

# STATO DELL'ARTE DEGLI INTERVENTI SULLA SORGENTE PER LA MITIGAZIONE DELLE VIBRAZIONI GENERATE DA SISTEMI DI TRASPORTO SU FERRO

Di Mino G.\* – Di Liberto C. M.\*\*

\*Professore Associato, Università degli Studi di Palermo, [gaetano.dimino@unipa.it](mailto:gaetano.dimino@unipa.it)

\*\*Dottore di Ricerca, Università degli Studi di Palermo, [maurizio.diliberto@unipa.it](mailto:maurizio.diliberto@unipa.it)

---

## SOMMARIO

La crescente esigenza di mobilità registrata negli ultimi anni in molte città italiane ha condotto all'elaborazione di importanti progetti per la realizzazione, o l'ampliamento, di reti di trasporto di massa in ambito urbano.

In molti casi le scelte progettuali prevedono la realizzazione di infrastrutture su ferro, come tram, metropolitana, o ferrovia urbana. Tuttavia, soprattutto nelle città caratterizzate da importanti patrimoni edilizi storici, la realizzazione di tali tipologie infrastrutturali comporta enormi problemi di inserimento ambientale dovuti agli impatti acustici e vibrazionali prodotti dall'esercizio dei vettori.

Un caso emblematico che ha mobilitato l'attenzione pubblica, nazionale ed internazionale, è quello del tram di Firenze: il passaggio di una delle linee a pochi metri dal Battistero di S. Giovanni ha, infatti, generato non poche preoccupazioni per i possibili danni indotti dalla componente vibrazionale sui mosaici e sulle altre opere d'arte in esso presenti.

In questa memoria è riportato lo stato dell'arte relativo alle soluzioni tecniche sulla sovrastruttura per l'attenuazione delle azioni vibrazionali generate da traffico su ferro e sono passati in rassegna alcuni tra i più significativi interventi eseguiti in ambito nazionale ed internazionale.

## ABSTRACT

In many Italian towns the rising demand of transportation has led to carry out or to develop infrastructures as urban railway, underground railway and tramway.

Where the architectural and historical valuable buildings are present, these infrastructures can give rise to environmental impacts as noise and vibration (for example in Florence the tramway near the St. John Baptistery).

In this paper we have reported the state of art about vibration mitigation measures on the railtrack; we have also analysed the most significant national and international projects.

*Keywords: vibration, mitigation measures, rai track.*

## **1. INTRODUZIONE**

L'esigenza di nuove e moderne infrastrutture stradali e ferroviarie in zone densamente popolate ha comportato nuovi problemi tecnici ed ambientali di non trascurabile entità. Vibrazioni e rumore possono interessare edifici ed insediamenti producendo disturbo agli abitanti. In condizioni particolarmente sfavorevoli le vibrazioni possono anche danneggiare le strutture molto sensibili come ad esempio edifici a struttura muraria, edifici storici o monumenti.

In particolare la sorgente composita diretta dei fenomeni vibratorii è identificata nel non ottimale contatto tra la ruota metallica e la linea di guida (binario). Proprio per tale ragione si ritiene che gli interventi di attenuazione più efficaci risiedano nella modifica della sovrastruttura mediante opportune soluzioni progettuali, tecniche di manutenzione e scelte operative che saranno criticamente discusse nel prosieguo della trattazione.

## **2. MISURE DI MITIGAZIONE**

Nello studio degli impatti vibrazionali prodotti da infrastrutture su ferro, data la complessità dei fenomeni in gioco, non è opportuno prescindere da un approccio integrato che tenga conto delle interazioni meccaniche tra i vari elementi del sistema veicolo-sovrastuttura-terreno.

Un'analisi organica del problema deve infatti considerare sia i fenomeni legati alla "generazione" delle azioni dinamiche scaturenti dal contatto ruota-rotaia, tenendo conto delle reciproche interazioni tra veicolo e sovrastruttura, sia i fenomeni di "propagazione" di tali azioni dalla sovrastruttura ferroviaria al terreno circostante, e quindi alle strutture recettrici. Ai fini dell'implementazione di metodologie e modelli di analisi, il sistema ferroviario è generalmente suddiviso in tre sottosistemi mutuamente interagenti fra loro: la "sorgente" (che può essere a sua volta distinta in sorgente superficiale o profonda), il "mezzo di propagazione" ed il "recettore".

In relazione agli interventi di mitigazione sulla componente sovrastrutturale della sorgente possono essere individuate le seguenti categorie:

- riduzione delle velocità operative dei convogli;
- manutenzione delle superfici di contatto ruota-rotaia;
- modifica delle caratteristiche dinamiche dei veicoli;
- tappetino resiliente sottorotaia ed attacchi super-elastici;
- tappetino resiliente sottotraversa;
- sub-ballast in conglomerato bituminoso;
- sovrastrutture con piastra sospesa (floating slabs);
- materassino sotto-ballast.

### **2.1 Riduzione delle velocità operative dei convogli**

Alcune ricerche sperimentali hanno evidenziato l'importanza della velocità dei convogli sull'entità del fenomeno vibrazionale (Dawn T. M., 1983; Degrande G. et al., 2000; Paolucci R. et al., 2003). Secondo Massarsch K. R. (2004) una riduzione della velocità di un fattore 2 può portare ad un decremento del 50% dei livelli vibrazionali.

In alcuni casi, una misura di mitigazione consiste nel limitare le prestazioni operative della linea riducendo la velocità di percorrenza dei convogli. A titolo d'esempio può essere citata l'esperienza dell'ATM di Milano che, al fine di salvaguardare le strutture del Duomo dalle vibrazioni prodotte dalla metropolitana (Bruschieri G. et al., 1987): a partire dal 1973, per tutto il tratto di linea 1 compreso tra il km 2+614 e 2+955, prescrisse a tempo indeterminato una velocità di 20 km/h.

