

Armonizzazione dei requisiti geometrici e funzionali degli smorzatori per treni Alta Velocità

Prof. Ing. Stefano BRUNI^(), Dott. Ingg. Laura MAZZOLA^(*), Paolo BELFORTE^(**), Alessandro CERA^(***), Giampaolo MANCINI^(***), Heiko HARTWIG^(****), Dario VANNUCCI^(*****)*

SOMMARIO - Questo articolo presenta i maggiori risultati ottenuti nell'ambito del Progetto Europeo Modbogie, parte integrante del più ampio Progetto di ricerca Europeo Modtrain con particolare riferimento al processo di standardizzazione geometrica e di performance dello smorzatore antiserpeggio, che attualmente non è ancora un componente intercambiabile [5].

1. Introduzione

Gli smorzatori, in particolare quelli anti-serpeggio, ricoprono un ruolo rilevante per la dinamica del veicolo ferroviario: attualmente con il raggiungimento di velocità di esercizio, superiori ai 300 km/h il loro ruolo nell'assicurare le performance del veicolo è divenuto primario.

Inoltre è importante evidenziare come, tra tutti i componenti del veicolo ferroviario, gli smorzatori siano fra quelli più soggetti al deterioramento: di conseguenza una ottimizzazione dei processi manutentivi mediante riduzione delle varietà dei componenti permetterebbe di risparmiare notevoli costi per le Imprese Ferroviarie.

Nonostante tutti gli sforzi profusi per facilitare l'interoperabilità dei veicoli, ad oggi ancora non esistono procedure di accettazione e testing condivise ed armonizzate per il componente in esame.

Nell'ambito del progetto europeo ModTrain, ed in particolare del suo sottoprogetto ModBogie, focalizzato su una più efficace modularizzazione dei componenti del carrello, è stato realizzato uno studio approfondito degli smorzatori, sia in termini di interfacce geometriche e dimensioni complessive, sia per quanto riguarda le procedure di testing e di accettazione dei componenti. Grazie al lavoro congiunto delle Imprese Ferroviarie (*TRENITALIA*, DB ed SNCF), di costruttori di veicoli ferroviari (AnsaldoBreda, Alstom, Bombardier e Siemens) e dei produttori degli smorzatori (MSA, Isocomp et al.) e con il coordinamento del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano, è stato possibile conseguire importanti obiettivi nell'ottica sopra esposta.

In particolare, è stato possibile raggiungere una standardizzazione di tipo geometrico nonché definire una comune ed appropriata metodologia per la caratterizzazione del componente, attraverso parametri quantitativi, facilmente misurabili così da permettere una completa intercambiabilità dello stesso.

Nel presente lavoro viene illustrato sia l'approccio utilizzato per la standardizzazione geometrica, sia i risultati inerenti la caratterizzazione sperimentale degli smorzatori antiserpeggio; verranno evidenziate alcune criticità e proposta infine una modifica alla attuale normativa europea [7]. I dati sperimentali riportati nel presente articolo sono relativi ad uno smorzatore anti-serpeggio per treno viaggiatori ad alta velocità.

2. Standardizzazione delle interfacce geometriche e delle dimensioni generali

Una reale e completa standardizzazione delle interfacce degli smorzatori rappresenta un notevole beneficio per le Imprese Ferroviarie (SNCF, *TRENITALIA* DB): da una parte è possibile una consistente riduzione della varietà dei ricambi, dall'altra apre la possibilità di impiego di nuovi fornitori, permettendo una riduzione di costi ponendo operare in un più ampio mercato.

I vantaggi immediati che si possono trarre da un approccio modulare, ovvero dalla standardizzazione delle parti principali dello smorzatore possono essere riassunti in:

- riduzione dei costi, grazie alla creazione di economie di scala;
- riduzione dei costi di manutenzione e di rifornimento grazie alla maggiore presenza di parti ed interfacce modulari.

Innanzitutto è stata effettuata una vasta analisi delle

^(*) Politecnico di Milano.

^{(**) ex} Politecnico di Milano

^(***) *TRENITALIA*, Firenze.

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

^(*****) AnsaldoBreda, Pistoia.

SCIENZA E TECNICA

soluzioni adottate in tutta Europa per i treni ad alta velocità: le dimensioni principali degli smorzatori sono state catalogate e suddivise in classi. Nel contempo è stata effettuata una rigorosa valutazione delle diverse configurazioni delle interfacce di montaggio, al fine di armonizzarle quanto più possibile nelle classi sopra individuate.

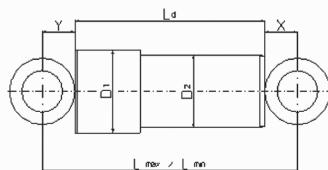
A titolo di esempio vengono riportati alcuni risultati conseguiti per la standardizzazione delle seguenti quote caratteristiche: diametro esterno, lunghezza minima e occhielli (tabella 1).

I valori del diametro esterno standardizzato sono stati scelti in modo da poter ricoprire la maggior parte delle soluzioni attualmente adottate, mentre la lunghezza minima dell'ammortizzatore è stata scelta in modo tale che questo smorzatore alla massima estensione possa essere alloggiato nello spazio a disposizione tra gli attacchi.

In tabella 1 vengono riportate le classi di diametro e la minima lunghezza per uno smorzatore standardizzato sia per applicazioni a sospensioni primarie e/o secondarie.

TABELLA 1
ESEMPIO DI DIMENSIONI CARATTERISTICHE

Classe	D1/D2 [mm]	Ld [mm] Standard	Ld [mm] smorzatore antiserpeggio
1	85/75	95	145
2	105/90	110	155
3	120/110	120	



La tabella 2 riporta invece le misure standardizzate identificate per gli occhielli dello smorzatore.

