

# **STATO DELL'ARTE DEGLI INTERVENTI SUL MEZZO RECETTORE E DI PROPAGAZIONE 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 generazione e la propagazione delle onde vibrazionali da una sorgente, ferroviaria o tranviaria, all'ambiente circostante è un problema complesso che risulta influenzato da vari fattori tra loro correlati: le caratteristiche e le condizioni della sovrastruttura, il peso, la velocità e le caratteristiche meccaniche del veicolo, le proprietà dinamiche e stratigrafiche del terreno, le caratteristiche dinamiche degli edifici recettori. Di tali aspetti occorre tenere conto ai fini della realizzazione di efficaci misure di mitigazione.

Nella presente memoria viene riportato lo stato dell'arte relativo agli interventi sul mezzo di propagazione (suolo e sottosuolo) e sul mezzo recettore (opere di fondazione e strutture in elevazione) per l'attenuazione degli impatti vibrazionali e sono analizzate alcune tra le opere più emblematiche realizzate in Italia e all'estero.

## **ABSTRACT**

The generation and the propagation of vibration are complex issue depending on some elements in mutual relation: the rail-track, the load, the speed and the mechanical characteristics of the train, the geotechnical characteristics and the stratigraphical scheme of the soil, the type of the building, etc.

The technician must take into account such elements to find effective mitigation measures for reducing the vibrational impacts.

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

*Keywords: propagation medium, vibration mitigation measures, building target.*

## 1. INTRODUZIONE

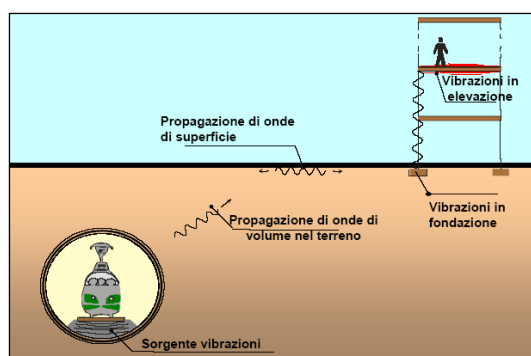
La generazione e la propagazione delle onde vibrazionali dalla sorgente all'ambiente circostante è un problema complesso che risulta influenzato da vari fattori tra loro correlati. In passato, in fase di progettazione, lo studio degli impatti vibrazionali veniva solitamente trascurato anche in presenza di recettori sensibili, oppure parzialmente affrontato perché non si aveva una visione sistemica del problema e quindi un approccio risolutivo efficace.

Tuttavia, anche oggi gli interventi di mitigazione degli effetti vibrazionali indotti da infrastrutture di trasporto in esercizio risultano più difficili e costosi; e quando non sono opportunamente progettati possono risultare del tutto inefficaci, se non addirittura nocivi (Pisani R., 2000).

Nella presente memoria è riportato lo stato dell'arte concernente il tema della riduzione delle vibrazioni indotte dalle infrastrutture di trasporto su ferro e vengono passati in rassegna alcuni tra i più significativi interventi sul mezzo di propagazione e sui mezzi recettori eseguiti in ambito nazionale ed internazionale.

## 2. VIBRAZIONI GENERATE DAL TRAFFICO FERROVIARIO

La principale fonte di eccitazione dinamica del binario è costituita dal sistema di forze che scaturiscono dall'interazione ruota-rotaia. Durante la marcia dei convogli, a causa delle anomalie superficiali e geometriche delle superfici di rotolamento, la zona di contatto ruota-rotaia diviene sede di azioni dinamiche le cui entità e caratteristiche spettrali sono strettamente connesse allo stato di manutenzione della sovrastruttura e del materiale rotabile (Esveld C., 2001).



**Figura 1 – Vibrazioni prodotte dall'infrastruttura ferroviaria**

Tali sollecitazioni si trasmettono dalla sovrastruttura ferroviaria alle eventuali strutture di supporto (galleria, rilevato, viadotto) e da queste al terreno di sottofondo, originando onde vibrazionali che si propagano fino alle opere di fondazione delle costruzioni poste in prossimità della linea (fig. 1).

Le sollecitazioni che nascono al contatto ruota-rotaia hanno un significativo contributo in frequenza fino a circa 1500 Hz, ma in effetti le forze trasmesse tramite la sovrastruttura al terreno o alle strutture di supporto sono significative fino ad una frequenza di circa 500 Hz (Knothe KL. et al., 1993).

Alcune ricerche sperimentali hanno evidenziato che l'azione sollecitante della sala montata suscita una risposta oscillatoria verticale della rotaia, in termini di accelerazione e spostamento, i cui valori di picco si manifestano generalmente per frequenze comprese nell'intervallo 50÷500 Hz (Accattatis F. et al., 1991), mentre vibrazioni a frequenze superiori possono essere ricondotte alla presenza dell'usura ondulatoria corta (Knothe KL. et al., 1993; Thompson D. J., 1997; Trio A., 2005).