## **2.2 Manutenzione del contatto ruota-rotaia**

Un aspetto molto importante nella gestione degli impatti vibrazionali in campo ferroviario è legato alla necessità di garantire un adeguato livello di manutenzione delle superfici di rotolamento di ruota e rotaia. Le irregolarità della ruota e della rotaia possono, infatti, incrementare i livelli vibrazionali neutralizzando gli effetti anche delle più efficaci misure di mitigazione.

I problemi legati al contatto ruota-rotaia e più in generale alla superficie di rotolamento riguardano azioni dinamiche fino a 1500 Hz. I più ricorrenti danneggiamenti superficiali delle ruote ferroviarie, che inducono i maggiori sovraccarichi dinamici, sono i cosiddetti "wheelflats" (sfaccettature) dovuti al bloccaggio delle ruote in frenatura. Col tempo questi difetti, di geometria iniziale ben definita (lunghezza tipica di 25-75 mm), possono essere attutiti dalle deformazioni plastiche indotte dal passaggio sotto carico delle sezioni modificate, dando luogo a errori di forma più attenuati ma di maggior estensione, ossia i "long wavelength wheelflats" (250-750 mm). Inoltre, sulla ruota sono spesso rilevate delle irregolarità (30-100 mm) simili alle tipiche "short wavelength corrugation" (usura ondulatoria corta) della rotaia (Bracciali A. et al., 1997).

I wheelflat possono, con rotaie difettose o indebolite da fori o saldature, provocare la rottura della rotaia. Le azioni impulsive generate si propagano oltre la rotaia e raggiungono le traverse, la massicciata (accelerandone il degrado), ed il terreno limitrofo. A causa delle wheelflat sono state misurate accelerazioni sulle rotaie fino a 700÷900 g e fino a 45 g sulla massicciata (Ahlbeck D. R., 1980).

La superficie di rotolamento della rotaia può essere soggetta a difetti di livellamento, i cui effetti, tutt'altro che trascurabili, sono definiti globalmente usura ondulatoria; si tratta di un difetto che consiste nella successione periodica o quasi periodica di avvallamenti e creste sulla superficie della rotaia che si ripetono con lunghezza d'onda caratteristica; in funzione di essa si definiscono tre tipi di usura ondulatoria: "corta, media e lunga". L'usura corta ha lunghezze d'onda di 3-10 cm e qualche centesimo di mm di ampiezza ed è presente essenzialmente nei rettifili e nelle curve di grande raggio. L'usura media è caratterizzata da lunghezze d'onda di 10-30 cm ed ampiezza di qualche centesimo di mm (0.3 mm circa), si manifesta nelle curve ed è tanto maggiore quanto più piccolo è il raggio. Infine, l'usura ondulatoria lunga è caratterizzata da una lunghezza d'onda che può variare da 1 a 3 metri, con una profondità media di 0.5 mm (difficilmente riconducibile al di sotto di 0.3 mm anche con specifici interventi), e si accompagna alla rotaia fin dalla sua fabbricazione (Alias J., 1986; Esveld C., 1989).

E', inoltre, possibile trovare altre irregolarità della superficie di rotolamento della rotaia, come saldature irregolari, giunti, o come difetti da fatica della superficie di contatto ("squats" e "shells"), il cui effetto è simile a quello delle wheelflats.

Anche l'usura ondulatoria genera, al passaggio dei convogli ferroviari, delle vibrazioni che si propagano nella sovrastruttura e nei veicoli. Sono stati misurati livelli di accelerazione delle rotaie di 100 g e 10 g a seconda che l'usura ondulatoria fosse presente o meno. In alcuni casi la molatura della rotaia ha consentito di ridurre da 5 a 0.8 g l'accelerazione della cassa di una vettura e da 2.7 a 1.1 g quella della cassa di una locomotiva (Alias J., 1986), mentre secondo Wilson P. G. et al (1983) la presenza di irregolarità della ruota e della rotaia può incrementare le vibrazioni nel terreno di 10-15 dB. Ovviamente la lunghezza d'onda del difetto e la velocità del convoglio determinano la frequenza eccitatrice, mentre la profondità delle onde determina il livello degli sforzi e delle accelerazioni

Nel caso in cui si possa accertare che eccessivi livelli vibrazionali indotti nel terreno siano riconducibili a problemi di irregolarità tra ruota e rotaia spesso la più efficace misura di controllo delle vibrazioni consiste proprio nell'attuare nuove procedure di manutenzione.

### **2.3 Modifica delle caratteristiche dinamiche dei veicoli**

Le caratteristiche meccaniche dei carrelli possono avere una notevole influenza sia sui livelli vibrazionali indotti al suolo che sull'entità del rumore aereo emesso.

L'accoppiamento tra le frequenze di risonanza della sospensione primaria e della sovrastruttura, e la coincidenza di esse con le frequenze di risonanza delle strutture recettrici, possono contribuire alla trasmissione delle vibrazioni negli edifici vicini alla linea.

Al fine di minimizzare le vibrazioni indotte sul terreno, i veicoli ferroviari dovrebbero avere le seguenti caratteristiche (Massarcsh K. R., 2004):

- piccola massa non sospesa;
- bassa rigidità della sospensione primaria;
- boccole di supporto della cassa realizzate con accoppiamenti acciaio-gomma;
- eliminazione delle superfici di contatto metallo-metallo tramite l'interposizione di boccole o cuscinetti.
- ruote con superficie di rotolamento liscia e perfettamente tronco conica.

A titolo esemplificativo può essere menzionata l'esperienza della Chicago Transit Authority (CTA), la quale nel 1978 ha utilizzato un veicolo di nuova concezione equipaggiato con carrelli caratterizzati da frequenze di risonanza della sospensione primaria di 8÷10 Hz, ottenendo un abbattimento dei livelli efficaci (r.m.s.) della velocità vibratoria al suolo di circa 20 dB per frequenze comprese tra 20 e 100 Hz (Wilson P. G. et al., 1983).

### **2.4 Tappetino resiliente sottorotaia ed attacchi super-elastici**

Tra i sistemi più economici per la riduzione delle vibrazioni direttamente alla sorgente si possono certamente annoverare i tappetini sottorotaia in materiale resiliente (*rail pads*).