TABELLA 2
DIMENSIONI TIPICHE DEGLI OCCHIELLI PER
IL MONTAGGIO DELLO SMORZATORE

Classe	Diametro esterno [mm]	Occhielli smorzatori [mm]
1	60	30
2	70	35
3	80	40
4	90	45
5	110	55

Come precedentemente sottolineato, è stato condotto un accurato esame delle interfacce di montaggio: sono

state identificate le tre differenti tipologie più comunemente adottate. Queste tipologie sono quindi state classificate e, dove necessario, suddivise nelle suddette classi.

Si riportano due delle tre più importanti classi dei dispositivi di montaggio (tabella 3).

TABELLA 3
DISPOSITIVO DI MONTAGGIO DI TIPO 'A'

Classe	L11 [mm]	L21 [mm]	s [mm]	d [mm]
1	135	96	16	14
2	135	108	16	17
3	175	140	20	17
4	175	140	28	17

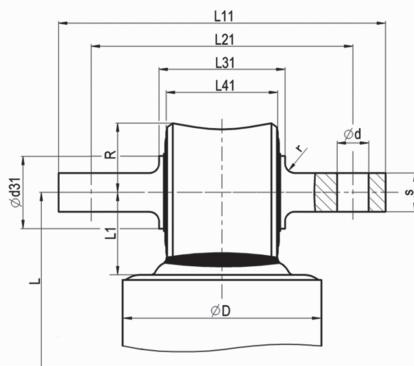
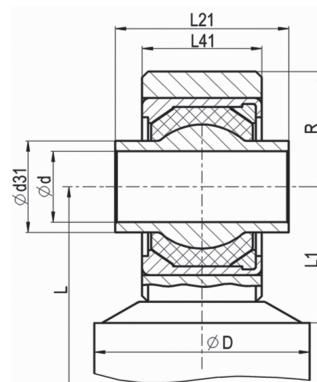


TABELLA 4
DISPOSITIVO DI MONTAGGIO DI TIPO 'B'



Classe	L21 [mm]	d [mm]
1	55	30
2	66	32,5

SCIENZA E TECNICA

Il conseguimento di una migliore standardizzazione degli ingombri e delle interfacce di montaggio dello smorzatore permette sicuramente una migliore competitività sia tra le imprese ferroviarie, che i costruttori di materiale rotabile e del componente stesso, che si tradurrà nel medio periodo in una riduzione di costi sia per la manutenzione, sia anche per la progettazione dei rotabili e dei componenti.

3. Armonizzazione Europea della procedura di testing

La completa intercambiabilità dello smorzatore non significa semplicemente che il componente debba essere progettato adottando interfacce standard, ma deve anche garantire la capacità di definire in modo univoco e chiaro il comportamento dello smorzatore, così da permettere che prodotti intercambiabili realizzati da differenti fornitori non influenzino le performance del veicolo [5]. Ciò fa sì che il processo di standardizzazione debba anche essere esteso alle modalità di definizione delle proprietà dell'elemento smorzante ed in particolare dovrà definire nel dettaglio non solo una procedura di prova, ma anche parametri quantitativi per la definizione oggettiva delle caratteristiche dei componenti, in modo da permettere una più agevole interazione tra utilizzatore e costruttore.

Attualmente una procedura di test per smorzatori è parzialmente definita dalla normativa europea EN13802 [7]: in realtà le condizioni di prova (ampiezza e frequenza di prova) normalmente utilizzate dai fornitori per i diversi prodotti sono apparse essere anche molto differenti fra i diversi stati Europei considerati (Italia, Francia, Germania, Svizzera ed Austria).

In questo paragrafo verranno delineate le linee guida utilizzate per la definizione della procedura di prova per smorzatori antiserpeggio, con l'obiettivo di proporre una procedura unificata per effettuare test di tipo per la determinazione delle caratteristiche dinamiche. Il risultato del test di tipo deve essere una definizione chiara delle caratteristiche smorzanti e di rigidezza del componente, che possono essere utilizzate sia per qualificare il componente stesso, sia, in fase di progettazione, per costruire modelli matematici multi-body per lo studio della dinamica del veicolo.

Questa procedura è stata definita grazie alla collaborazione del gruppo di lavoro Modtrain/Modbogie in cui operatori (SNCF, TRENITALIA e DB), costruttori di treni (AnsaldoBreda, Alstom, Bombardier e Siemens) e fornitori (fra cui MSA ed Isocomp), insieme al dipartimento di meccanica del Politecnico di Milano hanno confrontato le metodologie attualmente utilizzate per ottenere una armonizzazione della procedura di test e dei parametri di definizione. Sulla base di questa nuova procedura armonizzata sono stati provati alcuni smorzatori messi a disposizione presso i laboratori del Dipartimento di Mecca-

nica del Politecnico di Milano, al fine di verificare la bontà della procedura (par. 3.1).

Inoltre nei successivi sottoparagrafi verranno presentati i risultati ottenuti per evidenziare l'influenza delle caratteristiche dello smorzatore, definite nella nuova procedura di test, sulla dinamica di marcia del veicolo (par. 3.2).

Le considerazioni di 'best praticing' effettuate sulle procedure dei singoli operatori, insieme ai risultati dell'analisi condotta, evidenziano la necessità di una accurata qualificazione dello smorzatore non solo in condizioni di lavoro corrispondenti ad ampie deformazioni e basse frequenze, come originariamente previsto dalla EN13802 (**), ma anche per piccole deformazioni e frequenze elevate, come avviene proprio nel caso di incipiente instabilità di marcia.

3.1. Definizione delle caratteristiche dinamiche dello smorzatore

Attualmente la normativa vigente per gli smorzatori idraulici è la EN13802, che definisce caratteristiche di questo componente. In generale, la normativa ricorre a due diagrammi (il primo forza / velocità ed il secondo forza / spostamento) ricavati da test sperimentali condotti in laboratorio a differenti velocità (fig. 1). A partire dal diagramma forza/velocità è possibile stimare direttamente il coefficiente di smorzamento C del componente.