Il processo di propagazione dell'energia vibrazionale nel terreno è generalmente formulato secondo la teoria elasto-dinamica classica. Le perturbazioni dinamiche provenienti dalla sovrastruttura producono nel corpo del mezzo di trasmissione onde di compressione e di taglio (onde di volume); d'altra parte in superficie la trasmissione dell'energia meccanica avviene principalmente attraverso le onde di Rayleigh (onde di superficie), le quali trovano origine all'interfaccia tra mezzi non omogenei (Gutowski T. G. et al., 1976).

Le onde di volume si propagano lungo fronti emisferici dando origine a fenomeni di attenuazione geometrica in misura proporzionale al rapporto  $1/r$  nel corpo del mezzo e ad  $1/r^2$  al piano limite, essendo  $r$  la distanza dalla sorgente. Le onde di superficie si trasmettono, invece, lungo fronti d'onda cilindrici attenuandosi in ragione di  $1/\sqrt{r}$  (Woods R. D., 1968).

L'ampiezza delle onde di Rayleigh decade molto rapidamente con la profondità, tanto da ridursi ad appena il 10% di quella in superficie ad una distanza dal piano limite di circa 1,5 volte la loro lunghezza d'onda (Richart F. E. et al., 1970).

Nel caso di sorgente superficiale (tracciato ferroviario in rilevato o a raso), ad una certa distanza da essa l'aliquota predominante del segnale vibratorio è sostanzialmente riconducibile alle onde di superficie, mentre nel caso di sorgente profonda (tunnel) sono le onde di volume ad offrire il contributo maggiore (Pezzoli P., 2004).

La velocità di propagazione muta in relazione alla natura meccanica dell'onda, ed è fortemente correlata alla rigidità del mezzo. L'onda di compressione, detta anche onda primaria o longitudinale, risulta da 2,5 a 4 volte più rapida di quella di taglio, o trasversale. La velocità dell'onda di Rayleigh è leggermente minore di quella dell'onda di taglio ed il loro rapporto, per valori del coefficiente di Poisson variabili nell'intervallo 0÷0,5, è compreso tra 0,87 e 0,96 (Athanasopoulos G. A. et al., 2000).

La distribuzione dell'energia trasmessa dai vari tipi d'onde è stata determinata (Miller et. al., 1954) nel caso di sorgente puntiforme su un semispazio elastico: il 67% dell'energia viene irradiata dalle onde di superficie, il 7% dalle onde di longitudinali ed il 27% da quelle trasversali.

Il campo di frequenze interessato dalle vibrazioni nel terreno è generalmente compreso nel range 1÷150 Hz, con le componenti spettrali predominanti che ricadono nell'intervallo 10÷60 Hz (Ceravolo et al., 1995; Chatterjee et al., 2003; Kim et al., 2000).

All'aumentare della distanza  $x$  dalla sorgente, il decadimento delle ampiezze  $A(x)$  degli spostamenti dovuto al comportamento dissipativo del mezzo (*damping properties*) può essere ben rappresentato dalla relazione:

$$A(x) = A_0 e^{-\alpha x},$$

nella quale occorre comunque precisare il legame funzionale con la frequenza  $f$  del coefficiente di assorbimento  $\alpha$ . Assumendo per  $\alpha$  la seguente legge di variazione lineare:

$$\alpha = \frac{\pi \eta f}{c},$$

nella quale  $\eta$  è il fattore di perdita e  $c$  la velocità di fase dell'onda, l'attenuazione nel terreno può essere determinata tramite la relazione (Gutowski T. G. et al., 1976):

$$A_d = -10 \log e^{-2\eta\pi f/c} = 27,29 \frac{\eta f x}{c} \text{ (dB)}.$$

Negli edifici recettori il disturbo può essere percepito sia come vibrazione meccanica degli elementi edilizi (*groundborne vibration*), sia come rumore irraggiato nei locali dagli orizzontamenti, dalle pareti e dagli infissi (*groundborne noise*).

Tali disturbi, in ragione dei meccanismi dissipativi sopra citati, decrescono rapidamente per distanze dalla linea oltre 25 m, risultando quasi nulli oltre i 200 m (Fields J. M., 1979).

Oltre alla distanza dalla sorgente, molti altri sono i fattori da cui dipende l'entità del disturbo vibrazionale. Diverse ricerche hanno evidenziato l'importanza della velocità e della massa del convoglio (Dawn T. M., 1979; De Grande G. et al., 2000; Paolucci R. et al., 2003), ma fattori quali, tipologia e caratteristiche meccaniche della sovrastruttura, tipo di sezione trasversale (trincea, rilevato, tunnel) e caratterizzazione meccanica e stratigrafica dei terreni di sottofondo possono avere un ruolo altrettanto importante (Di Mino G., 2003; Di Liberto C. M. et al., 2006; Di Mino et al., 2007).

