



Vibrazioni generate dai treni AV sulla linea Torino-Milano e sistemi di mitigazione

High Speed Train Vibrations along the Turin-Milan Railway and mitigation systems

Dott. Ingg. Vitantonio ROMA^(), Giovanni ABATE^(**), Aldo MANCARELLA^(*),
Michele PANTALEO^(*), Paolo PEZZOLI^(***)*

SOMMARIO – Lo sviluppo recente delle linee ferroviarie ad alta velocità in diversi Paesi ma soprattutto in Europa, ha reso più evidenti il disturbo, e i danni ambientali causati dalle vibrazioni. Le vibrazioni prodotte dai treni sono il risultato dell'interazione dinamica SSI (Interazione Terreno-Struttura) tra il treno, il rilevato ferroviario e il terreno. In questo articolo è presentata l'esperienza acquisita nella progettazione della linea alta velocità tra Torino e Milano. Grazie ad un modello matematico è stato riportato il confronto tra i livelli vibrazionali previsti durante la fase di progetto e i livelli vibrazionali misurati dopo il completamento del primo lotto del collegamento ferroviario tra Torino e Novara. È inoltre presentato un nuovo sistema anti-vibrazioni, che è stato proposto lungo la linea ferroviaria Novara-Milano per mitigare il potenziale impatto vibrazionale causato dai treni. Le considerazioni esposte in questo articolo costituiscono una metodologia operativa per prevedere e mitigare l'impatto vibrazionale dei treni.

1. Introduzione

Negli ultimi tempi l'interesse verso l'impatto ambientale causato dalle vibrazioni ferroviarie da parte sia della comunità scientifica sia delle istituzioni governative è aumentato sensibilmente. Una delle principali ragioni consiste nello sviluppo di nuove linee ferroviarie ad alta velocità in tutto il mondo. In questo lavoro è riportata l'esperienza maturata nella previsione e nell'analisi delle vibrazioni generate dai treni AV sulla linea ferroviaria tra Torino e Milano.

2. Normative nazionali e internazionali

Ogni Paese adotta una propria normativa per

SUMMARY – The recent development of the high speed railways in several countries, especially in Europe, has given a more significant evidence of the disturb and the environmental damages caused by train vibrations. Vibrations produced by trains are the result of the dynamic interaction SSI (Soil Structure Interaction) among the train, the railway embankment and the soil. In this article the experience gained in the design of the high speed railway between Turin and Milan is presented. The comparison is reported between the vibration levels determined by means of a mathematical model during the design phase and the vibration levels measured after completion of the first lot between Turin and Novara. Also a new anti-vibration system is presented, that has been proposed along the high speed railway Novara-Milano to mitigate the environmental impact potentially caused by the train vibrations. The considerations exposed in this article may constitute a pragmatic guideline to predict and mitigate the environmental impact caused by train vibrations.

1. Introduction

In recent years the interest of both the scientific community and the governmental institutions towards the environmental impact caused by train vibrations has been increasing. A main reason for this interest consists of the development of the new high speed railways worldwide. In this work the experience gained in the prediction and analysis of the vibrations generated by trains of the high speed railway between Turin and Milan is reported. Also a new anti-vibration system is described, which has been proposed along the railway line between Novara and Milan.

^(*) Tecnimont (Maire Tecnimont Group) – Infrastructural Department.

^(**) ISPI (Istituto Superiore per le Infrastrutture presso il Politecnico di Torino).

^(***) INDAPRO S.r.l.

^(*) Tecnimont (Maire Tecnimont Group) – Infrastructural Department.

^(**) ISPI (Istituto Superiore per le Infrastrutture presso il Politecnico di Torino).

^(***) INDAPRO S.r.l.

regolamentare l'impatto ambientale causato dalle vibrazioni alle persone e agli edifici, in funzione della sorgente (traffico stradale, metropolitane, ferrovie, macchine vibranti). Le normative internazionali più comunemente usate sono le ISO e le DIN in Germania, le BST nel Regno Unito, le UNI in Italia, le ASTM negli USA e le SN in Svizzera. L'approccio generalmente seguito da tutte queste normative consiste nel distinguere tra disturbo alle persone e danneggiamento agli edifici. In funzione di:

- intensità e contenuto in frequenza e tipo di sorgente (impulsiva o continua) della vibrazione;
- tipo di edificio (residenziale, uffici, industriale, edificio sensibile);
- fascia oraria (di giorno o di notte);
- posizione all'interno dell'edificio (fondazioni, piano terra, ultimo piano);
- postura della persona;
- livello di danneggiamento dell'edificio.