Le criticità di tale approccio sono principalmente le seguenti:

- viene specificata solo la massima velocità di deformazione, ma non l'ampiezza e/o la frequenza corrispondente;
- viene valutata la forza totale, ma non la reale forza smorzante.

Durante i test vengono imposti allo smorzatore cicli armonici di deformazione in controllo di spostamento: la dipendenza dal tempo della variazione della lunghezza dello smorzatore è data da:

$$d(t) = A \cos(2\pi f \cdot t) = A \cos(\omega \cdot t) \quad (1)$$

dove A rappresenta l'ampiezza della deformazione, f la frequenza del ciclo di deformazione ed ω è la corrispondente pulsazione. Per ogni combinazione di ampiezza e frequenza, la misura della massima forza prodotta in funzione della velocità nominale di deformazione (velocità nominale massima del ciclo), permette la costruzione del diagramma forza/velocità (fig. 1).

Dal suddetto diagramma è possibile identificare due diverse zone, corrispondenti a due comportamenti tipici dello smorzatore:

- per basse velocità, la forza dell'ammortizzatore tende a crescere linearmente, come indicato con linea tratteggiata in fig. 1;

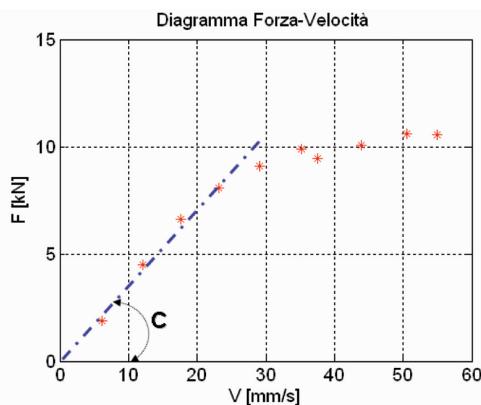


Fig. 1 - Tipico aspetto del diagramma forza/velocità per un ammortizzatore antiserpeggio.

- in corrispondenza di velocità elevate, è possibile osservare un effetto di saturazione che porta la forza dello smorzatore a mantenersi pressoché costante (punti oltre 40 mm/s nel grafico di fig. 1).

Attraverso il diagramma forza/velocità si può identificare il coefficiente di smorzamento C [Ns/m], che indica la capacità smorzante del componente in prova: il coefficiente C viene normalmente calcolato come il coefficiente angolare della parte lineare del diagramma forza/velocità (fig. 1).

Nella attuale versione della normativa non viene però definito il range di ampiezza e di frequenze a cui il test deve essere effettuato: tale fatto può, quindi, portare a dei risultati ambigui ovvero può accadere, soprattutto nel caso di ammortizzatori antiserpeggio, che il valore del coefficiente smorzante identificato non sia rappresentativo del reale funzionamento dello smorzatore durante l'esercizio. Infatti la massima velocità di deformazione V è data dal prodotto tra l'ampiezza di deformazione e la pulsazione:

$$V = \max(\dot{d}) = \omega A \quad (2)$$

Ciò implica che la stessa velocità può essere ottenuta a partire da differenti condizioni di lavoro, ossia ampie deformazioni e frequenze contenute oppure ampiezze ridotte e frequenze elevate.

La fig. 2a mostra i risultati di una più dettagliata analisi sperimentale in cui i test di laboratorio sono stati effettuati con ampiezze di deformazione variabili da 1 mm a 12.5 mm. E' possibile osservare come per un medesimo valore di velocità di deformazione, la forza misurata in una condizione in cui si ha una combinazione ad elevata ampiezza e bassa frequenza è sempre maggiore rispetto a quella identificata ad alta frequenza e bassa ampiezza. Tale comportamento è giustificabile con la presenza di una

deformabilità dello smorzatore che assume importanza non trascurabile qualora ci si trovi a considerare ampiezze di deformazione elevate ([1] [2]). Come verrà mostrato nel successivo paragrafo 3.2 l'effetto della deformabilità dello smorzatore tende ad acquisire importanza al crescere della frequenza: tale effetto diventa assolutamente non trascurabile soprattutto per un anti-serpeggio nella condizione di funzionamento più critica, ossia in condizione di instabilità di marcia del carrello.

Inoltre, l'analisi semplificata proposta in fig. 1 porta a risultati ancor più lontani dal reale comportamento dello smorzatore, qualora si consideri che, in effetti, la forza prodotta dallo smorzatore non è esclusivamente forza smorzante viscosa ideale. Tale forza non si trova in perfetta quadratura con lo spostamento applicato: ne conseguo che per ottenere una realistica stima dell'effetto smorzante è necessario considerare la forza totale misurata come somma della componente elastica F_e e di quella smorzante F_d , rispettivamente in fase con la deformazione e con la sua derivata.

Qualora, infatti, sia possibile assumere un comportamento lineare dello smorzatore, è possibile definire la componente elastica come proporzionale alla deformazione imposta, mentre quella smorzante proporzionale alla velocità di deformazione:

$$F = F_e + F_d = k_{eq}d + c_{eq}\dot{d} \quad (3)$$

dove k_{eq} e c_{eq} vengono rispettivamente definiti come "rigidezza equivalente" e "smorzamento equivalente".

In fig. 2b, a titolo di esempio, viene riportato l'andamento della sola componente smorzante (F_d) della forza misurata per differenti ampiezze e velocità: in questo caso la sensibilità con il variare della frequenza appare ancora più evidente: si consideri, ad esempio, il caso di ampiezza di deformazione bassa ($A=1\text{ mm}$), corrispondente ad alti valori di frequenza, ove la forza smorzante non cresce in modo monotono con la velocità, ma dopo aver raggiunto un valore di massimo addirittura decresce. Poiché la forza totale generata dallo smorzatore (fig. 2a) cresce monotonicamente con la velocità, si ha che la componente elastica generata dallo smorzatore diviene predominante rispetto a quella smorzante con il crescere della frequenza. Questo effetto è estremamente importante per gli smorzatori anti-serpeggio. E' infatti da notare come l'instabilità generalmente si presenti in corrispondenza di frequenze abbastanza elevate (4-8 Hz [2]), ma ampiezze contenute, dell'ordine dei 1-3 mm.