### 3. MISURE DI MITIGAZIONE

Dall'analisi della letteratura tecnica è possibile distinguere tre differenti tipologie di interventi per la mitigazione delle vibrazioni:

- *mitigazione alla sorgente*, nella quale si possono inquadrare tutte le tipologie d'intervento effettuate direttamente sotto la sorgente di vibrazione o nelle immediate vicinanze di essa (isolamento attivo);
- *interventi nel mezzo di propagazione* delle onde vibrazionali, generalmente realizzati tramite l'interposizione di barriere d'onda nel terreno tra sorgente e recettore (in tal caso si parla di isolamento attivo o passivo a seconda che l'intervento venga realizzato in prossimità della sorgente o del recettore);
- *interventi sul recettore*, nella quale si possono classificare tutte le tecniche che prevedono il diretto intervento sulla struttura recettrice (isolamento passivo).

Nel prosieguo della trattazione si passeranno in rassegna gli interventi del secondo e del terzo tipo.

### 3.1 Interventi nel mezzo di propagazione

La riduzione delle vibrazioni ferroviarie agendo direttamente sul mezzo di propagazione può essere ottenuta con due differenti tipologie d'interventi:

- irrigidimento del suolo mediante blocchi ad elevata impedenza per la propagazione delle onde;
- introduzione di barriere d'onda tra sorgente e recettore.

#### 3.1.1 Irrigidimento del suolo mediante blocchi ad elevata impedenza per la propagazione delle onde (*Wave Impeding Block*).

Nel caso di linee ad alta velocità realizzate su suoli molli, per le quali la velocità del treno può essere molto vicina alla velocità delle onde di Rayleigh, gli strati superficiali del terreno possono essere sede di forti vibrazioni a bassa frequenza che possono addirittura provocare spostamenti della sovrastruttura (Madhus C. et al., 2000; Ju S.-H. et al., 2004).

In questi casi una possibile metodologia di mitigazione è quella di inserire, ad una certa profondità sotto la sorgente, una base (o un blocco) artificiale ad elevata rigidità al fine di modificare il regime di propagazione delle onde (*Wave Impeding Block*). La base si comporta come una fondazione rigida e nello strato soprastante si propagano solamente le onde aventi frequenza superiore al valore (*cut-off frequency*)

$$f_{cut-off} = \frac{c_s}{4h},$$

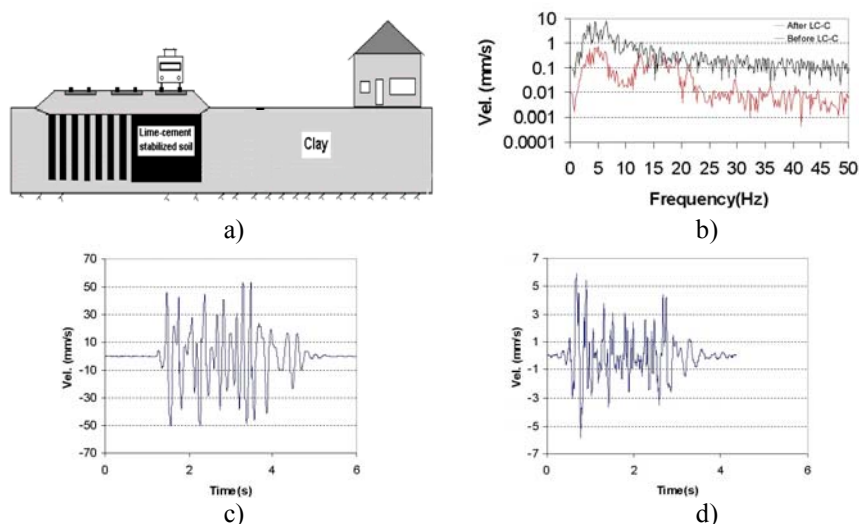
dove  $c_s$  è la velocità delle onde di taglio, ed  $h$  è la profondità dello strato di terreno posto sopra il blocco. E' opportuno precisare che la precedente espressione è esatta solo nel caso in cui la base rigida sia indefinita sul piano orizzontale (Sheng X. et al, 2006).

Poiché la realizzazione dei *Wave Impeding Block* (WIB) in calcestruzzo richiederebbe costi troppo elevati per la rimozione e il successivo ripristino del terreno (e dell'eventuale sovrastruttura), soprattutto nel caso di infrastrutture esistenti una soluzione può essere quella di stabilizzare il terreno sotto la sorgente iniettando al suo interno una malta liquida a base cementizia (*jet grouting*). In alternativa è possibile iniettare sostanze chimiche indurenti (*chemical injection*), in modo da riempire i vuoti intergranulari ed espellere l'acqua interstiziale presente, oppure iniettare malta di cemento mentre, a data profondità, le pale di una trivella sgretolano e rimescolano il terreno da stabilizzare (*deep mixing*) (Takemiya H. et al., 2003).