Il tappetino sottorotaia ha lo scopo di interporre un elemento elastico ad elevata dissipazione tra la rotaia e la traversa al fine di attenuare le sollecitazioni che si generano nel contatto ruota-rotaia.

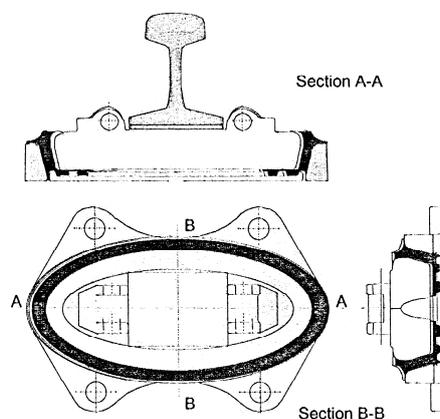
L'influenza delle proprietà elastiche e dissipative dei *rail pads*, in relazione al comportamento dinamico dei sistemi d'attacco, è stata studiata misurando in laboratorio, per frequenze comprese nell'intervallo 100÷1000 Hz, il fattore di smorzamento (*loss factor*) e la rigidità statica e dinamica sotto carico, sia laterale che verticale, di 5 diversi tipi d'attacco, tra i quali gli attacchi Nabla e Vossloh (Thompson et al., 1997).

L'utilizzazione del *rail pad* può essere diversamente efficace in funzione del tipo di sottostruttura di supporto: nel caso di sorgente profonda (tunnel) il sistema può essere efficace per frequenze superiori a 30 Hz, ottenendo in corrispondenza del valore di 50 Hz un abbattimento del livello del segnale di 6÷10 dB, mentre risulta inefficace nel caso di linea superficiale con armamento di tipo classico (Hemsworts B., 2000).

I limiti di applicazione di questi dispositivi sono costituiti da fenomeni di fatica, allargamento dello scartamento e da un cattivo allineamento della rotaia in caso di sua frattura. Inoltre il sistema risulta efficace solo quando il carico assiale è compreso tra 10 e 20 tonnellate.

Studi recenti sul controllo delle irregolarità della rotaia e sulla rigidità ottimale delle sovrastrutture con massicciata hanno consigliato l'impiego di attacchi con rigidità avente ordine di grandezza superiore a 19MN/m. Tuttavia, una maggiore efficacia nella riduzione dei livelli vibrazionali può essere ottenuta con sistemi d'attacco "super-elastici" come ad esempio l'attacco "Cologne Egg" (fig. 1). Tali dispositivi sono caratterizzati da una bassa rigidità verticale, e se confrontati con sovrastrutture senza massicciata consentono un abbattimento di 7 dB nel range di frequenze 31.5÷45 Hz, il quale aumenta fino a 18 dB per frequenze comprese tra 63 e 80 Hz (Esveld C., 2001).

La bassa rigidità verticale limita l'uso di questi dispositivi alle reti metropolitane con carichi statici per asse di 10.5 tonnellate.



**Figura 1 – Attacco "Cologne Egg" (Esveld C., 2001)**

Molto simile al sistema Cologne Egg è, infatti, l'attacco sviluppato dalla Advaced Track Inc. per la WMATA (Washington Metropolitan Area Transit Authority): il sistema è dotato di una rigidità statica verticale di circa 10 MN/m, ed è stato utilizzato per la riduzione delle vibrazioni trasmesse al terreno per frequenze intorno a 30 Hz (Nelson J. T., 1996).

Significativa è, inoltre, l'esperienza della Los Angeles County Metropolitan Transit Authority, la quale utilizzando uno speciale attacco elastico (*soft special fastener B616*) con rigidità statica di 10.5 MN/m ha ottenuto una riduzione di circa 5 dB dei livelli di "groundborne noise" per frequenze sopra 30÷40 Hz (Nelson J. T., 1996).

## 2.5 Tappetino resiliente sottotraversa

Nelle linee con massicciata l'interposizione di tappetini in materiale resiliente tra traversa e ballast ha prodotto buoni risultati fornendo riduzioni dei livelli di vibrazione di 15 dB in corrispondenza della frequenza di 125 Hz (Hemsworts B., 2000).

## 2.6 Sub-ballast in conglomerato bituminoso

Il miglioramento delle prestazioni meccaniche della sovrastruttura ferroviaria dovuto all'inserimento del sub-ballast è noto ormai da tempo (Orlandi D., 1984; Orlandi D., 1985). Gli effetti benefici riguardano soprattutto l'abbattimento delle tensioni di trazione nella massicciata e la conseguente diminuzione dei fenomeni di fatica a cui essa è sottoposta. Da ciò deriva una notevole riduzione del degrado sovrastrutturale, sia per quanto riguarda la stabilità del piano di posa delle traverse, che risulta prolungata nel tempo, sia per ciò che concerne l'usura e la frantumazione degli elementi litici costituenti la massicciata.

L'utilizzazione di sub-ballast in conglomerato bituminoso è ormai, in Italia, una realtà consolidata; nei tratti in trincea e rilevato, già da qualche decennio, tutte le linee ad alta velocità sono realizzate con sub-ballast asfaltico dello spessore di 12 cm (Giavarini C. et al., 2000).

Da qualche anno l'interesse dell'Ente gestore si è spostato verso la valutazione di alcune implicazioni di carattere ambientale. Esperienze condotte da R.F.I. su linee a velocità ordinaria hanno dimostrato che la presenza di sub-ballast in conglomerato bituminoso consente anche una diminuzione delle vibrazioni trasmesse al terreno (fig. 2).

