

OTTIMIZZAZIONE DELLA DISTRIBUZIONE DELLE MASSE PER TRENI MERCI

L. Cantone^a, G. Arcidiacono^b, P. Placidoli^c

^a Università degli Studi di Roma - Dipartimento di Ingegneria dell'Impresa "Mario Lucertini",
Viale del Politecnico, 00123 Roma, e-mail: Luciano.Cantone@uniroma2.it,

^b Università degli Studi G. Marconi, Dipartimento per le Tecnologie e i Processi di Innovazione, Via
Plinio, 44 -00193 Roma, e-mail: g.arcidiacono@unimarconi.it

^c Università degli Studi G. Marconi, Dipartimento per le Tecnologie e i Processi di Innovazione, Via
Plinio, 44 -00193 Roma, e-mail: pier.placi@gmail.com

Sommario

Il lavoro si focalizza sull'applicazione della metodologia Design of Experiments (DoE) all'ottimizzazione della distribuzione delle masse in treni merci a frenatura tradizionale e distribuita. Attualmente, uno dei pochi "gradi di libertà" a disposizione degli Operatori Ferroviari nella definizione delle composizioni dei treni si trova proprio nella disposizione del carico lungo il treno. Benchè esistano regole per l'ottimizzazione del carico per treni a frenatura tradizionale non ne esistono per quelli a frenatura distribuita. Questo lavoro introduttivo mostra proprio come poter ottimizzare, in maniera razionale, quest'aspetto.

Abstract

The paper is focused on the application of Design of Experiments (DoE) methodology for the optimization of freight trains mass pattern, by considering both traditional and distributed braking. At the present stage, one of the few "degrees of freedom" available to the Railway Operators in the setting up of train composition is right in the arrangement of the load along the train. Even if some rules exist on the optimization of mass pattern for traditional trains, they do not exist for trains with distributed braking. This first work just shows how to optimize, in a rationale way, this topic.

Parole chiave: trasporto ferroviario merci, DoE, frenatura distribuita, ottimizzazione della distribuzione delle masse.

1. INTRODUZIONE

Le attuali necessità d'incremento di efficienza del trasporto ferroviario merci in Europa possono essere soddisfatte mediante molteplici strategie: aumento del carico per asse, innalzamento della velocità commerciale, introduzione di diversi regimi di frenatura, incremento della lunghezza e della massa complessivamente trasportata dai treni. Tra le diverse soluzioni quella che sembra avere maggiori possibilità di attuazione, oltre al regime di locomotiva lunga [1] accettato di recente sia in Italia che in Francia, è l'incremento della lunghezza complessiva del treno [2]. Questo risultato si può ottenere in due modi: mantenendo una sola locomotiva in testa, aumentando il numero di locomotive. La prima strategia può portare a treni di massimo 850 m di lunghezza, mentre con la seconda si possono anche superare i 1500 m. In entrambi i casi, si generano forze scambiate, tra vagoni adiacenti durante una frenatura o un'accelerazione, molto elevate. Il motivo di ciò, risiede, almeno per la frenatura, nelle intrinseche caratteristiche del tradizionale freno UIC (che equipaggia la maggior parte dei veicoli merci circolanti in Europa). Questo tipo di freno, non consentendo la sincronicità dell'azione frenante,

causa elevate forze di compressione ai respingenti dei vagoni man mano che aumenta la lunghezza del treno che, se occorrono tra veicoli diversamente carichi ed in curva, possono anche portare al deragliamento del convoglio. Il valore effettivo di queste forze, a parità di condizioni operative (vale a dire di manovra comandata dal macchinista) dipende fortemente dalla distribuzione delle masse lungo il treno (oltre che, in verità, dai valori effettivi dei parametri di funzionamento dell'impianto frenante). L'obiettivo del presente lavoro è di studiare alcuni approcci per ottimizzare la distribuzione finale delle masse trasportate tenendo conto del fatto che i vagoni merci tipicamente utilizzati in Europa sono adibiti al traffico container (vuoti, semi pieni e pieni). In questo lavoro si mostreranno i primi risultati di un approccio Design of Experiments (DoE) all'individuazione della disposizione ottimale delle masse lungo il convoglio ferroviario ai fini della minimizzazione delle forze longitudinali.

2. CENNI AL FRENO UIC [3]-[4]

Lo schema dei componenti di questo tipo di freno (detto anche *automatico*) relativamente alla locomotiva è riportato in Figura 1 ed è caratterizzato dall'aver una pressione in condotta generale a 5 bar, durante la marcia ed una pressione sempre superiore a quella atmosferica quando inizia la fase di rilascio del freno. Il compressore (che si trova solo sulle locomotive) ha tipicamente una potenza di 17 kW e produce aria compressa che riempie la condotta generale a 5 bar, mentre il serbatoio principale ha una pressione dell'aria oscillante tra 8 e 9 bar.