Diversi limiti sono stabiliti per prevenire differenti livelli di impatto agli esseri umani (tabella 1) o agli edifici (tabella 2).

TABELLA 1 – TABLE 1

DISTURBO ALLE PERSONE – LIMITI MASSIMI AMMESSI PER L'ACCELERAZIONE PESATA IN FREQUENZA PER L'ASSE Z
DISTURB TO PEOPLE – MAXIMUM ALLOWED LIMITS FOR FREQUENCY WEIGHTED ACCELERATIONS FOR Z AXIS (UNI 9614)

Tipo di edifici <i>Types of buildings</i>	a_w [m/s ²]	L_w [dB]
Aree critiche <i>Critical areas</i>	$5.0 \cdot 10^{-3}$	74
Casa di notte <i>Houses (by night)</i>	$7.0 \cdot 10^{-3}$	77
Casa di giorno <i>Houses by day</i>	$10.0 \cdot 10^{-3}$	80
Uffici <i>Offices</i>	$20.0 \cdot 10^{-3}$	86
Fabbriche, edifici industriali <i>Farms</i>	$40.0 \cdot 10^{-3}$	92

A_w = accelerazione pesata in frequenza – *acceleration weighted in frequency*;

L_w = livello vibratorio associato ad a_w tramite l'equazione (6) – *vibration level associate with a_w means of equation (6)*.

3. Modello fisico-matematico

Da un punto di vista generale le vibrazioni sono generate da una sorgente e si propagano attraverso il terreno fino a raggiungere gli edifici ricettori. Nel caso in esame le vibrazioni sono prodotte dal treno, che è un tipo di sor-

2. International and national codes

At international level each country adopts their own code to rule the environmental impact caused by vibrations to persons and buildings, depending on the source (road traffic, subways, railways, vibrating machines). The most commonly used codes are ISO, DIN in Germany, British Standard Institution in UK, UNI in Italy, ASTM in US, SN in Switzerland. The usual approach followed by all these codes is to distinguish between disturb to persons and damage to buildings. Depending on:

- the intensity and the frequency content and the nature (impulsive or continuous) of the vibration;
- the type of buildings (residential, offices, industrial, critical buildings);
- the time (by day or by night);
- the position inside the building (foundation, ground floor, top floor);
- the posing of the person;
- the level of damage to the buildings.

Several limits are set to prevent different levels of impact to human beings (table 1) or to buildings (table 2).

TABELLA 2 – TABLE 2

DANNEGGIAMENTO AGLI EDIFICI – VELOCITÀ MASSIME AMMESSE – DAMAGE TO BUILDINGS MAXIMUM ALLOWED VELOCITIES (UNI 9916)

Classe <i>Class</i>	Velocità vibrazione (mm/s) <i>Vibration velocity (mm/s)</i>			
	In fondazione <i>At the foundation</i>			Ultimo piano <i>At the top floor</i>
	<10 Hz	10÷50 Hz	50÷100 Hz	Altre frequenze <i>Other frequencies</i>
1	20	20÷40	40÷50	40
2	5	5÷15	15÷20	15
3	3	3÷8	8÷10	8

3. Physical-mathematical model

By a general point of view the vibrations are generated by a source and travel through the ground to reach the receiving buildings. In the case under analysis the vibrations are produced by the train, which is a source comprised between a point and an infinite line source.

There are at least three sub-systems which form the whole physical system ([18]):

- the train, which is the source of the vibrations;
- the ground, included the railway embankment;
- the receiving building.

gente compreso tra una sorgente puntuale e una sorgente lineare infinitamente estesa.

Sussistono almeno tre sotto-sistemi che formano l'intero sistema fisico ([18]):

- il treno, che è la sorgente delle vibrazioni;
- il terreno, inclusi il rilevato ferroviario e l'armamento;
- l'edificio ricettore delle vibrazioni.

Le vibrazioni sono generate al contatto tra le ruote e le rotaie e da queste successivamente sono trasmesse al terreno tramite la sovrastruttura ferroviaria (binario e massicciata). La propagazione delle vibrazioni avviene tramite diversi tipi di onde: onde di compressione, onde di taglio e onde di Rayleigh⁽¹⁾, che si propagano attraverso il terreno verso gli edifici ricettori con fronti d'onda sferici e cilindrici.