Nei paesi nordici il metodo maggiormente utilizzato per la realizzazione di blocchi ad elevata rigidità nel terreno sotto il rilevato è quello della stabilizzazione con colonne di calce e cemento, le quali possono incrementare la velocità delle onde di taglio delle argille molli da 40÷80 m/s a circa 200÷400 m/s, in relazione delle condizioni geotecniche del sito. Rispetto al terreno non stabilizzato ogni colonna comporta un incremento dell'impedenza di un fattore 5, con un aumento di circa 25 volte della rigidità a taglio. In realtà la rigidità dinamica complessiva della porzione di terreno trattata risulta più bassa in quanto le colonne vengono generalmente realizzate

in gruppo con una percentuale di ricoprimento del volume da stabilizzare del 25÷50% circa (Marssarsch K. R., 2004).

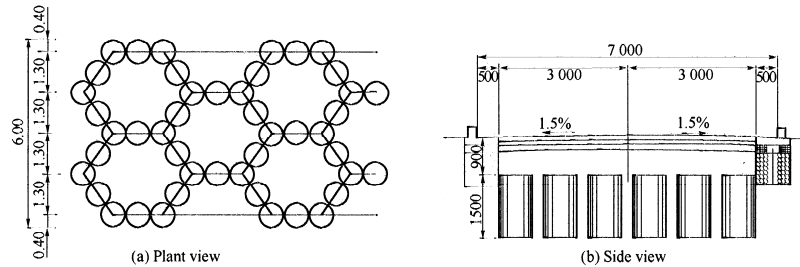
In fig. 2.a è riportato un esempio di stabilizzazione con colonne di calce e cemento effettuato a Ledsgård (Sweden). L'intervento è stato eseguito realizzando colonne aventi diametro di 60 cm e profondità di 10 m, disposte in modo da ottenere una copertura del volume di terreno trattato del 35% circa. La stabilizzazione ha ridotto di circa dieci volte la velocità di picco dei punti alla base del rilevato (fig. 2.c e 2.d), anche se ad una distanza di 7.5 m dalla sovrastruttura si è osservata una notevole diminuzione dell'efficacia dell'intervento nel range di frequenze 12÷25 Hz, intervallo in corrispondenza del quale ricadono le frequenze di risonanza di alcuni elementi strutturali degli edifici recettori (fig. 2.b).



**Fig. 2 – Stabilizzazione del terreno con colonne di calce e cemento (figura rielaborata da Marssarsch K. R., 2004)**

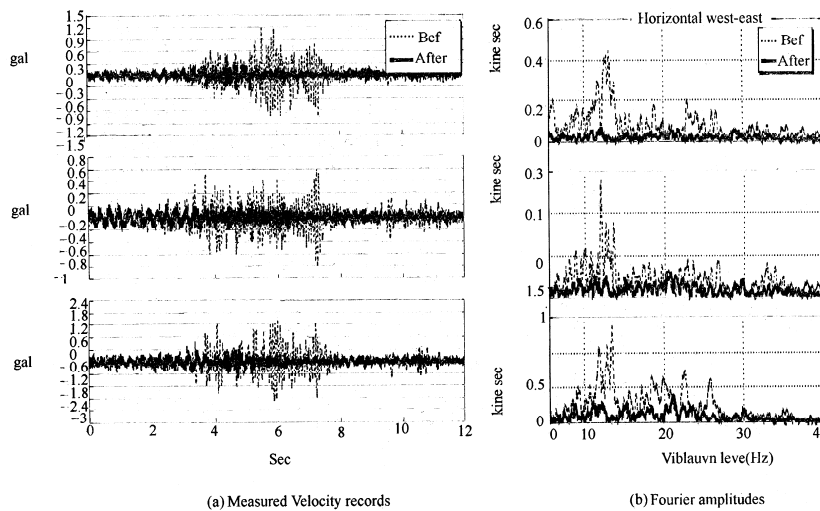
In pratica un incremento della rigidità del terreno sotto il rilevato, pur fornendo grandi benefici in termini di spostamenti dinamici della sovrastruttura, può risultare molto meno efficace nella riduzione delle vibrazioni che si propagano all'ambiente circostante se non opportunamente progettato.

Un intervento che ha dato ottimi risultati è stato eseguito in Giappone, nella Prefettura di Saitama (Takemiya H. et al., 2003): al fine di ridurre le vibrazioni prodotte da una strada pesantemente trafficata, per un tratto avente lunghezza di 200 m, a 9 m di profondità sotto il piano stradale, sono stati realizzati dei WIB con percentuale di ricoprimento in pianta del 40%, diametro delle colonne di 80 cm, e profondità di 15 m (fig. 3).