Sulla base dei risultati sopra presentati, appare chiaro che è necessario individuare le proprietà dello smorzatore attraverso un approccio che consenta di considerare la dipendenza dalla frequenza e di scindere l'entità della componente elastica della forza da quella smorzante, eq. (3).

Applicando la trasformata di fourier all'equazione (3) è possibile calcolare la funzione di trasferimento $H(j\omega)$ tra la deformazione dello smorzatore e la forza:

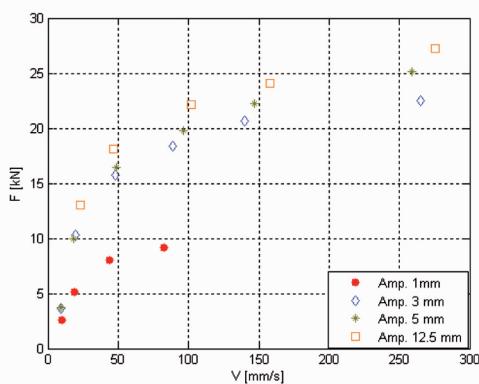


Fig. 2a - Comportamento in frequenza dell'ammortizzatore antiserpaggio, forza massima.

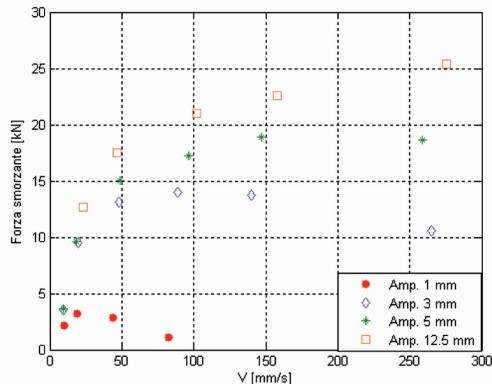


Fig 2b - Componente smorzante (F_d) della forza in funzione della velocità.

$$F(j\omega) = (k_{eq} + j\omega c_{eq})d(j\omega) = H(j\omega)d(j\omega) \quad (4)$$

Sulla base della equazione (4) è possibile concludere che:

- la forza generata da uno smorzatore a comportamento ideale lineare nasce come somma di una componente elastica definita dalla rigidezza equivalente (k_{eq}) e di una smorzante proporzionale allo smorzamento equivalente (c_{eq});
- solo la componente smorzante della forza genera dissipazione di energia, mentre la componente elastica introduce esclusivamente un ulteriore contributo, che deve essere comunque tenuto in considerazione per la valutazione della velocità critica del veicolo;
- il comportamento dello smorzatore può essere completamente definito solo tramite i due parametri di smor-

zamento (c_{eq}) e rigidezza equivalente (k_{eq}), che possono essere calcolati rispettivamente a partire dalla parte immaginaria e la parte reale della funzione di trasferimento $H(j\omega)$.

La fig. 3a rappresenta lo smorzamento equivalente (c_{eq}), mentre la successiva fig. 3b la rigidezza equivalente (k_{eq}) misurate durante i test (il cui diagramma forza velocità era stato riportato in fig. 1). Fissata un'ampiezza di deformazione, la rigidezza equivalente mostra un trend crescente con la frequenza, mentre lo smorzamento equivalente decrescente. E' quindi confermato che per uno smorzatore reale la componente elastica della forza diviene predominante con il crescere della frequenza, come precedentemente evidenziato. E' inoltre possibile osservare come nel range di frequenze che va da 4 a 7 Hz e tipico dell'instabilità dinamica a serpeggio, lo smorzamento equivalente risulta scendere al di sotto del 20% rispetto al suo valore a bassa frequenza, e la rigidezza equivalente è 6 volte maggiore che a bassa frequenza. Questi ultimi dati presentati confermano che identificare le proprietà dello smorzatore sulla base di test a bassa frequenza ed ampiezza di deformazione elevata non è adeguato per comprendere il comportamento reale dello smorzatore quando montato su un veicolo, affetto da instabilità a serpeggio.

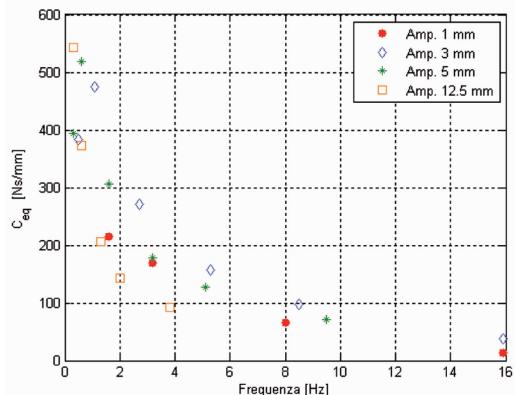


Fig. 3a - Smorzamento equivalente in funzione della frequenza.

Per completezza, viene anche riportato il caso di uno smorzatore con comportamento significativamente non lineare (cosiddetto smorzatore ad attrito, come tipicamente accade per la maggior parte degli smorzatori antiserpaggio). Precedentemente è stato sottolineato come lo stesso smorzatore possa presentare comportamento non lineare o lineare a seconda dell'ampiezza di deformazione e della frequenza di lavoro. A titolo di esempio, la figura 4 mostra come per uno stesso smorzatore possono sussistere due diversi comportamenti per le due distinte condizioni di prova. L'ammortizzatore analizzato è il medesimo i cui risultati sperimentali sono stati presentati nelle figg. 3a e 3b: nella fig. 4a è possibile osservare il diagramma