Il terreno si comporta come un filtro, che generalmente attenua l'intensità delle componenti vibrazionali a tutte le frequenze, tranne che alle proprie frequenze naturali di risonanza, dove amplifica l'ampiezza delle vibrazioni stesse. Una volta che le vibrazioni hanno raggiunto le fondazioni dell'edificio, il campo di moto si trasmette dal terreno alla struttura dell'edificio, modificando la loro ampiezza ed il loro contenuto in frequenza. Alla stessa maniera del terreno anche la struttura dell'edificio potrebbe amplificare o attenuare il livello vibratorio, in funzione del tipo di fondazione (pali, fondazioni superficiali), del tipo di materiale di costruzione (calcestruzzo, muratura, legno, acciaio, vetro) dell'edificio, del numero di piani e della geometria della struttura dell'edificio ([34], [35]).

Al fine di prevedere il livello vibratorio causato da un treno all'interno di un edificio è possibile ricorrere a modelli matematici e numerici più o meno complessi. Negli ultimi anni sempre più sono stati impiegati software numerici, basati su F.E.M. (Finite Elements Method) e F.D. (Finite Differences) (ABAQUS, ADINA, PLAXIS, etc.).

Nei decenni precedenti si ricorreva solitamente ad un approccio più analitico, anche perché i software numerici di oggi non erano disponibili. I vantaggi dei metodi analitici erano la semplicità del modello e quindi una più profonda comprensione dei fattori che influenzano il fenomeno fisico. Era inoltre più semplice calibrare il modello sulla base delle misure sperimentali. Al contrario, gli svantaggi di questi modelli semplificati, erano l'impossibilità di considerare geometrie complesse oppure tutti gli scenari possibili. Nonostante i vantaggi in termini di complessità del modello, gli attuali software presentano instabilità numeriche, cioè la convergenza a soluzioni stabi-

The vibrations are generated at the contact between the train wheels and the tracks, then they are transmitted to the ground through the sleepers. Different types of waves originate: compressional, shear and Rayleigh waves⁽¹⁾, which propagate through the ground towards the receiving buildings by spherical-cylindrical wave fronts. The ground behaves like a filter, which generally attenuates the wave motion intensity, except at its natural frequencies, where amplifies the vibration amplitude. Once the vibrations have reached the building foundations, the wave motion passes from the ground to the building structure, modifying its magnitude and frequency content. The building structure may amplify or damp the vibration level as the ground does, depending on the type of foundation (piles, shallow), on the type of construction material (concrete, masonry, wood, steel, glass) of the buildings, on the number of floors, on the geometry of the building structure ([34], [35]).

In order to predict the vibration level caused by a train inside a building nearby, more or less complicate mathematical-numerical models can be used. In literature over the years the methods used for prediction have changed. In very recent years more and more numerical codes have been used, based on F.E.M. (Finite Elements Method) and F.D. (Finite Differences) implemented by commercial softwares (ABAQUS, ADINA, PLAXIS, etc.). In previous decades a more analytical approach was used, since the nowadays softwares were not available. The advantages of the analytical methods were a simplified model and hence a deeper comprehension of the factors, which influence the physical phenomenon. It was also simpler to calibrate the model on the basis of experimental measurements. On the contrary the drawbacks of such simplified models were the impossibility of considering either complex geometries or all the possible scenarios. Nevertheless the current softwares suffer numerical instability, i.e. convergence to a stable solution is not always guaranteed, it is difficult to calibrate the model so that it can be reliable for boundary conditions, which are different from those that have been experimentally measured on field.

3.1. Analytical model

In this article a simplified model is proposed, which has been used to predict the vibrations impact on buildings nearby the high speed railway between Turin and Milan. A similar model has been proposed by ([12]).

⁽¹⁾ Le onde di Rayleigh furono previste in via teorica da Lord Rayleigh nel 1885 e sono una combinazione delle onde S e delle onde P. Esse si propagano sulla superficie dei solidi in una porzione compresa in circa 1,5 volte la lunghezza d'onda λ . In genere durante i terremoti si manifestano sulla superficie terrestre a partire dall'epicentro oppure è possibile generarle energizzando il solido in un punto della superficie.