**Fig. 3 – Realizzazione di WIB in Giappone (Takemiya H. et al., 2003)**

I rilievi accelerometrici eseguiti prima e dopo la realizzazione dell'intervento hanno messo in evidenza che, su tutto il tratto stabilizzato, a 23 m dal ciglio stradale si ottiene una riduzione dei livelli delle accelerazioni verticali di circa 11 dB, mentre a 13 m dall'asse stradale i livelli delle accelerazioni orizzontali subiscono una riduzione di 8 dB. Inoltre, è opportuno evidenziare che prima dell'intervento le frequenze dominanti delle vibrazioni nel terreno ricadevano nell'intervallo 8÷16 Hz, banda di frequenza critica sia per il corpo umano che per le strutture edilizie. Dopo l'intervento, per frequenze comprese nel suddetto intervallo, si otteneva un'attenuazione di 40 dB (fig. 4).



**Fig. 4 – Realizzazione di WIB in Giappone. Misure di vibrazione prima (—) e dopo (····) la realizzazione dell'intervento (Takemiya H. et al., 2003)**

### 3.1.2 Introduzione di barriere d'onda tra sorgente e recettore.

Un'altra metodologia efficace per attenuare le vibrazioni, essenzialmente in campo ferroviario, consiste nell'introdurre barriere all'interno del terreno, posizionate tra la sorgente ed il recettore.

Le barriere hanno costi di realizzazione contenuti, lunga vita utile e possono essere concepite sia come parte dell'infrastruttura ferroviaria, e quindi progettate insieme alla linea, ovvero essere inserite, laddove questo tipo di intervento sia tecnicamente possibile, come opera di mitigazione successiva.

Generalmente si utilizzano due tipologie di barriere. Il primo tipo è costituito dalle barriere continue, le quali possono essere aperte (ossia lasciate vuote senza alcun riempimento), o riempite di limo, sabbia o calcestruzzo. Il secondo tipo è costituito dalle barriere discontinue, ottenute mediante la realizzazione di una serie di pali infissi nel terreno, ovvero da una successione di fori (Woods R. D., 1968; Kattis S. E. et al., 1999).

In generale le barriere continue sono utilizzate per schermare vibrazioni di alta frequenza; al contrario le barriere discontinue sono più efficaci per le basse frequenze; tuttavia, in entrambi i casi, le caratteristiche di progetto non sono differenti. (Qiu C. et al., 2004).

I primi studi sperimentali sull'efficacia delle trincee sono stati eseguiti da Barkan D. D. (1962). Egli mise in evidenza che nel caso di trincee continue aperte, nonché nel caso di trincee discontinue, l'efficacia della barriera aumenta sia con la profondità che con la lunghezza in pianta, risultando particolarmente congeniale allo scopo per frequenze di sollecitazione via via maggiori.

Woods R. D. (1968) ha mostrato l'influenza della distanza dalla sorgente e della profondità, nel caso di barriere continue. Egli evidenziò che l'isolamento attivo risulta più efficace nella schermatura dalle onde di volume (compressione e taglio), mentre per le onde di Rayleigh la tipologia di isolamento più opportuna è quella passiva. È stato, inoltre, mostrato che il rapporto tra la profondità della barriera e la lunghezza d'onda  $\lambda_r$  delle onde superficiali è il più importante parametro da cui dipende l'efficacia dell'opera.

Alcune ricerche sperimentali hanno evidenziato che le migliori prestazioni si ottengono per profondità della trincea pari ad una volta la lunghezza d'onda della frequenza dominante, mentre la larghezza della trincea risulta poco influente (Dolling H. J., 1970; Haupt W. A., 1981).

Più recentemente alcuni ricercatori hanno studiato l'efficacia delle barriere d'onda con l'ausilio di modelli FEM e BEM (Beskos D. E., 1986; Dasgupta B. et al., 1990; Al-Hussaini T. M. et al., 1991; Al-Hussaini T. M. et al., 1996; Klein R. et al., 1997). È il caso di segnalare i lavori di Yang G.-B. et al. (1997) e di Adam M. et al. (2005), i quali hanno valutato il grado di schermatura offerto da trincee aperte e riempite, particolarizzando lo studio al caso di sorgente ferroviaria.

Per quanto di nostra conoscenza non vi sono molti lavori che documentano l'efficacia di interventi realmente eseguiti. Un caso significativo è quello del *gas cushion method*, che costituisce una tipologia innovativa di barriere che offre un grado di isolamento paragonabile a quello di delle trincee aperte (Massarsch K. R., 2004). Il pannello costituente la barriera è ottenuto interponendo tra due strati esterni, realizzati in plastica-laminato d'alluminio, un materassino costituito da una serie di camere d'aria piene di gas. Una prima applicazione del dispositivo fu eseguita nel 1984 a Gnarp (Svezia) al fine di isolare un edificio residenziale dalle vibrazioni prodotte dal traffico ferroviario. In seguito all'installazione della barriera si ottenne una riduzione delle vibrazioni ai vari piani dell'edificio di oltre il 70 %.