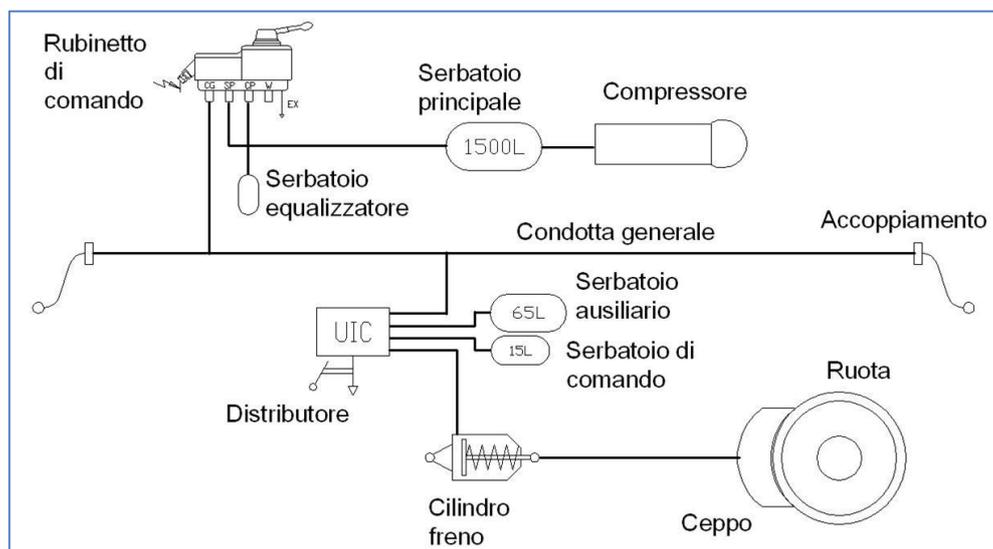


Figura 1: Schema dei componenti di un impianto frenante UIC.

Durante la frenatura, il rubinetto di comando del freno, fa fuoriuscire l'aria dalla condotta freno o condotta generale; questa riduzione della pressione dell'aria attiva il distributore, che pone il cilindro freno in comunicazione con il serbatoio ausiliario (del generico veicolo). Si determina uno svuotamento del serbatoio ausiliario ed un corrispondente riempimento del cilindro freno che muovendo il pistone aziona la frenatura. Il freno è automatico perché in caso di rottura del treno in corrispondenza dei ganci di trazione, l'aria fuoriesce dalla condotta freno, proprio come se fosse eseguita una frenatura di emergenza dal macchinista ed il freno si attiva. Il rilascio dell'azione frenante avviene mettendo in comunicazione, sempre tramite il rubinetto del freno, il serbatoio principale con la condotta generale facendola così riempire. Il compressore fornisce aria al serbatoio principale e da questo fluisce nella condotta generale e nei serbatoi ausiliari: tutto ciò determina un contemporaneo svuotamento dell'aria dai cilindri freno.

Il valore finito e relativamente basso della velocità di propagazione dell'onda di pressione nella condotta generale (teoricamente 340 m/s, praticamente 280-300 m/s) determina un azionamento non simultaneo dell'azione frenante nei diversi veicoli e quindi l'insorgere di complessi fenomeni di dinamica longitudinale del treno. Occorre, però, notare che la non sincronicità dell'azione frenante ai diversi veicoli è dovuta alla non istantanea propagazione del segnale di frenatura lungo la condotta

generale, ma dipende anche, e non poco, dal fatto che i distributori sono caratterizzati da specifiche curve di trasferimento *quasi statiche* o di *equilibrio* (come quella di Figura 2). Pertanto la pressione al cilindro freno dipende dal valore della pressione in condotta generale e questa diminuisce con un gradiente sempre più basso man mano che i veicoli sono più lontani dalla locomotiva, come mostra anche la Figura 3. In tale figura sono rappresentate le pressioni in condotta generale per i diversi veicoli del treno al variare del tempo: è evidente che man mano che la pressione al primo veicolo scende per ottenere la stessa pressione all'ultimo veicolo (e, quindi, "teoricamente" la stessa forza frenante) è necessario un tempo sempre maggiore.