Speed Km/h	a dB	a (peak) dB	A mm/s <sup>2</sup>	V mm/s	frequency Hz	Embankment Location
170	88	106	200	0.398	80	Sidepath with bit. mix
170	71	80.3	10	0.020	80	at 15m sub-ball
160	98.1	110.5	316	1	50	a 2.5 m Without
160	91.6	105.1	178	0.566	50	at 5m sub-ballast

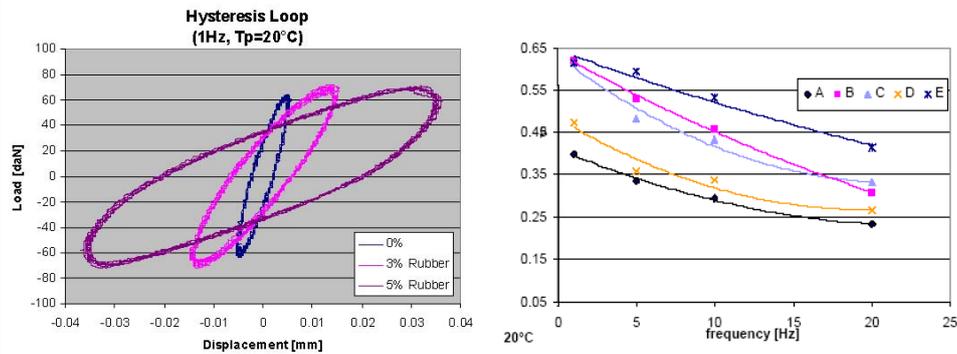
$a = 20 \log(a/a_0)$        $a_0 = 10^{-6} \text{m/s}^2$   
 the above measurements refer to two different lines without macroscopic defects and for the same type of railway carriage

Figura 2 – Livelli vibrazioni prodotti da linee con e senza sub-ballast in conglomerato bituminoso (Buonanno A. et al., 2000).

Negli ultimi anni diversi studi hanno evidenziato la possibilità di ottenere una maggiore attenuazione delle vibrazioni trasmesse al terreno utilizzando sub-ballast realizzati in conglomerato bituminoso additivato con granulato di gomma proveniente dal riciclaggio di pneumatici dimessi (*asphalt rubber*). Il materiale può essere prodotto sia con il processo “wet” che con quello “dry”; tuttavia i maggiori quantitativi di gomma richiesti dal processo dry e la loro diretta influenza sul comportamento meccanico del conglomerato sembrano conferire a questo migliori capacità smorzanti (D’Andrea A. et al., 2004).

L’effetto dell’incremento della percentuale di gomma sulle caratteristiche dinamiche e dissipative del materiale è stato mostrato da alcune ricerche sperimentali (Zeng. X. et al., 2001; Zhong. X. G. et al., 2002; D’Andrea A. et al., 2004).

In fig. 3, il diagramma isteretico carico-deformazione di un conglomerato bituminoso tradizionale è messo a confronto con quelli relativi a due miscele ottenute con differenti percentuali di gomma utilizzando il processo dry.



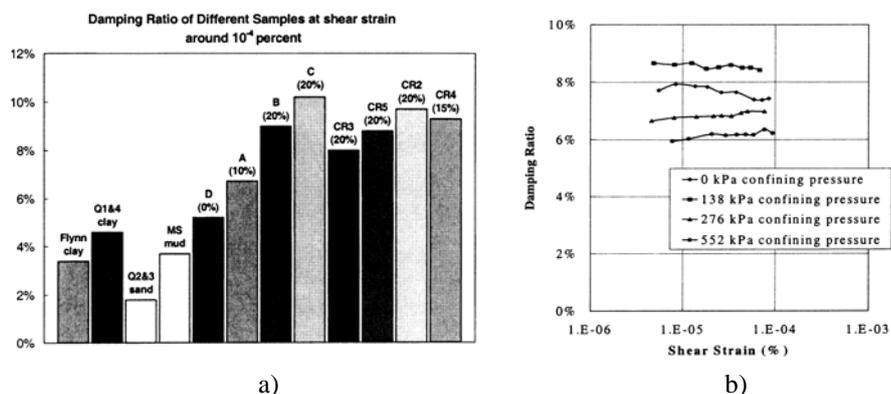
**Figura 3 – Ciclo d’isteresi e fattore di perdita ( $E_2/E_1$ ) a 20°C: A=0%, B=3%, C=5% (D’Andrea A. et al., 2004).**

Zhong. X. G. et al. (2002), utilizzando prove di colonna risonante e triassiali prove cicliche, hanno determinato il modulo di taglio ed il coefficiente di smorzamento di conglomerati bituminosi confezionati secondo processo wet con diverse percentuali e varietà di gomma (fig. 4.a). Gli autori hanno mostrato che una percentuale di gomma del 20% (rispetto al peso del legante) produce mediamente un coefficiente di smorzamento pari a circa 0.095, a fronte di 0.055 ottenuto per il conglomerato tal quale. E’ stata, inoltre, studiata l’influenza della pressione di confinamento e della deformazione tangenziale ciclica sulle caratteristiche di rigidità e di smorzamento del materiale (fig. 4.b).

Alcuni studi teorici hanno quantificato l’efficacia dell’uso dell’*asphalt rubber* nel controllo degli impatti vibrazionali provocati dal traffico ferroviario.

D’Andrea A. et al. (2004), utilizzando modelli FEM 2D e 3D, hanno mostrato che la realizzazione di un sub-ballast (12 cm) con il 5% di gomma (dry) produce negli strati sottostanti una diminuzione dei livelli efficaci (r.m.s.) dell’accelerazione vibratoria di circa 4 dB, per frequenze comprese nell’intervallo 50-125 Hz, rispetto al caso in cui si utilizza conglomerato bituminoso tradizionale. Inoltre, l’uso di strati aventi spessore di

20 cm comporta una maggiore efficacia del conglomerato bituminoso tradizionale, per frequenze comprese nell'intervallo 10÷40 Hz, rispetto a quello con il 5% di gomma.