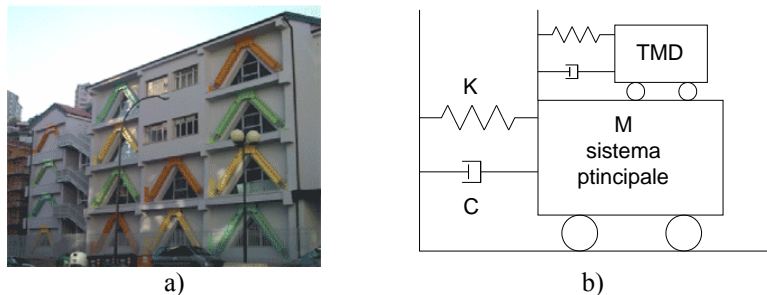


### 3.2 Interventi sul recettore

Le vibrazioni ferroviarie possono essere mitigate agendo direttamente anche sull'edificio recettore.

Una strategia di intervento può essere quella di far variare le frequenze di risonanza della struttura in funzione delle caratteristiche spettrali del disturbo vibrazionale. Tale obiettivo può essere raggiunto con due differenti modalità: una possibilità è quella di operare un irrigidimento della struttura, o di alcune parti di essa; l'altra è quella di far variare la massa dell'edificio con l'ausilio di "dissipatori inerziali a massa accordata" (*Tuned Mass Damper*).

L'irrigidimento strutturale è effettuato mediante l'introduzione di speciali dispositivi (fig. 5.a) i quali, oltre a modificare le caratteristiche di deformabilità e resistenza di alcune parti della struttura, dissipano energia vibrazionale riducendo, di conseguenza, l'entità delle vibrazioni sul recettore. E' opportuno precisare che tale tipologia d'intervento è generalmente utilizzata per l'adeguamento sismico di edifici esistenti ed, inoltre, non si ha notizia di interventi finalizzati alla mitigazione di vibrazioni generate da infrastrutture lineari di trasporto.

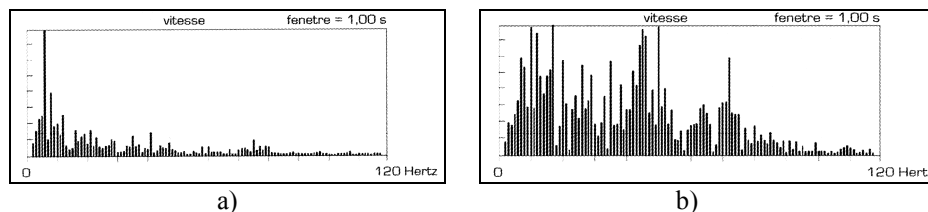


**Fig. 5 –a) Smorzatori sismici su edifici scolastici. b) Schema esemplificativo di Tuned Mass Damper**

Il *Tuned Mass Damper* (TMD) è, invece, costituito da una massa collegata alla struttura attraverso un sistema di rigidità e smorzatori. L'aggiunta del TMD cambia lo schema dinamico del sistema principale, aumentandone i gradi di libertà: con riferimento allo schema di fig. 5.b, la realizzazione del TMD fa sì che le vibrazioni di un sistema ad un grado di libertà possano essere ridotte a quelle di un sistema a due gradi di libertà dotato di maggiore smorzamento.

Un intervento di questo tipo è stato eseguito in Giappone al fine di ridurre gli impatti vibrazionali generati da un viadotto stradale su un edificio a sette piani. L'utilizzo del TMD ha permesso di ottenere una riduzione del 65% degli spostamenti orizzontali in corrispondenza dell'ultimo piano (Nagataki Y., 2003).

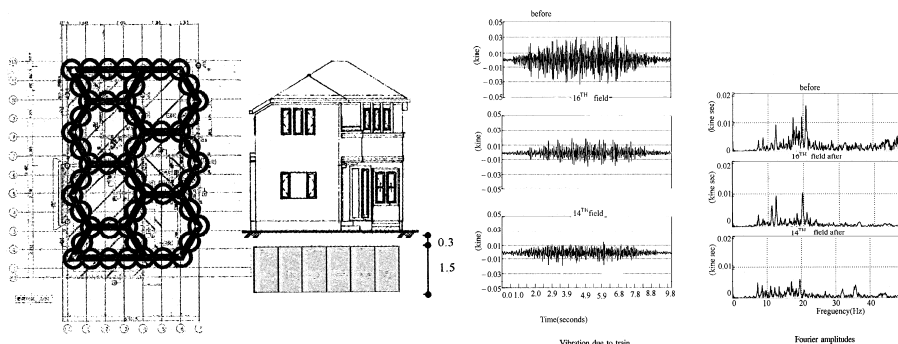
Un'altra tipologia di intervento che è possibile effettuare sul recettore è l'*isolamento alla base*. La tecnica consiste nell'isolare le fondazioni tramite l'interposizione di sistemi di supporto elastici (*isolatori*), i quali devono essere progettati in modo tale che la propria frequenza naturale sia sufficientemente più bassa delle frequenze dominanti della vibrazione da attenuare.