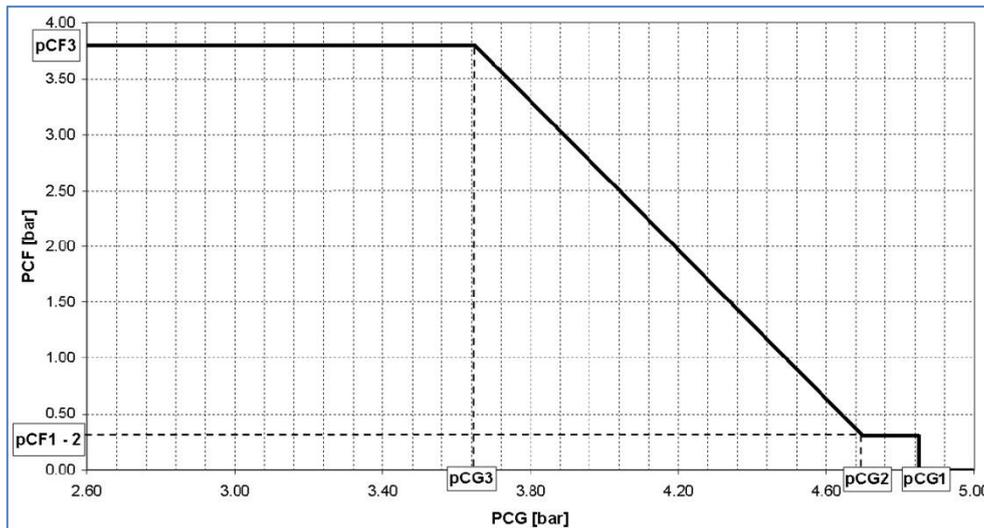


Figura 2: Esempio di curva di trasferimento del distributore.

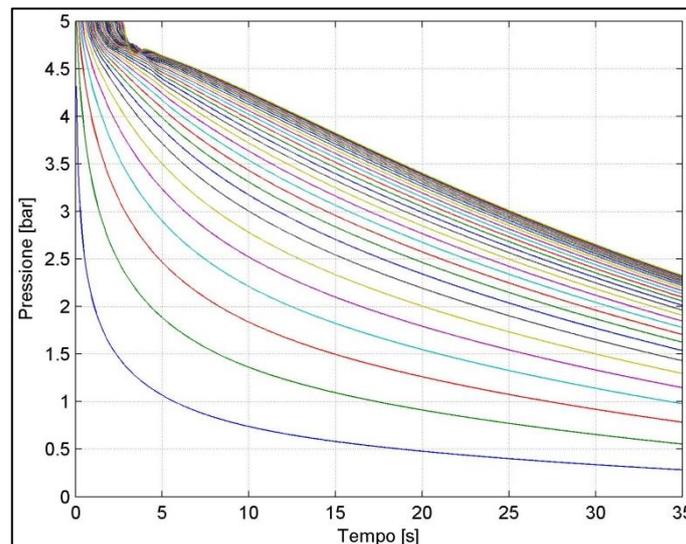


Figura 3: Evoluzione temporale della pressione in condotta generale ai diversi veicoli per una frenatura di emergenza.

“Teoricamente” in quanto la pressione al cilindro freno dipende sia dal valore della pressione impostata dalla curva di trasferimento sia dalla curva limite che dipende dal regime di frenatura (viaggiatori o merci) del treno: un esempio di curva limite di frenatura per il regime viaggiatori è mostrato in Figura 4. I tempi di riempimento al cilindro freno sono tra i 3 e 5 s per il regime viaggiatori e tra 18 e 30 s per quello merci. Ciò vuol dire che la pressione al cilindro freno non può essere superiore a quella data dalla curva limite, questo per contrastare la disomogeneità della frenatura tra i diversi veicoli.

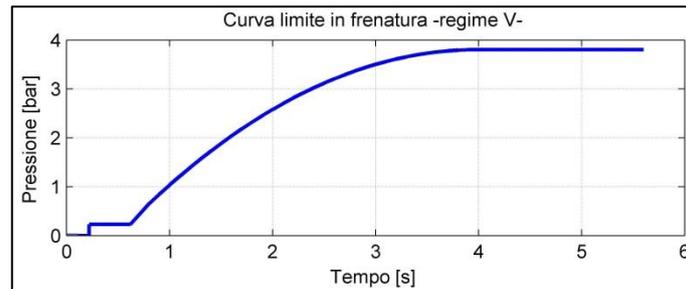


Figura 4: Esempio di curva limite di frenatura in regime-viaggiatori.

Infine, l'effettivo valore della forza frenante dipende anche da quello del coefficiente d'attrito ruota-ceppi (per freni tradizionali, come nella maggior parte di vagoni merci Europei) o ruota-disco (per i freni con guarnizione d'attrito in materiali sinterizzati, tipici dei vagoni passeggeri e di alcuni vagoni merci). Nel primo caso esso è molto variabile sia con la pressione specifica ruota-ceppo (generalmente in ghisa) sia con la velocità come mostra la Figura 5, mentre nel secondo esso è costante. Quest'ulteriore variabilità di comportamento tra i diversi veicoli contribuisce ad incrementare le forze scambiate ai respingenti tra due veicoli consecutivi durante una frenatura, perché i primi veicoli tenderanno a frenare prima e sempre più efficacemente degli ultimi, causando in treni molto lunghi decelerazioni longitudinali anche superiori a quella di gravità durante una frenatura d'emergenza.