SCIENZA E TECNICA

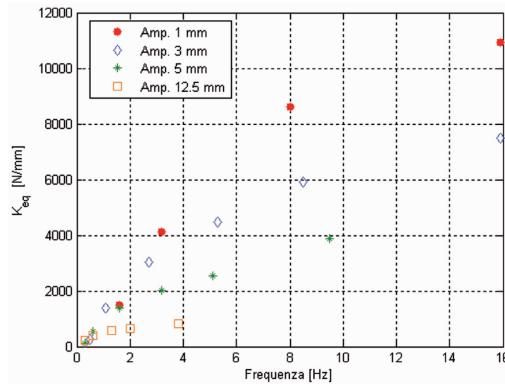


Fig. 3b - Rrigidezza equivalente in funzione della frequenza.

forza / spostamento misurato per una ampiezza $A=1$ mm e frequenza $f=6$ Hz, mentre in figura 4b viene riportato lo stesso diagramma per una prova ad ampiezza $A=5$ mm e frequenza $f=4$ Hz. In corrispondenza della prima condizione di prova è chiaramente identificabile la forma ideale ellittica del ciclo. Tale comportamento tipico di un sistema con smorzamento equivalente (c_{eq}) costante, ossia con comportamento lineare.

Nel secondo caso, al contrario, la forma del ciclo è significativamente discosta da quella ellittica, evidenziando che il comportamento dello smorzatore sia fortemente non lineare, benché sottoposto ad un ciclo di deformazione armonica; si ottiene quindi che la relazione tra forza e spostamento non può essere semplicemente descritta dall'equazione 3, ma invece deve essere considerata una relazione non lineare⁽¹⁾.

In caso di comportamento fortemente non lineare, le definizioni della rigidezza equivalente (k_{eq}) e dello smorzamento equivalente (c_{eq}) secondo l'equazione 3 possono comunque essere ritenute valide, qualora venga impiegata per il loro calcolo il valore della funzione di trasferimento $H(j\omega)$ in corrispondenza della frequenza di prova. Tale procedura approssima la forza prodotta dallo smorzatore con la sua componente fondamentale sincrona alla deformazione. Tuttavia l'impiego della quantità (c_{eq}), calcolata secondo l'eq. (3), per la definizione della caratteristica smorzante potrebbe risultare approssimativa nel caso di ciclo di isteresi non ellittico.

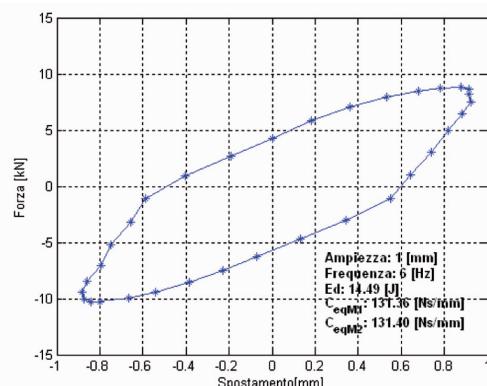
⁽¹⁾ Come noto, nel caso di sistemi non lineari un input monosinuso (deformazione $d(t)$ in questo caso), invece di indurre una risposta dello smorzatore con la stessa pulsazione della deformazione, genera anche contributi caratterizzati da multipli della pulsazione propria, ovvero nascono nella risposta le cosiddette armoniche di ordine superiore.

In tal caso si può proporre un approccio alternativo: la quantità c_{eq} può essere definita come il coefficiente smorzante di un sistema con comportamento ideale lineare viscoso, in grado di dissipare la stessa quantità di energia: si assume quindi che l'area del ciclo sia pari a quella ideale ellittica di uno smorzatore avente coefficiente c_{eq} .

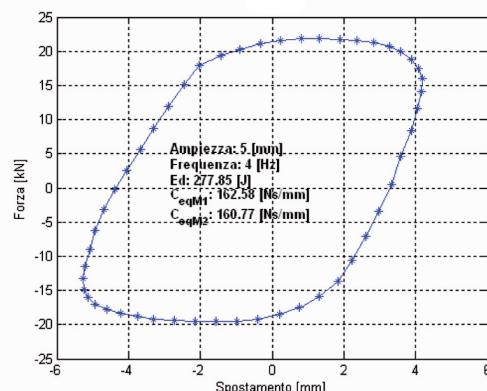
Posto che l'energia dissipata per uno smorzatore viscoso lineare con costante di smorzamento genericamente pari a c è data da

$$E_{dv} = \pi \cdot \omega \cdot c \cdot A^2 \quad (5)$$

in questo approccio alternativo, lo smorzamento equivalente (c_{eq}) può essere calcolato come:



(a)



(b)

Figg. 4a e 4b - Diagrammi forza-spostamento: (a) comportamento lineare a bassa frequenza; (b) comportamento non lineare ad alta frequenza.

$$c_{eq} = \frac{E_d}{\pi \cdot \omega \cdot A^2} \quad (6)$$

dove E_d è l'energia dissipata in un ciclo dallo smorzatore reale testato e calcolata come area del ciclo di isteresi definita da:

$$E_d = \int_0^T F(t) \dot{d}(t) dt \quad (7)$$

Nelle figg. 4a e 4b, sono stati riportati i valori di E_d calcolati secondo l'equazione 7 sia per il caso di ciclo di isteresi ellittico che non. Inoltre per entrambi i casi sono stati confrontati i valori dello smorzamento equivalente (c_{eq}) calcolati utilizzando l'approssimazione introdotta in precedenza (metodo 1), o considerando l'area del ciclo secondo l'equazione 7 (metodo 2): i due metodi di calcolo permettono di ottenere dei risultati poco differenti (1% di scostamento), sia per le basse (fig. 4a), sia per le alte ampiezze (fig. 4b).

3.2. Influenza del comportamento dello smorzatore sulla dinamica di marcia

E' stato dimostrato nel paragrafo 3.1, come la rigidezza dello smorzatore assuma un ruolo fondamentale nella definizione delle sue caratteristiche; infatti la componente elastica della forza generata dallo smorzatore diviene sempre più importante al crescere della frequenza, mentre quella smorzante tende a diminuire. In questo paragrafo, viene mostrato il ruolo che tale rigidezza gioca anche sulla stabilità di marcia in rettilineo, attraverso simulazioni numeriche multi-body del veicolo ferroviario.