**Figura 6 – L’isolamento di un edificio dalle vibrazioni indotte da una vicina linea ferroviaria: a) sopra gli isolatori; b) sotto gli isolatori (Pipinato A. et al., 2006).**

In fig. 6 sono riportati gli spettri delle vibrazioni (misurate sopra e sotto gli isolatori) indotte da una vicina linea ferroviaria su un edificio con isolamento alla base: il sistema (frequenza naturale di 4Hz) risulta efficiente per frequenze superiori a 10 Hz (Pipinato A. et al., 2006).

Un’ultima categoria di intervento è quella che prevede la realizzazione di WIB sotto il piano di fondazione del recettore. Un intervento di questo tipo è stato realizzato in Giappone (fig 7): colonne aventi diametro di 80 cm e lunghezza di 1.5 m sono state realizzate a 0.3 m dal piano di fondazione dell’edificio. L’intervento ha prodotto una riduzione dei livelli di velocità nel terreno pari a 5.5 dB per la componente verticale, e di 8.5 dB per quella orizzontale (Takemiya H. et al., 2003).



**Figura 7 – Applicazione di WIB sotto il recettore (Takemiya H. et al., 2003)**

#### 4. CONCLUSIONI

Lo studio del fenomeno vibratorio generato dall’esercizio dei sistemi di trasporto, in particolare su ferro, rileva come gli interventi sul mezzo i propagazione possano risultare davvero risolutivi con costi relativamente contenuti.

Si avverte come questi interventi siano molto spesso posteriori all’entrata in servizio delle infrastrutture di trasporto, denunciando quindi, un indirizzo legato alla gestione delle emergenze: sarebbe auspicabile, pertanto, una visione del problema nitida ed organica, già in fase di progetto.

La ricerca di diversi studiosi già concorre in questa direzione, poiché si affinano e si definiscono modelli previsionali, più o meno sofisticati, dei fenomeni vibrazionali

(generazione e propagazione), in grado di rendere utilissime informazioni al progettista dell'opera.

Non si dimentichi, infatti, che, proprio per la natura complessa dei fenomeni e per l'eterogeneità degli elementi in gioco, l'efficacia di un intervento, soprattutto per quanto concerne le barriere, dovrebbe essere validata con modelli attendibili e codici di calcolo potenti, giacché non esiste una soluzione standard, non esistendo un problema standard. Anzi, talvolta, i provvedimenti presi in essere possono rivelarsi neutri o addirittura amplificativi rispetto alle vibrazioni che intendono ridurre.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Accattatis F., Coletti G., Corridori A., Malavasi G. (1991). Le vibrazioni dell'armamento ferroviario: considerazioni teoriche e verifiche sperimentali. *Ingegneria Ferroviaria*. Maggio: 285-303.
- Adam M., von Estorff O. (2005). Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches. *Computers & Structures* 83(2005): 11-24.
- Al-Hussaini T. M., Ahmad S. (1991). Design of Wave Barriers for Reduction Horizontal Ground Vibration. *Journal of Geotechnical Engineering* 117(4): 616-636.
- Al-Hussaini T. M., Ahmad S. (1996). Active Isolation of Machine Foundations by In-Filled Trench Barriers. *Journal of Geotechnical Engineering* 122(4): 288-294.
- Athanasopoulos G. A., Pelekis P. C., Anagnostopoulos G. A. (2000). Effect of soil stiffness in the attenuation of Rayleigh-wave motions from field measurement. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 19:277-288.
- Barkan D. D. (1962). *Dynamics of Bases and Foundation*. MacGraw-Hill Book Company: 374-406.
- Beskos D. E., Dasgupta B., Vardoulakis I. G. (1986). Vibration isolation using open or filled trenches. Part1: 2-D homogenous soil. *Computational Mechanics* 1(1986): 43-63.
- Ceravolo R., Masoero M. (1995). La valutazione dell'impatto ambientale da vibrazioni ferroviarie. *Ingegneria Ferroviaria*. Gennaio-Febbraio: 35-46.
- Chatterjee P., Degrande G., Jacobs S., Charlier J, Bouvet P., Brassens D. (2003). Experimental results of free field and structural vibrations due to underground railway traffic. Tenth International Congress on Sound and Vibration. 7-10 July. Stockholm, Sweden.
- Dasgupta B., Beskos D.E., Vardoulakis I. G. (1990). Vibration isolation using open or filled trenches. Part2: 3-D homogenous soil. *Computational Mechanics* 6(1990): 129-142.
- Dawn T. M., Stanworth C. G. (1976). Ground vibration from passing trains. *Journal of Sound and Vibration* 66(3): 355-362.
- 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.