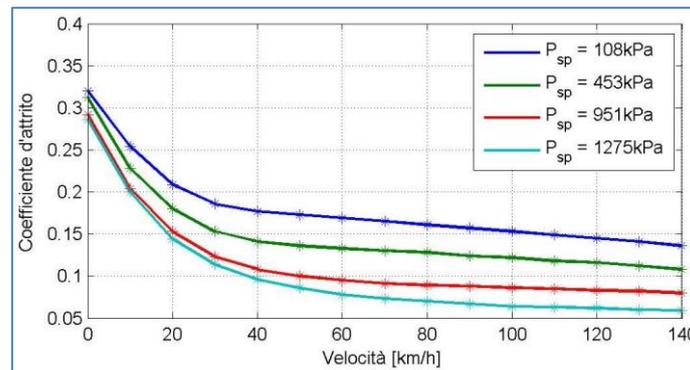


Figura 5: Evoluzione del coefficiente d'attrito ruota-ceppi con la velocità e con la pressione specifica ruota-ceppo.

Un'altra grandezza importante usata per descrivere la capacità frenante di un veicolo e che racchiude, sinteticamente i precedenti aspetti è il peso frenato. Esso misura la capacità di frenatura di un veicolo (o di un intero treno): a parità di velocità iniziale un veicolo con un peso frenato maggiore frenerà in uno spazio d'arresto inferiore rispetto ad uno con un peso frenato minore; correlata a questa grandezza vi è poi la percentuale di peso frenato data dal rapporto percentuale tra il peso frenato ed il peso (complessivo) del veicolo.

3. UTILIZZO DEL METODO DOE

L'obiettivo è, quindi, l'assemblaggio di treni caratterizzati dalla maggior lunghezza e massa, consentendo così un incremento dell'efficienza del trasporto merci, mantenendo però gli standard di sicurezza per quanto concerne lo spazio d'arresto [5] e le forze in compressione stabiliti dall'UIC [6]. Per fare questo si vuole ottimizzare la sequenza dell'ordine dei vagoni e il carico da essi trasportato in modo che la *performance* di frenatura del treno sia adeguata alle suddette norme. Poiché l'ordine dei vagoni e la disposizione del carico sui medesimi influenzano in maniera modesta gli spazi d'arresto, in questa sede s'intende concentrare l'attenzione sulle forze longitudinali di compressione a 2 e 10 metri, al fine di individuare la configurazione migliore.

Sono principalmente due gli scenari che si incontrano nell'assemblaggio dei treni merci:

- 1- Si possiede l'esatto numero di vagoni che compongono il treno con la relativa tipologia e si deve scegliere la migliore configurazione di carichi.
- 2- I carichi per ogni vagone sono già determinati e si può, quindi, intervenire solo sulla sequenza di disposizione dei vagoni.

Disponendo del simulatore *TrainDy* che permette di testare ogni configurazione di treno, si è deciso di organizzare le suddette simulazioni da effettuare attraverso la metodologia del *Design of Experiments* [9] - [10], come precedentemente detto. Una prima ipotesi, valida soprattutto per il mercato Europeo di traffico merci mediante container, è quella di costruire un 2^k *Full Factorial Design* [8] in cui i k fattori siano il numero di vagoni che compongono il treno e i due livelli sono le due rispettive possibilità di riempimento dei veicoli. Con un treno composto da 30 veicoli avremmo un design 2^{30} per un piano fattoriale completo. Un'altra possibilità è quella di costruire un modello in cui ogni fattore sia un vagone di una coppia o più di vagoni.

Utilizzando un approccio DoE, l'obiettivo del progetto è stato quello di identificare le variabili (in questo caso fattore A=primo vagone, fattore B=secondo vagone, etc.) maggiormente critiche in termini di significatività statistica, al fine di trovare il livello di settaggio ottimale (in questo caso, distribuzione ottimale del carico) di tutti questi fattori (vagoni) contemporaneamente.

L'uso di un *Full Factorial Design* è risultato praticabile per costi e tempi richiesti fino ad un massimo di 12 fattori ($2^{12}=4096$ prove): per verificare la fattibilità di ridurre le prove sono stati poi confrontati questi risultati con un più snello e rapido *Fractional Factorial Design* [7] analizzando la bontà dei risultati in funzione della Risoluzione. I treni che si considerano hanno le caratteristiche riportate dalla Tabella 1 alla

Tabella 4. Nella composizione dei treni, si è poi tenuto conto del “vincolo commerciale” di avere un livello di veicoli carichi oscillanti tra il 70% e l'80%.

Il metodo DoE, che qui è stato applicato per mezzo del software MINITAB 16 [8], ha la finalità, fra l'altro, di creare un modello matematico in grado di “spiegare” statisticamente le problematiche in questione, cioè dire che è possibile scrivere una risposta del sistema (in termini di forze longitudinali in compressione a 2 m o a 10 m) nel seguente modo:

$$Y = Const + A * Coef_A + B * Coef_B + C * Coef_C + \dots + AC * Coef_{AC} \quad (1)$$

dove i termini A, B, C, ..., AC etc. sono i valori codificati con +1 e -1 della configurazione che si considera (+1 indica “vagone carico”, mentre -1 indica “vagone scarico”). A, B, C, sono i diversi veicoli che seguono la locomotiva.