Al fine di implementare correttamente la dipendenza dalla frequenza dei parametri di rigidezza (k_{eq}) e smorzamento (c_{eq}) equivalenti, è necessario considerare un modello molla e smorzatore del tipo di quello di Maxwell ([7]).

Tale modello è costituito da un elemento elastico in serie con uno smorzante, entrambi caratterizzati da parametri indipendenti con la frequenza (fig. 5a), denominati rigidezza (k_d) e smorzamento (c_d) del modello di Maxwell, successivamente indicati secondo la normativa EN13802 come rigidezza e smorzamento dinamici.

Nel seguito verranno proposti due metodi per la determinazione dei parametri del modello di Maxwell.

Il primo metodo considera che la risposta in frequenza del modello Maxwell (fig. 5a) possa essere ottenuta come segue:

$$H_M(j\omega) = K_d \frac{\left(\frac{C_d \omega}{K_d}\right)^2}{1 + \left(\frac{C_d \omega}{K_d}\right)^2} + j\omega \cdot C_d \frac{1}{1 + \left(\frac{C_d \omega}{K_d}\right)^2} \quad (8)$$

Attraverso l'uguaglianza tra l'espressione analitica dell'equazione (4) e quella dell'equazione (8) è possibile esprimere la risposta in frequenza dello smorzatore reale in funzione dello smorzamento dinamico (c_d) e della rigidezza dinamica (k_d) ed attraverso una procedura di minimizzazione trovare i parametri del modello di Maxwell. A titolo di esempio in tabella 5 vengono riportati i risultati di identificazioni per lo smorzatore trattato nel paragrafo 3.1. Tale metodo prende il nome di 'Least square method'.

Per quanto concerne, invece, il secondo metodo, riferendosi nuovamente alle equazioni del modello di Maxwell (fig. 5a), la forza smorzante può essere definita come:

$$F(t) = \frac{d_0 \cdot \omega \cdot K_d}{\sqrt{\omega^2 + (K_d/C_d)^2}} \sin\left(\omega t + \arctan \frac{K_d}{\omega \cdot C_d}\right) \quad (9)$$

dove la fase relativa fra forza e spostamento può essere scritta anche come:

$$\Phi = \arctan \frac{K_d}{\omega \cdot C_d} \quad (10)$$

La massima forza in estensione alla massima velocità (misurata quindi a metà della corsa) è pari a:

$$F_{e,vo} = \frac{d_0 \cdot \omega \cdot K_d}{\sqrt{\omega^2 + (K_d/C_d)^2}} \sin\left(\arctan \frac{K_d}{\omega \cdot C_d}\right) \quad (11)$$

Quando uno smorzatore viene testato a bassa frequenza, si può assumere come ipotesi semplificativa che la fase relativa tra forza e spostamento sia circa 90° e dunque la forza alla massima velocità (eq. 11) può essere scritta come:

$$F_{e,vo} \approx d_0 \cdot \omega \cdot C_d = v_0 \cdot C_d \quad (12)$$

In questo modo dalla misura di $F_{e,vo}$ è possibile direttamente calcolare il valore dello smorzamento dinamico (c_d). Considerando, poi, una prova ad alta frequenza è possibile determinare la rigidezza dinamica direttamente utilizzando la equazione (10), ossia:

$$K_d = \omega \cdot C_d \cdot \tan(\Phi) \quad (13)$$

Questo secondo metodo risulta però essere semplificato, in quanto parte dall'ipotesi di usare una prova a frequenza molto bassa per la determinazione dello smorzamento dinamico (c_d), per la quale si può considerare valida l'approssimazione di spostamento in quadratura con la forza. Per tale ragione questa seconda metodologia viene chiamata anche 'Simplified method'.

Tali parametri dinamici possono essere interpretati considerando che il parametro c_d rappresenta lo smorzamento equivalente (c_{eq}) dello smorzatore a frequenze mol-

TABELLA 5
PARAMETRI DEL MODELLO MAXWELL PER LO SMORZATORE TESTATO

C_d – smorzamento dinamico	543 [Ns/mm]
K_d – rigidezza dinamica	16258 [N/mm]

to basse e la rigidezza dinamica (k_d) tiene conto della deformabilità interna dello smorzatore dovuta, ad esempio, alla presenza degli elementi elastici nei fissaggi. Al fine di valutare l'influenza di quest'ultimo parametro sulla stabilità di marcia, vengono qui di seguito proposte due valutazioni della velocità critica del veicolo, mediante simulazione numerica, impiegando differenti modelli per lo smorzatore antiserpeggio. Tale analisi consente di mostrare la sensibilità della velocità critica al variare dei parametri del modello.

Caso 1: in questo caso ogni smorzatore anti-serpeggio del veicolo è stato modellato utilizzando un modello di Maxwell, caratterizzato dai parametri riportati in tabella 5.

Caso 2: in questo caso viene utilizzato lo stesso modello trattato nel caso 1, ma viene trascurata la deformabilità dello smorzatore. Questo corrisponde a considerare infinita la rigidezza dinamica (k_d): in pratica viene approssimato il suo comportamento con quello di uno smorzatore viscoso ideale, avente coefficiente di smorzamento pari allo smorzamento dinamico (c_d).

La fig. 5b mostra l'andamento in frequenza dello smorzamento equivalente (c_{eq}) per i due modelli implementati sul veicolo: il primo caso è rappresentato dalla linea rossa nella suddetta figura, mentre il secondo caso il valore dello smorzamento equivalente è costante con la frequenza. È possibile notare come nel caso 1 il modello di Maxwell ben ricostruisce l'andamento sperimentale dello smorzamento equivalente, mentre nell'altro caso vi è una sostanziale sovrastima delle performance dello smorzatore, soprattutto in corrispondenza delle frequenze elevate, che corrispondono a quelle tipiche dell'instabilità a serpeggio.

