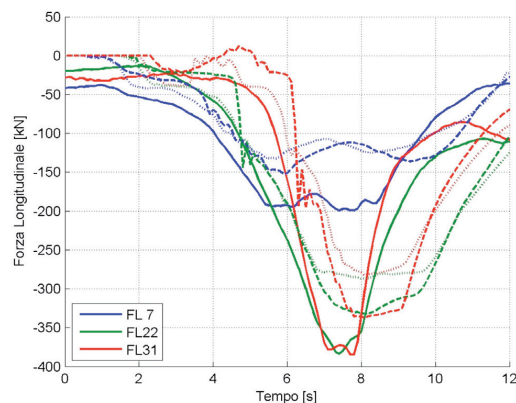


Fig. 12 - Forze longitudinali per una prova con dati SNCF calcolate da *TrainDy*, considerando caratteristiche elastiche fornite dal costruttore (...) e ricavate sperimentalmente (- -). In tratto continuo si riportano i corrispondenti valori misurati sperimentalmente.

UIC il 22-01-2009 significa che esso è ritenuto uno strumento affidabile di calcolo, che potrà essere usato come supporto per la messa a punto di nuovi limiti per le configurazioni interoperabili di treni, previste dalla nuova versione della UIC 421. Inoltre, la UIC renderà disponibile i codici sorgenti di *TrainDy* ad Aziende Ferroviarie, ad industrie, ad enti di ricerca, etc. che decideranno di aderire al citato Consorzio da essa patrocinato. In questo modo, il software *TrainDy* sarà ulteriormente sviluppato con il contributo del Consorzio o di specifici operatori che potranno ampliarne le potenzialità di calcolo nonché i campi di applicazione.

Ringraziamenti

Gli Autori desiderano ringraziare la SNCF per aver concesso di pubblicare i risultati riportati in fig. 12. Si ringrazia, inoltre, la DB AG e TRENITALIA per aver concesso di pubblicare i dati alla base del presente lavoro.

BIBLIOGRAFIA

- [1] UIC 421, "Regulations for the consist and braking of international freight trains", 7th edition, August 2006, Paris.
- [2] L. CANTONE, A. PALAZZOLO, "Validazione pneumatica di *TrainDy* con dati sperimentali Trenitalia", *Ingegneria Ferroviaria*, n.5, 409-418, 2008.
- [3] L. CANTONE, E. CRESCENTINI, P. SALVINI, R. VERZICCO, V. VULLO, "Sviluppo e validazione di un modello fluidodinamico per la simulazione della condotta generale di un convoglio ferroviario", *Ingegneria Ferroviaria*, n. 1, 27-38, 2007.
- [4] L. CANTONE, E. CRESCENTINI, P. SALVINI, R. VERZICCO, V. VULLO, "Modello numerico per lo studio della manovra di sfrenatura", *Ingegneria Ferroviaria*, n. 7/8, 575-588, 2007.
- [5] UIC Leaflet 540, "Freins a air comprimé pour trains de marchandises et trains de voyageurs".
- [6] UIC 544-1, "Frein - Performance de freinage".
- [7] T. WITT, "Integrierte Zugdynamiksimulation für den modernen Güterzug", Dissertation Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb, Universität Hannover, Hannover 2005.
- [8] T. WITT, L. MÜLLER, "Methods for the Validation of Algorithms for the Simulation of Longitudinal Dynamics", Proceedings of the 16th IAVSD Symposium 1999, Faculty of Engineering, University of Pretoria, South Africa.
- [9] D. FIORAVANTI, S. ANDRONICO, C. FERRARA, "Modelli per la valutazione della capacità frenante e per lo studio della dinamica longitudinale con applicazione a composizioni particolari di treni con carri ultrabassi", Convegno CIFI: Evoluzione del materiale rotabile. Tecniche di progettazione ed attività di testing, 19 ottobre 2005, Pistoia.

INFORMATIVA AI SOCI

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

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

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

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