4. SCENARI DI UTILIZZO E PRINCIPALI DATI IN INPUT

Quanto descritto mostra la complessità del fenomeno fisico che causa le forze di compressione e trazione scambiate tra due generici veicoli adiacenti durante una frenatura. Per ridurre queste forze, che sono connesse alla possibilità di deragliamento del treno, l'unico parametro operativo che si ha effettivamente a disposizione è quello di prescrivere particolari regole per la disposizione delle masse lungo il convoglio ferroviario. La possibilità di agire sulla rigidità dei respingenti/tiranti, sul tipo di materiale d'attrito tra la ruota ed i ceppi, sui parametri di frenatura e su diversi altri aspetti è qualcosa che richiede in genere interventi normativi o costi (più o meno elevati) che non sempre è possibile affrontare da parte degli Operatori Ferroviari (siano essi pubblici o privati).

Per quanto concerne la disposizione delle masse lungo il treno, invece, gli unici vincoli sono sulla massa complessivamente trasportata da un treno e su quella statica agente sul generico assile ferroviario. Operativamente, soprattutto nel traffico merci mediante container, i diversi vagoni ferroviari sono: vuoti, semi vuoti (o anche semi pieni) e pieni. La disposizione lungo il treno di questi diversi tipi di vagoni è in generale abbastanza libera: a volte, per ragioni logistiche, ci sono vagoni che devono essere vicini tra loro perché devono essere caricati (o scaricati) insieme, ma complessivamente si ha una certa libertà circa la disposizione della massa lungo il treno. Ad ogni modo, è abitudine comune, al fine di ridurre le forze di compressione in frenatura soprattutto per i treni lunghi, disporre i veicoli con maggior carico in testa e quelli con minore carico in coda, o anche quelli con minore percentuale di peso frenato in testa e quelli con maggiore percentuale di peso frenato in coda: in

questo modo il treno in frenatura sarà meno compresso. I risultati mostrati nel seguito avvaloreranno questa pratica e forniranno indicazioni innovative nel caso di treni a frenatura distribuita.

Nell'analisi DoE riportata in questo lavoro i diversi fattori coincidono pertanto con la posizione dei veicoli lungo il treno e possono avere due livelli che corrispondono alle condizioni di carico e scarico (dove *scarico* significa che il vagone può essere effettivamente vuoto o semplicemente semi pieno). La Tabella 1 riporta alcuni sintetici dati riguardo i vagoni usati.

Tabella 1: Alcuni dati dei vagoni utilizzati nelle simulazioni.

	Vagoni treni corti		Vagoni treni lunghi				
	Vagone 1	Vagone 2	Vagone 1	Vagone 2	Vagone 3	Vagone 4	Vagone 5
Lunghezza [m]	29.5	20	33.94	19.74	19.64	19.74	19.64
Tara [t]	30	20	30	20	20	20	20
Diametro CG [mm]	36						
Numero assi	6	4	6	4	4	4	4
% Massa frenata / Massa [t]	120/30 100/108 90/120	120/20 100/72 90/80	100/30 100/102 80/135	100/20 100/72 80/90	100/20 100/59 80/90	100/20 100/58 80/90	100/20 100/72 80/90
Tipo di freno	Ceppi						
Regime frenatura	Viaggiatori		Merci				

Per quanto concerne le configurazioni di treno, si analizzano due famiglie di configurazioni di treni corti: una con una locomotiva in testa e 10, 11, 12 vagoni a seguire; e l'altra con due locomotive (entrambe attive in frenatura, vale a dire capaci di svuotare la condotta generale), ciascuna delle quali seguita da 5/6 vagoni (Tabella 2 e Tabella 3). Infine, si analizza la configurazione con due locomotive seguite ognuna da 30 vagoni raggruppati in blocchi da 6 vagoni uguali (Tabella 4): in questo scenario, i blocchi da sei vagoni sono considerati come un unico fattore DoE con due livelli: carico e scarico.

Tabella 2: Composizione dei treni corti a una sola locomotiva (Configurazione 1)

Loco	Vagone 1 (2 veicoli)	Vagone 2 (8, 9, 10 veicoli)
------	----------------------	-----------------------------

Tabella 3: Composizione del treno corto a due locomotive (Configurazione 2)

Loco	Vagone 1 (1 veicolo)	Vagone 2 (4, 5 veicoli)	Loco	Vagone 1 (1 veicolo)	Vagone 2 (4, 5 veicoli)
------	----------------------	-------------------------	------	----------------------	-------------------------

Tabella 4: Composizione del treno lungo (Configurazione 3)

Loco	Vag 1 (6 v.)	Vag. 2 (6 v.)	Vag. 3 (6 v.)	Vag. 4 (6 v.)	Vag. 5 (6 v.)	Loco	Vag 1 (6 v.)	Vag. 2 (6 v.)	Vag. 3 (6 v.)	Vag. 4 (6 v.)	Vag. 5 (6 v.)
------	--------------	---------------	---------------	---------------	---------------	------	--------------	---------------	---------------	---------------	---------------

5. ANALISI DEI RISULTATI

Il primo passo del lavoro è stato programmare piani fattoriali completi per vedere se l'impostazione generale di considerare ogni singolo vagone come un fattore potesse rappresentare bene le prove simulate dal software *TrainDy*. Per prima cosa, quindi, sono analizzati i piani fattoriali in cui i diversi fattori corrispondono all'esatto numero di veicoli che caratterizzano il treno; sono altresì noti la loro posizione ed i valori di massa corrispondenti alla condizione pieno / semipieno / vuoto (si è già ripetuto che un veicolo può assumere solo due condizioni). Il numero di possibili combinazioni di riempimento è pertanto 2^k , essendo k il numero di veicoli del treno (esclusa la locomotiva).