Il calcolo della velocità critica è stato effettuato in base alla procedura descritta in [3][4], con l'impiego di un codice di simulazione multi-body per lo studio della simulazione dinamica del veicolo ferroviario [2]. La velocità critica, infatti, viene ottenuta applicando l'elaborazione proposta dalla fi-

che UIC 518 ([6]) alla accelerazione laterale del carrello ottenuta da simulazione numerica, in rettilineo con irregolarità distribuita. I valori di velocità critica ottenuti per le due configurazioni sono significativamente differenti, infatti nel primo caso il limite di stabilità è di circa 320 km/h, mentre nel secondo caso è superiore a 420 km/h.

Questi risultati evidenziano l'influenza della rigidezza dello smorzatore antiserpeggio sulla definizione della velocità critica del veicolo. Inoltre dimostrano l'importanza di una definizione corretta dei parametri per la descrizione del comportamento dello smorzatore: la procedura di testing messa a punto permette, grazie alla definizione della rigidezza e dello smorzamento dinamico, di ottenerne dei parametri di sintesi che ben si adattano per qualificare il comportamento del damper.

Nel successivo paragrafo verrà dettagliata meglio la procedura di testing proposta dal gruppo ModBogie.

3.3. Proposta per standardizzazione per le procedure di accettazione sulla base dei test di tipo e di serie

Sulla base delle considerazioni esposte nei paragrafi precedenti, il gruppo di lavoro ModBogie ha preparato una proposta di modifica all'esistente normativa EN13802.

Ovviamente i test di caratterizzazione vengono richiesti come test di tipo, proponendo una distinzione tra questi e quelli di serie e quelli di tipo. I test di serie sono principalmente volti al controllo della qualità del processo di produzione, debbono quindi essere semplici, veloci ed il più economici possibile. I test di tipo invece devono permettere la caratterizzazione completa del componente al

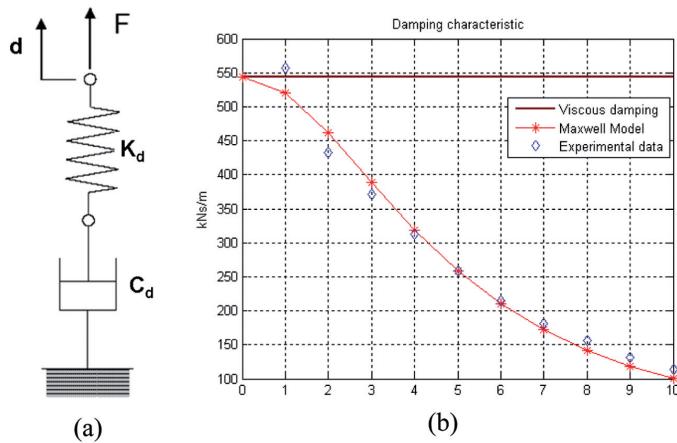


Fig. 5 - Caratteristica dinamica dello smorzatore: (a) Modello di Maxwell; (b) smorzamento equivalente (c_{eq}) in funzione della frequenza.

SCIENZA E TECNICA

fine di verificare se le proprietà di questo corrispondono alle specifiche richieste dall'acquirente e, conseguentemente, si richiedono test più estesi e completi. I risultati del test di tipo, inoltre, dovrebbero fornire informazioni esaustive anche per la messa a punto di modelli numerici, sempre più utilizzati in fase di progetto e di verifica dai costruttori dei veicoli.

Per quanto concerne i test di serie, questi sono previsti al fine di verificare la funzionalità del damper, senza indagini di dettaglio sulle sue caratteristiche. Nella nuova proposta si richiede che vengano effettuati su tutti gli smorzatori (100% della produzione), imponendo una deformazione con ampiezza pari a 25 mm e bassa frequenza. Le quantità da verificare con questi test sono:

- $F_{c,v0}$ [N] forza di compressione alla massima velocità del test (misurata in corrispondenza dello spostamento nullo);
- $F_{e,v0}$ [N] forza di estensione alla massima velocità del test (misurata in corrispondenza dello spostamento nullo);
- $F_{c,max}$ [N] massima forza di compressione dello smorzatore durante la prova;
- $F_{e,max}$ [N] massima forza di estensione dello smorzatore durante la prova;

Affinché lo smorzatore sia accettato è necessario che i parametri elencati siano compresi nelle tolleranze previste dalla specifica tecnica. Si sottolinea che i primi due valori di forza (misurati alla massima velocità) possono fornire un indice di massima della capacità smorzante del componente e, normalmente, non è detto che il valore massimo di forza sia uguale al valore della forza valutata alla massima velocità. Per queste ragioni si richiede che il test di serie sia in grado di monitorare per tutti i damper entrambe le coppie di valori: in questo modo si può qualificare velocemente il comportamento smorzante e verificare che anche la forza massima sia nei limiti di tolleranza richiesta.

I test di tipo, invece, sono previsti solo per un numero limitato di campioni, e devono essere in grado di qualificare completamente il componente.

E' innanzitutto necessario definire le modalità di prova sia in termini di frequenza di deformazione che in termini di ampiezza, in modo tale da effettuare il test in condizioni quanto più simili possibile al reale funzionamento. Per tale ragione per ogni famiglia di smorzatori sono state individuate le coppie di valori frequenza/ampiezza caratteristiche.

Utilizzando un forzamento sinusoidale con le caratteristiche sopra delineate, si può conseguire una definizione completa delle caratteristiche dello smorzatore, partendo dalla valutazione dei diagrammi forza/velocità, riproducenti i quattro valori di forza sopra elencati per permettere l'immediata valutazione sia della massima forza che lo smorzatore applica alle interfacce ($F_{e,max}$, $F_{c,max}$), sia della

forza smorzante realmente prodotta ($F_{e,v0}$, $F_{c,v0}$). Infine è necessario quantificare il comportamento dinamico del componente, sulla base di quanto spiegato nel precedente paragrafo 3.2: a tal fine è necessario valutare sia lo smorzamento equivalente C_{eq} (paragrafo 3.1), sia lo smorzamento (c_d) e la rigidezza (k_d) dinamici.