⁽¹⁾ Rayleigh waves were theoretically predicted by Lord Rayleigh in 1885. These waves are the result of the combination of the P and S waves. They travel on the free surface of a solid, within a belt of about 1,5 times the wavelength λ . Usually after an earthquake Rayleigh waves appear from the epicenter on the free surface of the Earth; otherwise they can be generated by hitting on a point on the free surface of the solid.

li non è sempre garantita e risulta difficoltoso calibrare il modello in modo che sia affidabile per condizioni al contorno che siano diverse da quelle in corrispondenza delle quali sono state effettuate le misure in campo. Ad esempio la scelta della dimensione degli elementi della mesh, della estensione dell'intero modello, dello smorzamento del terreno, del numero di punti da energizzare dipendono dalle caratteristiche dinamiche e dalla velocità del treno.

3.1. Modello analitico

In questo articolo è proposto un modello semplificato, che è stato utilizzato per prevedere l'impatto vibrazionale sugli edifici in prossimità della linea ferroviaria AV tra Torino e Milano. Un modello concettualmente simile è stato proposto da ([12]).

$$L(f, d) = L_0(f) + A_1 + A_2(f, d) + A_3 + A_4 + A_5(f) + A_6 + A_7(f) \quad (1)$$

f = frequenza;

d = distanza dai binari.

Tutti i termini che compaiono nella formula (1) sono espressi in dB:

- $L_0(f)$: spettro dell'accelerazione del treno;
- A_1 : amplificazione di lungo termine dovuta al deterioramento delle superfici di contatto tra ruote del treno e binari; è un contributo di segno positivo;
- $A_2(f, d)$: funzione di trasferimento del terreno; considera l'attenuazione della vibrazione attraverso il terreno; dipende dalla frequenza e dalla distanza; è un contributo di segno negativo;
- A_3 : funzione di trasferimento del sistema terreno-fondazione; considera la trasmissione della vibrazione dal terreno alla fondazione dell'edificio; è un contributo di segno negativo;
- A_4 : funzione di trasferimento all'interno dell'edificio; considera l'attenuazione nella propagazione della vibrazione all'interno della struttura; è un contributo di segno negativo;
- $A_5(f)$: amplificazione della vibrazione dovuta alle frequenze naturali del piano dell'edificio (è stato considerato 5 dB a 20 Hz per edifici in calcestruzzo), dipende dalla frequenza; è un contributo di segno positivo;
- A_6 : termine che considera la velocità reale del treno rispetto alla massima velocità ammessa sulla linea ferroviaria; è un contributo di segno positivo;
- A_7 : effetti di eventuali sistemi di mitigazione, dipende dalla frequenza. In generale può essere un contributo di segno positivo o negativo in funzione del tipo di mitigazione e della frequenza. Nel dispositivo proposto in questo articolo è un contributo sempre negativo.

$$L(f, d) = L_0(f) + A_1 + A_2(f, d) + A_3 + A_4 + A_5(f) + A_6 + A_7(f) \quad (1)$$

where:

f = frequency;

d = distance from the rails.

All the terms of the equation (1) are expressed in dB.

- $L_0(f)$: acceleration spectrum of the train;
- A_1 : long time amplification due to the deterioration of the contact between the train wheels and the rails;
- $A_2(f, d)$: transfer function of the ground; considers the attenuation of the vibration travelling through the ground, depends on frequency and distance;
- A_3 : transfer function of the ground-foundation system; considers the transmission of the vibration from the ground to the building foundation;
- A_4 : transfer function inside the building; considers the attenuation caused by propagation inside the building structure;
- $A_5(f)$: amplification of the vibration due to natural frequencies of the floor of the building (it has been considered 5 dB at 20 Hz for concrete buildings), depends on frequency;
- A_6 : modification that considers the real speed of the train with respect to the maximum speed allowed;
- A_7 : effects of any mitigation systems, depends on frequency.

3.2. Train dynamic characterization

The operation plan of the high speed line between Turin and Milan establishes the trains to be utilized as it is reported in table 3. The acceleration spectrum (fig. 1) of the trains reported in table 3, i.e. $L_0(f)$ in equation (1), has been determined on the basis of an experimental campaign of measurements made by Italferr along the Florence-Rome line ([1]).