**Figura 4 – Conglomerati bituminosi modificati con processo wet (Zhong, X. G. et al., 2002): a) conglomerati con diversa % e tipologia di gomma; b) diagramma smorzamento-deformazione per c.b. con il 20% di gomma (CR5).**

Tre strati di sub-ballast dello spessore di 15 cm, rispettivamente in calcestruzzo, conglomerato bituminoso ed *asphalt rubber*, sono stati messi a confronto da Wang C. J. et al. (2005). Gli autori, utilizzando modelli tridimensionali agli elementi finiti, hanno calcolato la riduzione dei valori efficaci (r.m.s.) e di picco delle accelerazioni, rispetto al caso senza sub-ballast, a varie distanze dalla sovrastruttura: il miglior controllo delle vibrazioni è stato ottenuto con il conglomerato bituminoso modificato con processo wet, per il quale a circa 20 m dalla sovrastruttura si è ottenuta una diminuzione del 47.3% dei valori efficaci e del 50.3% dei valori di picco. Nel caso dell'*asphalt rubber* gli autori hanno, infine, evidenziato l'importanza dello spessore dello strato e della velocità del convoglio nell'efficacia del sub-ballast quale misura di mitigazione delle vibrazioni.

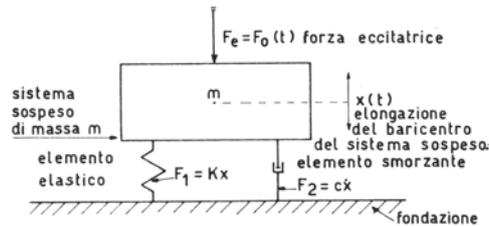
## 2.7 Sovrastruttura con piastra sospesa

Sistemi di questo tipo possono essere molto efficaci nel controllo del disturbo vibrazionale ed acustico, ma presentano l'inconveniente di essere molto onerosi economicamente: il loro uso si giustifica soprattutto nel caso in cui la linea attraversi contesti edilizi di particolare interesse storico o culturale, per i quali possono essere in atto anche situazioni di degrado statico.

Il sistema è costituito da una piastra in c.a. disposta su elementi resilienti (Wilson G. P. et al., 1983), generalmente in gomma o altro materiale elastomerico, sulla quale vengono montati gli elementi dell'armamento.

È ben noto che l'efficacia maggiore nella riduzione delle vibrazioni si ha per frequenze superiori a  $\sqrt{2}$  volte la frequenza di risonanza verticale della sovrastruttura, la quale può essere studiata come un sistema ad un grado di libertà (fig. 5): la massa concentrata  $m$  include sia la massa sospesa della sovrastruttura che la massa non sospesa del treno, mentre la rigidità  $k$  è determinata dalla rigidità verticale degli elementi resilienti sotto piastra. Il coefficiente  $c$  risulta legato al fattore di smorzamento

$\xi$  degli elementi resilienti ed alla frequenza naturale del sistema ( $\sqrt{k/m}$ ). E' possibile intervenire sulla capacità dissipativa del sistema variando lo smorzamento  $\xi$ , ovvero agendo sulla massa e sulla rigidezza. Il valore di  $c$  deve comunque essere tale da migliorare l'isolamento nelle frequenze vicine alla risonanza, senza ridurre l'efficienza del sistema nella fascia di frequenze ipercritiche (Santini M., 1984).



**Figura 5 – Modello matematico semplificato di un sistema a massa sospesa (Santini M., 1984)**

Al fine di abbassare la frequenza del primo modo di vibrare, in modo da accrescere l'efficienza del sistema, si può intervenire in due modi:

- adottare appoggi elastomerici sempre meno rigidi, essendo però necessario un livello minimo di rigidità verticale tale da assicurare una sufficiente stabilità alla rotaia in modo da non compromettere la regolarità di marcia dei treni;
- aumentare la massa sospesa, e in questo caso non è possibile andare oltre certi limiti in quanto vasconi troppo voluminosi necessiterebbero di eccessivo spazio in galleria e sarebbero difficilmente movimentabili.

La frequenza propria del sistema d'armamento deve comunque essere superiore a quella del sistema di sospensione dei convogli, che normalmente si aggira intorno a 2÷5 Hz.

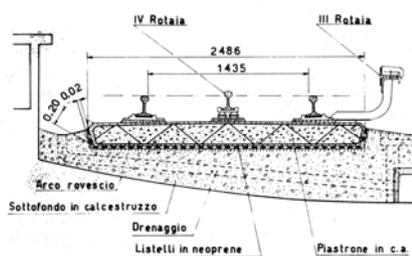
A causa dell'elevata concentrazione di recettori sensibili lungo le linee, il sistema a piastra sospesa ha trovato largo impiego soprattutto nel caso di metropolitane leggere.

Una delle prime applicazioni in Italia fu l'armamento denominato "tipo Milano", realizzato su 1100 m della tratta Pagano-Conciliazione della metropolitana di Milano (fig. 6.a). Il sistema è costituito da una piastra in c.a., della massa di circa 1200 kg/m, disposta su listelli di neoprene alternati a strisce di polistirolo espanso, i quali costituiscono il sistema di sospensione.

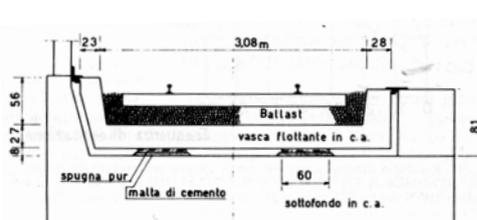
Nell'armamento tipo Vienna (fig. 6.c), utilizzato negli anni '70 su circa 2,5 km della metropolitana di Milano, l'elemento resiliente primario è costituito da un materassino in lana di vetro avente spessore di 50 mm. Su di esso viene realizzata una piastra in c.a., avente mediamente uno spessore di 20 cm, la quale, opportunamente sagomata, permette di alloggiare traverse dotate di cuffie in gomma.