La modifica alla normativa prevede anche una definizione chiara ed univoca dei metodi da utilizzare per la definizione dei parametri del modello di Maxwell, presentate già nel precedente paragrafo 3.2.

Le modifiche alla normativa messe a punto si muovono nell'ottica di incrementare l'intercambiabilità dei componenti, con ovvii benefici per le Imprese Ferroviarie e per i Costruttori, che però non può prescindere da una completa caratterizzazione del componente stesso, fondamentale per avere garanzia del mantenimento delle performance del veicolo.

4. Conclusioni

Una migliore standardizzazione, degli smorzatori è un'importante obiettivo sia per le Imprese Ferroviarie, sia per i Costruttori di veicoli e di componenti. Per questa ragione nell'ambito del progetto europeo Modtrain/ModBogie, il team di Modbogie ha lavorato al fine di proporre un miglioramento dell'attuale situazione in Europa, che venga nel futuro tradotto in uno standard condiviso. Questo obiettivo è stato raggiunto sia in termini di standardizzazione di interfacce geometriche e di ingombri, che in termini di quantità necessarie alla definizione delle performance dello smorzatore.

Importanti linee guida riguardanti l'ingombro e le dimensioni delle interfacce di montaggio sono state armonizzate fra i diversi paesi.

Inoltre una metodologia più accurata è stata proposta per l'identificazione del comportamento dinamico dell'ammortizzatore, considerando le reali condizioni di esercizio del componente in esame.

Inoltre è stata messa a punto e verificata anche con test sperimentali una metodologia di prova che è stata condivisa da tutti i soggetti interessati all'interno del gruppo ModBogie, proprio per permettere di uniformare i test e di conseguenza per poter permettere una comune interpretazione dei parametri quantitativi di definizione delle performance del componente: questi parametri sono stati individuati in smorzamento equivalente (C_{eq}) e rigidezza (k_d) e smorzamento (c_d) dinamico.

Tali risultati rappresentano un progresso fondamentale nell'ottica di un mercato europeo, in cui si attui non solo il libero scambio dei convogli, ma anche una più agevole condivisione delle procedure di accettazione dei singoli componenti.

SCIENZA E TECNICA

Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato svolto grazie al contributo economico della Comunità Europea, nell'ambito del Progetto ModTrain del 6° Programma Quadro per la ricerca e lo sviluppo tecnologico.

Gli autori intendono ringraziare tutto il gruppo di lavoro ModBogie e tutti i fornitori che hanno contribuito in maniera determinante a quanto presentato sopra.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. WRANG, "Instability phenomena of a passenger coach, caused by internal damper flexibility", Supplement to Vehicle System Dynamics Vol. 33, pp 406-417 (2000).
- [2] S. BRUNI, A. COLLINA, G. DIANA, P. VANOLO, "Lateral dynamics of a railway vehicle in tangent track and curve: Tests and simulation", Supplement to Vehicle System Dynamics Vol. 33, pp 464-477 (2000).
- [3] S. ALFI, S. BRUNI, L. MAZZOLA, "Effect of motor connections on the critical speed of high speed railway vehicles", 20th IAVSD Symposium, Berkeley, August 2007.
- [4] G. DIANA, S. BRUNI, E. MAESTRINI, G. MANCINI, G. CAU, "New perspectives for High Speed rolling stock in Italy", WCRR'08 International Conference, Seoul (KR), 18-22 May 2008.
- [5] S. BRUNI, P. BELFORTE, G. MANCINI, A. CERA, H. HARTWIG, L. MAZZOLA "Experimental investigation of yaw damper performances: an improved and harmonised testing methodology developed within ModTrain EU project.", WCRR'08 International Conference, Seoul (KR), 18-22 May 2008.
- [6] Office de Recherches ed d'Essais de l'Union Internationale des Chemins de Fer; «Question C 116, interaction entre les véhicules et la voie, Rapp. N., Spectres de densité de puissance des défauts de la voie, 1-ère partie - definitions, conventions et données disponibles», Utrecht, 1971.
- [7] European Committee for Standardisation (CEN), "EN13802 - Railway applications - Suspension components - Hydraulic dampers", August 2004.

Sommaire

HARMONISATION DES REQUIS GÉOMÉTRIQUES ET FONCTIONNELS DES AMORTISSEURS POUR TRAINS À HAUTE VITESSE

Cet article présente les majeurs résultats obtenus dans le contexte du Projet Européen «Modbogie», partie intégrante du plus ample Projet de recherche européen «Modtrain» portant en particulier sur le processus de normalisation géométrique et de performance de l'amortisseur anti-ondulation, qui actuellement n'est pas encore un composant interchangeable.

Summary

ARMONISATION OF THE GEOMETRICAL AND FUNCTIONAL REQUIREMENTS OF SHOCK ABSORBERS FOR HIGH SPEED TRAINS

This paper illustrates the main results, achieved in the context of the European Project "Modbogie" that is part of the larger European research project "Modtrain", concerning the process for geometrical and functional standardisation of the anti-side-motion shock absorbers that presently are not interchangeable components.

Zusammenfassung

ZUSAMMENSTIMMUNG DER GEOMETRISCHEN UND BETRIEBLICHEN MERKMALEN DER DAMPFERN FÜR HOCHGESCHWINDIGKEITSZÜGEN

Vorstellung von Resultaten des europäischen Projekts ModBogie. Dieses Projekt ist Teil des europäischen Projekts Mod Train, und in dieser Arbeit wurde besondere Aufmerksamkeit dem StandardisierungsVerfahren von Gegenschlinger Dampfern gewidmet, unterm Sichtpunkt der Dimensionen und der betrieblichen Merkmale. Dieser Typ von Dampfern ist noch nicht Standardisiert.