È stata quindi lanciata la Configurazione 1, ossia l'analisi di 1 locomotiva con 10, 11 e 12 fattori/vagoni mediante un *Full Factorial Design* (si veda in proposito la Tabella 2). Ciascun treno

analizzato ha due vagoni di tipo 1 in testa e i rimanenti di tipo 2 (i cui dati principali sono riportati nella parte sinistra della Tabella 1). Queste due tipologie di vagoni differiscono oltre che per la lunghezza e la tara, dal carico che possono trasportare (i vagoni 1 possono essere caricati pieni o semipieni, i vagoni 2 pieni o vuoti). Sono stati, quindi, creati i piani fattoriali per ogni tipo di treno considerando ogni vagone come un fattore caratterizzato da due possibili livelli, indicati dai valori codificati +1 e -1. Questi rappresenteranno rispettivamente il caso pieno/semipieno per il vagone 1 e semipieno/vuoto per i vagoni 2. I tre piani fattoriali sono quindi composti da 2^{10} , 2^{11} , 2^{12} prove che, rappresentando ogni singola configurazione di carico, definiscono un piano fattoriale completo. La Tabella 5 riporta un estratto dei risultati dell'analisi concernente il piano 2^{10} , in relazione alla configurazione 1 (mostrata in Tabella 2).

Tabella 5: Esempio di output MINITAB

10 FATT., R-Sq (adj)=98,22%, Const=-200194							
Term	Effect	Coef	P	Term	Effect	Coef	P
A	-3596	-1798	0	A*B	343	171	0
B	-3691	-1845	0	A*C	246	123	0
C	-3151	-1575	0	A*D	197	99	0
D	-3139	-1570	0	A*E	273	137	0
E	-3520	-1760	0	A*F	344	172	0
F	-3668	-1834	0	A*G	105	53	0.036
G	-4217	-2109	0	A*H	131	66	0.009
H	-4270	-2135	0	A*J	156	78	0.002
J	-4101	-2051	0	A*K	116	58	0.02
K	-3846	-1923	0	B*C	283	142	0

Nella precedente tabella si riportano una sintesi degli output più interessanti dell'analisi DoE. In particolare nella colonna "Term" si riportano i fattori principali e alcune interazioni del secondo ordine che risultano significativi da un punto di vista statistico. Tale significatività è data dai valori del *p-value* (colonna "P") risultati inferiori a 0.05 e dal coefficiente (colonna "Coef") che essi hanno nella equazione (1). Pertanto i numeri maggiori in valore assoluto indicano una maggiore incidenza sulla risposta: in questo caso, volendo ridurre la forza di compressione là dove si hanno coefficienti maggiori sarà opportuno scaricare (livello -1) il vagone. La colonna "Effect" indica la variabilità massima dell'effetto considerato nel passare da un livello all'altro (da -1 a +1).

La bontà di tali modelli si leggerà attraverso il parametro R-Sq (adj), che indica quanto il modello matematico ricavato sia in grado di "spiegare" bene il fenomeno reale. Si considerano come valori accettabili R-Sq (adj) a partire dal 70%. In altre parole R-Sq (adj) indica per modelli a più variabili la capacità del modello "fittato" di avvicinarsi a quello reale attraverso i termini considerati.

Tabella 6: Risultati del piano fattoriali completi relativi alla Configurazione 1.

	Forze a 2 m			Forze a 10 m		
	2^{10}	2^{11}	2^{12}	2^{10}	2^{11}	2^{12}
N. fattori significativi	46 (10 di ordine 1, 36 di ordine 2)	55 (11 di ordine 1, 44 di ordine 2)	60 (12 di ordine 1, 48 di ordine 2)	23 (10 di ordine 1, 13 di ordine 2)	45 (11 di ordine 1, 34 di ordine 2)	53 (12 di ordine 1, 41 di ordine 2)
R-Sq(adj) [%]	98.22	97.16	97.45	90.81	90.62	87.89