In fig. 6.b è riportato il sistema Eisenmann sviluppato dall'Istituto Sperimentale Strade e Ferrovie della Technische Universität di München. Il sistema è costituito da una vasca in cemento armato all'interno della quale viene realizzato un normale armamento su ballast. La vasca è poggiata su due file di materiale resiliente (spugne poliuretatiche) realizzate con elementi aventi larghezza di 35 cm ed altezza di 40 mm; in tal modo si ottiene una massa sospesa che varia tra 4 e 6 ton/m a seconda che si

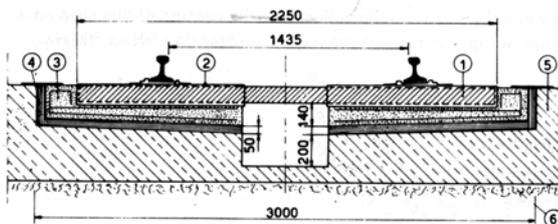
consideri la variante realizzata con vasca prefabbricata fuori opera in sezioni lunghe 1 m, o quella realizzata con vasca gettata in opera. Il sistema Eisenmann, per frequenze comprese nel range 10÷250 Hz, ha permesso una riduzione dei livelli di velocità vibratoria, misurata per banda costante di 10 Hz, compresa tra 12 e 22 dB, rispettivamente tra piede della rotaia e piedritto della galleria (Santini M., 1984).



a) Armamento tipo Milano-Linea Metropolitana 1



b) Sistema EISENMANN a vasche flottanti

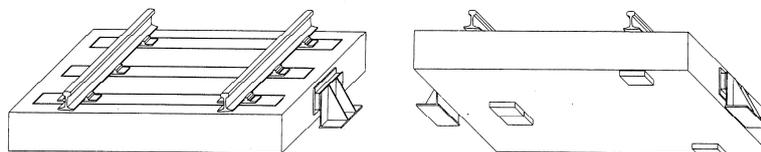


Pos.	Descrizione
1	Traversa di poliuretano
2	Rivestimento isolante in gomma
3	Cls armato
4	Lana di vetro
5	Solettone di regolamento
6	Solettone di fondo

c) Schema di armamento tipo Vienna.

**Fig. 6 – Esempi di sovrastrutture con piastra sospesa (Santini M., 1984)**

Recentemente Metropolitana Milanese S.p.a., in collaborazione con il Politecnico di Milano, ha sviluppato un nuovo tipo di armamento, denominato “Milano Massivo” (fig. 7), il quale è stato utilizzato in tutte le estensioni della rete metropolitana di Milano (Diana G. et al., 2004). Il sistema è costituito da un vascone in cemento armato sospeso su appoggi discreti. Il vascone ha una massa di circa 4 ton e poggia su solettone di regolamento tramite quattro elementi elastomerici.



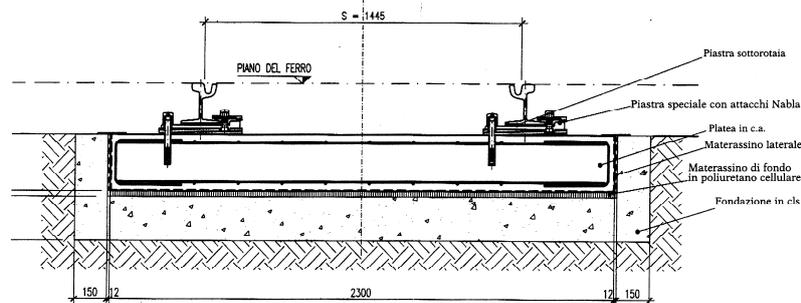
**Fig. 7 – Armamento Milano Massivo (Diana G. et al., 2004)**

La frequenza caratteristica del primo modo di vibrare verticale dell'intero sistema è di circa 18 Hz: tale valore è stato ottenuto considerato il miglior compromesso fra l'aumento della massa sospesa e la diminuzione della rigidezza degli elementi resilienti.

L'attacco delle rotaie ai vasconi, costituente un secondo sottosistema elastico, è stato ottimizzato al fine di ottenere una bassa predisposizione del binario alla formazione dell'usura ondulatoria.

L'armamento a piastra flottante è molto utilizzato anche nel caso delle tranvie.

Nella soluzione adottata da Metropolitana Milanese S.p.a. (Acquati M. et al., 2000), la rotaia a gola è stata ancorata ad una piastra in c.a., avente spessore di 20 cm e lunghezza di 12 m, tramite un attacco di tipo indiretto denominato Milano-Nabla. Gli elementi sopra descritti sono stati installati su una fondazione in calcestruzzo con geometria ad U il cui spessore dipende dalla rigidezza del terreno di sottofondo. L'isolamento è stato realizzato interponendo tra piastra in c.a. e fondazione un materassino elastomerico in poliuretano cellulare dello spessore di 25 mm (fig. 8); materassini dello spessore di 12 mm sono, inoltre, utilizzati per separare elasticamente i due fianchi della piastra dalla fondazione.



**Fig. 8 – Binario su platea in c.a. per tranvie e metrotranvie in soluzione a massa flottante (Acquati M. et al., 2000)**

L'ATM (Agenzia per il Trasporto Autoferrotranviario del Comune di Roma), in occasione dei lavori di ammodernamento della linea tranviaria su viale Regina Margherita eseguiti tra il 1994 ed il 1995, ha costruito la sovrastruttura a piastra flottante schematizzata in fig. 9. Lo strato di isolamento (3) è realizzato tramite un materassino antivibrante in neoprene avente spessore di circa 2,5 cm. La piastra flottante (4), avente spessore di circa 10÷15 cm, è realizzata con elementi prefabbricati. La massa sospesa è opportunamente incrementata tramite elementi prefabbricati in calcestruzzo (5), i quali vengono ancorati centralmente e lateralmente alla piastra. Sopra tali elementi viene realizzata la pavimentazione stradale (6).

Le vibrazioni trasversali della rotaia vengono ulteriormente smorzate da elementi in gomma (7) disposti lungo i lati delle rotaie all'interno del relativo alloggio.

Il sistema ha permesso di ridurre notevolmente i livelli di vibrazione indotti sugli edifici latitanti viale Regina Margherita: a circa 13 m dalla linea i livelli vibrazionali trasversali e verticali sono passati da 83,7 dB, riscontrati prima dell'intervento, a 76,3 dB, valore misurato dopo la realizzazione dei lavori (Emili R. et al., 2003).