- Di Liberto C. M., Di Mino G. (2006). I fenomeni vibrazionali generati dal transito dei vettori ferroviari: analisi FEM del comportamento meccanico del sistema sovrastruttura-terreno. Casi studio per configurazione in trincea. *Ingegneria Ferroviaria*, Gennaio: 53-62.
- Di Mino G. (2003). Le vibrazioni in campo ferroviario: analisi F.E.M. dell'interazione convoglio-sovrastruttura-terreno. XIII Convegno Nazionale SIIV. 30-31 ottobre. Padova, Italia.
- Di Mino G., Di Liberto C. M. (2007). A model of dynamic interaction between a train vehicle and a rail track. 4<sup>th</sup> International S.I.I.V. Congress. 12-14 September. Palermo, Italy.
- Dolling H. J. (1970). Die Abschirmung von Erschütterungen durch Bodenschlitze. *Die Bautechnik* 6: 193-204.
- Esveld C. (2001). *Modern Railway Track* (Second edition). MTR-Productions. Zaltbommel. The Netherlands.
- Fields J. M. (1979). Railway Noise and Vibration Annoyance in residential Areas. *Journal of Sound and Vibration* 66(3): 445-448.
- Gutowski T. G., Dym C. L. (1976). Propagation of ground vibration: a review. *Journal of Sound and Vibration* 49(2): 179-193.
- Haupt W. A. (1981). Model test on screening of surface wave. X<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm. Vol. 3: 215-222.
- Ju S.-H., Lin H.-T. (2004). Analysis of train-induced vibrations and vibration reduction schemes above and below critical Rayleigh speeds by finite element method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 24(2004): 993-1002.
- Kattis S. E., Polyzos D., Beskos D. E. (1999). Modelling of pile wave barriers by effective trenches and their screening effectiveness. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 18:1-10.
- Kim D. S., Lee J. S. (2000). Propagation and attenuation characteristics of various ground vibration. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 19:115-126.
- Klein R., Antes H., Le Houédec D. (1997). Efficient 3D modelling of vibration isolation by open trenches. *Computers & Structures* 64(1-4): 809-817.
- Knothe, K.L., Grassie, S. L. (1993). Modelling of railway track and vehicle/track interaction at high frequencies. *Vehicle system dynamics* 22 (1993): 209-262.
- Madshus C, Kaynia A. M. (2000). High-speed railway lines on soft ground: dynamic behaviour at critical train speed. *Journal of Sound and Vibration* 231(3): 698-701.
- 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.
- Miller G. F., Pursey H. (1954). The field and radiation impedance of mechanical radiators on the free surface of a semi-infinite isotropic solid. *Proc. R. Soc. London*, 233: 521-540.
- Nagataki Y. (2003). Propagation property of round vibrations and counter-measure methods for high technology building and equipment. *Environmental Vibration*. Chen & Takemiya (eds.). Hangzhou, China.

- Paolucci R., Maffei A., Scandella L., Stupazzini M., Tannini M. (2003). Numerical prediction of low-frequency ground vibration induced by high-speed trains at Ledsgaard, Sweden. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 23: 425-433.
- Pezzoli P. (2004). Le vibrazioni indotte da traffico su rotaia e tecniche di previsioni. *Ingegneria Ferroviaria*. Giugno: 521-545.
- Pipinato A., Pellegrino C., Modena C. (2006). Vibrazioni da traffico ferroviario nel contesto urbano di attraversamento: meccanismi di propagazione, effetti e metodi di mitigazione. *Strade & Autostrade* 6 (2006): 108-112.
- Pisani R. (2000). Origine, propagazione e modelli revisionali delle vibrazioni dei mezzi di trasporto. Convegno Nazionale Traffico e Ambiente. 21-25 febbraio. Trento, Italy: 421-455.
- Qiu C., Gao Y.-G., Yue Z. Q. (2004). A Discussion on the Failure of Barriers for Active Isolation in Near-field. 11<sup>th</sup> ICSDEE and 3<sup>rd</sup> ICEGE Proceedings. 7-9 January. Berkeley, USA: 918-923.
- Richart F. E., Woods R. D., Hall J. R. (1970). *Vibration of soils and foundations*. Prentice-Hall. Engewood Cliffs, New Jersey.
- Sheng X., Jones C. J. C., Thompson D. J. (2006). Prediction of ground vibration from trains using the wavenumber finite and boundary element methods. *Journal of Sound and Vibration* 293: 575-586.
- Takemiya H., Hashimoto M. & Shairaga A. (2003). Case studies of anti-vibration measure WIB by soil improvement techniques. *Environmental Vibration*. Chen & Takemiya (eds.). Hangzhou, China.
- Thompson D. J. (1997). Experimental analysis of wave propagation in railway tracks. *Journal of Sound and Vibration* 203(5): 867-888.
- Trio A. (2005). Proposte di modelli teorico-sperimentali per l'analisi dell'interazione dinamica e la valutazione degli effetti locali indotti per linee metropolitane e ferroviarie ad alta velocità. Tesi di Dottorato. Università di Catania.
- Woods R. D. (1968). Screening of surface Waves in Soils. *Journal of the soil mechanics foundation division*. ASCE 94(SM4): 951-979.
- Yang Y.-B., Hung H.-H. (1997). A parametric study of wave barrier for reduction of train-induced vibration. *International Journal for Numerical Method in Engineering* 40: 3729-3747.