La Tabella 6 riporta la sintesi dei piani fattoriali completi relativi alla Configurazione 1. In tutti i piani fattoriali analizzati si evidenzia che gli effetti delle interazioni del secondo ordine, seppur in ottica statistica siano rilevanti perché hanno un *p-value* minore del 5%, in realtà possono essere considerati trascurabili perché sono di un ordine di grandezza inferiore agli effetti dei fattori principali: si nota che ciò è in genere più corrispondente al vero per le forze longitudinali in compressione a 10 m rispetto a quelle a 2 m. L'analisi della colonna Coef, riportata in Tabella 5, mostra che i vagoni più importanti per la definizione delle forze di compressione sono quelli posti in coda: ciò è comune anche agli altri piani fattoriali che si riferiscono alla Configurazione 1. Questa circostanza mostra che l'analisi DoE è in grado di giustificare la pratica comune ferroviaria di porre in coda i vagoni scarichi. In questo ambito di utilizzo, si nota inoltre che il parametro R-Sq (adj) si riduce con l'aumento dei fattori e che

questo è in genere più basso per le forze a 10 m rispetto a quelle a 2 m, ciò significa che l'errore che si compie utilizzando un modello di fitting cresce con il numero di fattori ed è superiore per le forze a 10 m rispetto a quelle a 2 m.

In seguito è stato lanciato un piano DoE a treni con due locomotive al fine di studiare quale sia l'effetto dello svuotamento della condotta generale da più punti in base alla significatività della posizione del carico. Anche in questo caso, sono stati analizzati piani fattoriali completi, i cui risultati sono riassunti nella Tabella 7. In questa circostanza, gli effetti del second'ordine sono più importanti per le forze a 10 m rispetto a quelle a 2 m ed il parametro R-Sq (adj) si riduce con l'aumentare dell'ordine dei fattori, ma ha un comportamento simile per le forze a 2 m ed a 10 m.

Tabella 7: Risultati del piano fattoriali completi relativi alla Configurazione 2.

	Forze a 2 m		Forze a 10 m	
	2 ¹⁰	2 ¹²	2 ¹⁰	2 ¹²
N. fattori significativi	37 (10 di ordine 1, 27 di ordine 2)	52 (12 di ordine 1, 40 di ordine 2)	44 (10 di ordine 1, 34 di ordine 2)	76 (12 di ordine 1, 64 di ordine 2)
R-Sq(adj) [%]	95.04	89.17	94.77	94.55

Sebbene non si riporti, per ragioni di brevità, la tabella con i coefficienti principali riguardante i diversi fattori, si può affermare che, anche per la Configurazione 2, i vagoni finali (posti alla fine del secondo sotto-treno) hanno un'importanza maggiore nella determinazione delle forze longitudinali. Operativamente, ciò significa che è meglio caricare maggiormente il primo sotto-treno rispetto al secondo.

Successivamente, è stata analizzata la Configurazione 3 con il piano fattoriale completo 2¹⁰ per il treno di 60 vagoni, in cui i fattori sono stati associati a gruppi di 6 vagoni uguali. In questo caso le interazioni del 2° ordine sono importanti e, quindi, non è possibile trascurarle.

Tabella 8: Coefficienti principali per la Configurazione 3, 1024 prove.

Forze longitudinali a 2 m				Forze longitudinali a 10 m			
10 FATT., R-Sq(adj)=75%, Const=-719812				10 FATT., R-Sq(adj)=57.26%, Const=-364800			
Term	Effect	Coef	P	Term	Effect	Coef	P
A	104521	52260	0	A	-2592	-1296	0.178
B	92178	46089	0	B	10487	5243	0
C	18489	9244	0.006	C	20136	10068	0
D	-27903	-13952	0	D	15396	7698	0
E	14926	7463	0.025	E	7274	3637	0
F	-32274	-16137	0	F	15772	7886	0
G	-86662	-43331	0	G	-6430	-3215	0.001
H	-141030	-70515	0	H	-25015	-12508	0
J	-191761	-95880	0	J	-41903	-20952	0
K	-197184	-98592	0	K	-29405	-14703	0

La Tabella 8 riporta i valori dei coefficienti per i soli fattori principali per ragioni di brevità. Si nota che i coefficienti riguardanti i primi fattori sono in genere positivi: ciò significa che ponendo il carico in corrispondenza di queste posizioni le forze longitudinali di compressione si riducono, mentre ponendo il carico in corrispondenza del secondo sotto treno, dette forze tendono ad aumentare e lo fanno tanto più il carico è posto sugli ultimi veicoli del secondo sotto-treno (si vedano gli elevati valori delle righe J, ad esempio). Ad ogni modo, i valori R-Sq sono alquanto più bassi dei precedenti per entrambi i tipi di forze: ciò può significare che il numero dei fattori scelti non è sufficientemente adeguato dal punto di vista statistico per descrivere il fenomeno fisico in esame. Inoltre, focalizzando l'attenzione sul *p-value* delle forze a 10 m del fattore A (primi 6 vagoni), si può affermare che esso non è significativo: ciò significa che nell'assemblaggio del treno è possibile disporre a piacimento il carico perché A non influenza la risposta ossia porre molto carico in questa zona senza causare significativi effetti sulle forze longitudinali.