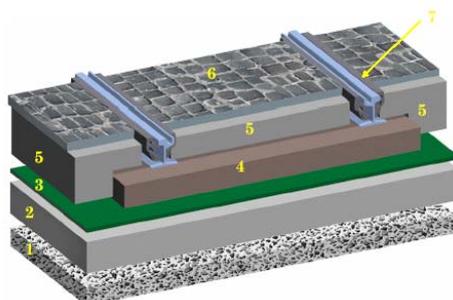


Fig. 9 – Sistema a piastra flottante utilizzato dalla ATM Roma (Emili R. et al., 2003)

## 2.8 Materassino sotto-ballast

L’inserimento sotto la massicciata di un materassino resiliente avente opportune caratteristiche dinamiche consente di trasformare una sovrastruttura di tipo tradizionale in una a “massa sospesa”.

L’intervento consente di migliorare in misura rilevante il comportamento di una linea già esistente sia per quanto riguarda l’isolamento vibro-acustico, sia per quanto riguarda la conservazione della geometria del binario e la qualità di marcia dei veicoli.

L’inserimento del materassino sotto-ballast (*ballast mat*) può essere effettuato direttamente sul suolo compattato, o sull’eventuale sub-ballast, nel caso di linea in superficie, oppure può essere interposto tra massicciata ed arco rovescio come nel caso delle linee metropolitane sotterranee. Tuttavia la prima soluzione è generalmente meno efficace in quanto il modulo di taglio del terreno, in corrispondenza o vicino la superficie di appoggio, può assumere valori tali da rendere la rigidità del supporto paragonabile a quella del materassino, rendendo quest’ultimo inefficace (Nelson T. J., 1996).

Tale circostanza è stata evidenziata anche da Hanson C. E. et al. (2006) i quali hanno riportato i risultati di misure sperimentali relativi ad interventi effettuati negli USA, a Baltimore e Boston.

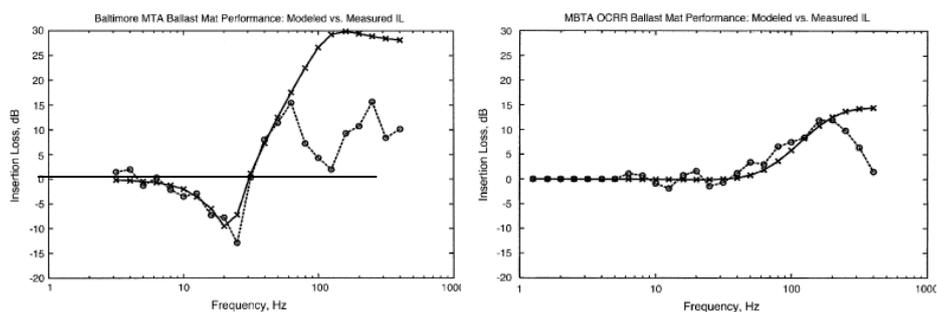


Fig. 10 – Efficacia dell’isolamento con materassino sotto-ballast, sperimentale (x) e numerico (o), nel caso di posa su basamento in calcestruzzo (sx) e sub-ballast in conglomerato bituminoso (dx) (Hanson C. E. et al., 2006)

Nel caso della “Baltimore Central Light Rail Line”, al fine di verificare l’efficacia dei materassini sotto-ballast, un piccolo tratto di linea è stato realizzato disponendo il materassino su un basamento in calcestruzzo avente spessore di 15 cm. Viceversa, nel caso della “MBTA commuter”, importante sistema ferroviario vicino Boston, lo stesso tipo di materassino è stato utilizzato direttamente su uno strato di sub-ballast in conglomerato bituminoso avente uno spessore di 15 cm.

In fig. 10 si osserva che nel caso della posa su piastra in calcestruzzo la riduzione delle vibrazioni è compresa tra 8 e 16 dB per frequenze comprese nell’intervallo 40÷80 Hz, assumendo il valore maggiore proprio in corrispondenza di circa 63 Hz, mentre nel caso della posa su sub-ballast si ottengono valori crescenti da 4 e 12 dB per frequenze comprese nell’intervallo 40÷110 Hz.

Significativa appare, inoltre, l’esperienza dell’ATM di Milano relativamente agli interventi effettuati negli anni ’80 al fine di salvaguardare le strutture del Duomo dalle vibrazioni prodotte dalla metropolitana (Santini M., 1984; Bruschieri G. et al., 1987).

L’intervento fu eseguito sulla linea 1 nel tratto più vicino alle strutture della basilica. Il tratto d’intervento si sviluppava in galleria; la sovrastruttura, del tipo con massicciata e traverse, era realizzata su uno strato di tout-venant (misto di pietre tonde e terriccio) dello spessore medio di 35 cm, il quale era disposto sull’arco rovescio. L’intervento consistette nella completa rimozione del tout-venant, nella posa del materassino resiliente (Sylomer B838) direttamente sulle strutture dell’arco rovescio, e nella realizzazione di un nuovo e più consistente strato di ballast.

È stato valutato un isolamento percentuale nella trasmissione delle vibrazioni dalla rotaia al piedritto della galleria pari all’80%, per frequenza eccitatrice di 60 Hz, e dell’96% nel caso della frequenza di 150 Hz.

L’efficacia dell’intervento fu verificata con una campagna di misure accelerometriche dalle quali emerse che i valori massimi registrati dopo la posa del materassino, per velocità di transito di 50 km/h, erano dello stesso ordine di grandezza o inferiori a quelli registrati prima dell’intervento per velocità di 20 km/h.

### **3. CONCLUSIONI**

La disamina del repertorio scientifico qui presentata ha fatto emergere come, al di là delle tecniche di mitigazione applicate alla sovrastruttura e alla loro efficacia, il problema delle vibrazioni, soprattutto per sistemi di trasporto su ferro, sia uno snodo critico per la progettazione di nuove linee e per la proficua gestione di linee in esercizio.

Non è questa la sede per delineare una graduatoria di merito tra le tipologie di intervento, del resto difficile da stilare in termini assoluti: le soluzioni possono ricondursi sostanzialmente a due stadi distinti, la progettazione e la manutenzione straordinaria, caratterizzate da costi e impegni di risorse sensibilmente differenti.

Tuttavia, soprattutto per le nuove realizzazioni in ambienti intensamente antropizzati, si ritiene che le soluzioni più all’avanguardia, mirate all’abbattimento della sorgente delle vibrazioni, debbano proporsi come schemi costruttivi tipici per le sovrastrutture di nuova generazione.

In definitiva occorre porre tra le priorità tecniche l’attenuazione delle vibrazioni fin dalla fase di progetto e, per le linee esistenti, inserire tale problema tra quelli critici che

orientano la gestione della manutenzione delle linee, senza disconoscere che tali obiettivi sono conseguibili a fronte di una congrua disponibilità di risorse intellettuali ed economiche.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Acquati M., Bruno C., Di Ilario L., Vigano S. (2000). Armamenti antivibranti per metropolitane e tranvie. *Ingegneria Ferroviaria*. Luglio: 454-459.
- Ahlbeck D.R. (1980). An Investigation of impact loads to wheel flats and rail joints. ASME Winter Annual Meeting. 16-21 november. Chicago, Illinois: 1-10.
- Alias J. (1986). Caractères de l'usure ondulatoire. *Rail International*. 11: 17-23.
- Bracciali A., Lionetti G., Moreno P (1997). Effective wheel flats detection through a simple device. World Congress on Railway Research WCRR '97. Firenze, Italy. Vol. D: 513-521.
- Bruschieri G., Mazzon L., Santini M. (1987). Interventi dell'ATM di Milano a salvaguardia delle strutture del Duomo dalle vibrazioni trasmesse dalla metropolitana. *Ingegneria Ferroviaria*. Aprile: 156-168.
- Buonanno A., Mele R. (2000). The use of bituminous mix sub-ballast in the Italian State Railways. 2<sup>nd</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress. Barcelona, Spain.
- D'Andrea A., Urbani L., Bonin G. (2004). Traffic Vibration Camping Whit Innovative Materials: Development And Calibration Of a Simulation Model. 2<sup>th</sup> International S.I.I.V. Congress. 27-29 October. Florence, Italy.
- Dawn T. M. (1983). Ground vibration from heavy freight trains. *Journal of Sound and Vibration* 87(3): 351-356.
- De Grande G., Lombaert G. (2000). High-speed train free field vibration: in situ measurements and numerical modelling. N. Chouw & G. Schmid ed., Proceedings of the International Workshop Wave 2000, Wave propagation, Moving load, Vibration reduction, pages 29-41. Ruhr University Bochum. December, 2000. Rotterdam, Germany.
- Diana G., Boccione E., Collina B., Lavagna B., Acquati M. 2004. Armamento Milano Massivo: concezione, simulazione dinamica e sperimentazione in laboratorio. *Ingegneria Ferroviaria*. Febbraio: 113-123.
- Emili R., Spadaccino A., Risoldi D., Tuzzi E., Buoncompagni C. (2003). Fitting light rail transit into historical centers. The Rome experience. 9th National Light Rail Transit Conference. 16-18 november. Portland, Oregon.
- Esveld C. (1989). *Modern Railway Track*. MTR-Productions, Duisburg.
- Esveld C. (2001). *Modern Railway Track (Second edition)*. MTR-Productions. Zaltbommel. The Netherlands.
- Giavarini C., Ravaioli C. (2000). L'asfalto nelle applicazioni ferroviarie. *Rassegna del Bitume*, n. 35: 33-36.
- Hanson C. E., Sigleton H. L. Jr. (2006). Performance of ballast mat on passenger railroad: Measurement vs. Projections. *Journal of Sound and Vibration* 293: 873-877.
- Hemsworts B. (2000). Reducing groundborne vibrations: state-of-the-art study. *Journal of Sound and Vibration* 231(3): 703-709.

- Massarsch K. R. (2004). Mitigation of Traffic-induced Ground Vibration. 11<sup>th</sup> International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 7-9 January. Berkeley, USA.
- Nelson J. T. (1996). Recent developments in ground-borne noise and vibration control. *Journal of Sound and Vibration* 193(1): 367-376.
- Orlandi D. (1984). I fenomeni di fatica nella struttura sotto binario. *Ingegneria Ferroviaria*. Giugno: 317-322.
- Orlandi D. (1985). Perché un subballast. *Ingegneria Ferroviaria*. Agosto: 447-453.
- Paolucci R., Maffei A., Scandella L., Stupazzini M., Tannini M. (2003). Numerical prediction of low-frequency round vibration induced by high-speed trains at Ledsgaard, Sweden. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 23: 425-433.
- Santini M. (1984). Sistemi d'armamento ad elevata attenuazione delle vibrazioni: criteri di progettazione ed esperienze di gestione. *Ingegneria Ferroviaria*. Aprile: 198-205.
- Thompson D. J., Verheij J. W. (1997). The Dynamic Behaviour of Rail Fasteners at High Frequencies. *Applied Acoustics* 52(1):1-17.
- Wang C. J., Zeng X., Mullen R. L. (2005). Three-Dimensional Finite Element Simulations of Ground Vibration Generated by High-Speed Trains and Engineering Countermeasures. *Journal of Vibration and Control*, 11(12): 1437-1453.
- Wilson G. P., Saurenman H. J., Nelson J. T. (1983). Control of ground-born noise and vibration. *Journal of Sound and Vibration* 87(2): 339-350.
- Zhong X. G., Zeng X. and Rose J. G. (2002). Shear modulus and damping ratio of rubber-modified asphalt mixes and unsaturated subgrade soils. *Journal of Materials in Civil Engineering* 14(6): 496-502.
- Zeng X., Rose J. G., Rice J. S. (2001). Stiffness and Damping Ratio of Rubber-Modified Asphalt Mixes: Potential Vibration Attenuation for High-Speed Railway Trackbeds. *Journal of Vibration and Control*, 7: 527-538.