Infine, gli autori hanno voluto verificare quanto ridurre drasticamente le prove con un *Fractional Factorial Design* fosse comunque capace di rappresentare più o meno fedelmente i risultati di un

piano *Full Factorial Design*. Mantenendo una Risoluzione IV [10] e, quindi, accettabile, perché in grado di non confondere gli effetti dei fattori principali con quelli delle interazioni del secondo ordine, è stato lanciato un piano *1/128 fraction* costituito da 32 prove: lo scopo è quello di valutare se un modello ridotto (*Fractional Factorial 2¹²⁻⁷*) possa comunque rappresentare adeguatamente il problema. La Tabella 9 mostra per i diversi fattori principali e la costante del modello (si veda l'equazione (1) in proposito) la differenza percentuale tra il piano fattoriale completo e quello frazionario della Configurazione 1 con 12 veicoli: lo scarto è sempre limitato ed è mediamente maggiore per le forze longitudinali in compressione a 10 m. Per avere un'idea circa l'errore complessivo associato al piano fattoriale frazionario, si può affermare che la differenza massima, tra le forze predette, sia a 2 m che a 10 m, dal piano fattoriale completo e quello frazionario, è compresa in un intervallo di circa $\pm 10\%$, ottenuto con un onere computazionale inferiore di due ordini di grandezza, solo 32 simulazioni invece che 4096!

Tabella 9: Scarti percentuali tra i diversi termini nel confronto tra *Fractional vs Full Factorial Design*.

Forze 2 m, R(adj) = 87.89%		Forze 10 m, R(adj) = 74.80%	
Term	Variazione [%]	Term	Variazione [%]
Const	0.04%	Const	-0.02%
A	17.51%	A	3.02%
B	-3.71%	B	6.96%
C	-11.66%	C	22.09%
D	21.73%	D	31.72%
E	1.35%	E	-1.87%
F	13.19%	F	-29.80%
G	-14.91%	G	-14.19%
H	10.17%	H	-7.01%
J	-4.53%	J	18.69%
K	5.93%	K	44.31%
L	-7.65%	L	11.96%
M	-13.92%	M	25.12%

6. CONCLUSIONI

Il lavoro, da considerarsi introduttivo sul tema, mostra l'applicazione del metodo DoE all'individuazione razionale di composizioni di treno, aventi minori forze di compressione longitudinali in frenatura tra i respingenti e, quindi, un'implicita maggiore sicurezza di marcia contro il deragliamento da frenatura. L'analisi è stata condotta considerando le sole frenature di emergenza in piano (considerate molto pericolose per il rischio del deragliamento causato da eccessive forze longitudinali di compressione), ma contemplando configurazioni di treno a composizione tradizionale (una sola locomotiva in testa) e distribuita (una locomotiva in testa ed una al centro). L'analisi DoE ha permesso di riscontrare, in maniera razionale, quanto già noto per ciò che concerne le composizioni tradizionali di treno, ma ha anche fornito un punto di vista innovativo e di sicuro interesse per quelle a frenatura distribuita. Per quest'ultimo caso è stata stabilita l'importanza di un caricamento asimmetrico tra i due sotto-treni, ritenendo più favorevole spostare il carico sul primo sotto-treno (nei limiti del possibile, ovviamente). L'applicazione di piani fattoriali frazionari, caratterizzati da una riduzione dei tempi di calcolo di oltre due ordini di grandezza, ha mostrato come questa metodica sia bene in grado di fornire rapide indicazioni circa l'ottimizzazione razionale di una composizione di treno.

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] Fischer, R., "Project «Überlange Güterzüge» bei der DB Netz AG aus Sicht des EBA", *Der Eisenbahningenieur*, 12-15, July 2012.

- [3] Cantone, L., Crescentini, E., Salvini, P., Verzicco, R., Vullo, V., "Sviluppo e validazione di un modello fluidodinamico per la simulazione della condotta generale di un convoglio ferroviario". *Ingegneria Ferroviaria*, Nr. 1, pp. 27-38, 2007.
- [4] Cantone, L., Crescentini, E., Salvini, P., Verzicco, R., Vullo, V., "Modello numerico per lo studio della manovra di sfrenatura". *Ingegneria Ferroviaria*, Nr. 7/8, pp. 575-588, 2007.
- [5] UIC 544-1. Brakes – braking power, 4th edition October 2004, Paris, France.
- [6] UIC 421 OR, "Rules of the consist and braking of international freight trains", 9th edition, January 2012.
- [7] Arcidiacono, G., Citti, P., 2008, "Miglioramento di un processo di smaltatura mediante l'applicazione di tecniche DOE", *AIAS XXXVII Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni*, Roma.
- [8] Arcidiacono, G., Calabrese, C., Yang, K., 2012, *Leading processes to lead companies: Lean Six Sigma*, Springer, ISBN 978-88-470-2492-2.
- [9] Belingardi, G., *Strumenti statistici per la meccanica sperimentale e l'affidabilità*, Levrotto & Bella, 1996.
- [10] Montgomery, D.C., *Design and Analysis of Experiments*, Wiley & Sons, 2001.