TABELLA 3 – TABLE 3

TRENI E VELOCITÀ SULLA LINEA AV TRA TORINO E MILANO
TRAINS AND VELOCITIES ON THE HIGH SPEED RAILWAY
BETWEEN TURIN AND MILAN

Treno Train	Massima velocità di esercizio Exercise Max Speed esercizio (km/h)
ETR 460	250
ETR 500	300
ETR 600	250
Intercity (I.C.)	220
Treni merci Freight and good (E 402)	120

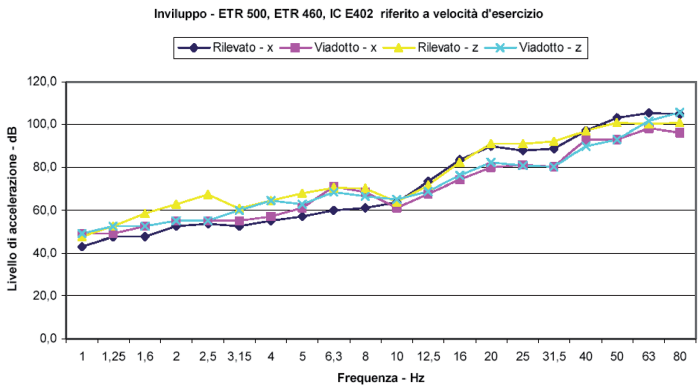


Fig. 1 - Spettro dell'accelerazione (involuppo dei massimi, v. nota 2) dei treni ETR 460, ETR 500, IC, E 402 per le componenti orizzontale (x) e verticale (z), per passaggi sopra rilevati (curve nera e gialla) e su viadotto (curve viola e turchese). Acceleration Spectrum (envelope of the maxima, see note 5) of the trains ETR 460, ETR 500, IC, E 402 for the horizontal (x) and vertical (z) components, for passages over embankment (black and yellow lines) and viaduct (violet and turquoise lines).

3.2. Caratterizzazione dinamica del treno

Il modello di esercizio della linea AV tra Torino e Milano definisce la tipologia del materiale mobile che circolerà sulla linea AV così come riportato nella tabella 3. Lo spettro di accelerazione (fig. 1) dei treni riportati in tabella 3, cioè il termine $Lo(f)$ nell'equazione (1), è stato determinato sulla base di una campagna di misure sperimentali eseguita da Italferr sulla linea Firenze-Roma ([1]).

3.3. Deterioramento del contatto ruote-rotaie

È stato sperimentalmente dimostrato che il contatto tra le ruote del treno e le rotaie si deteriora nel tempo. In tabella 4 sono riportati diversi livelli di amplificazione, il termine A_1 nella equazione (1), che sono correlati a diversi livelli di deterioramento del contatto ([30]).

3.4. Funzione di trasferimento del terreno

Durante la propagazione nel terreno il campo di moto generalmente subisce un'attenuazione, espressa dal termine A_2 nell'equazione (1), in funzione della frequenza e del-

3.3. Deterioration of the contact between train wheels and rails

There is experimental evidence that the contact between train wheels and rails deteriorates during exercise with time, due to consumption.

In table 4 different levels of amplification are reported, term A_1 in equation (1), which are correlated to different levels of deterioration of the contact ([30]).

3.4. Transfer function of the ground

During propagation through the ground the wave motion is generally attenuated, term A_2 in equation (1), depending on frequency and distance from the rails. Usually it has been observed that ([15]):

TABELLA 4 – TABLE 4

AMPLIFICAZIONE NEL TEMPO CAUSATA DA DIVERSI LIVELLI DI DETERIORAMENTO DEL CONTATTO TRA RUOTE DEL TRENO E BINARI – AMPLIFICATION WITH TIME CAUSED BY DIFFERENT LEVELS OF DETERIORATION OF THE CONTACT BETWEEN TRAIN WHEELS AND RAILS

Descrizione del deterioramento <i>Deterioration description</i>	Livello di deterioramento <i>Deterioration level</i>	Amplificazione <i>Amplification (dB)</i>
Binari e ruote del treno corrugati <i>Pleated rails and train wheels</i>	I	3-6
Ruote appiattite <i>Wheels flattening</i>	II	6-10
Ruote appiattite e corrugate e binari corrugati <i>Wheels flattening and pleated rails and train wheels</i>	III	10-20

- low frequencies components are less damped than high frequencies components;
- softer grounds attenuate more than stiffer grounds.

(2) Per i treni ETR 500, ETR 460, IC E402 sono state eseguite le misure in corrispondenza di numerosi passaggi avvenuti a diverse velocità. Per ogni tipo di treno e per ogni passaggio, distinguendo tra passaggio in rilevato e passaggio in viadotto, è stato calcolato lo spettro dell'accelerazione per le due componenti orizzontale (x) e verticale (z). Sovrapponendo tutti gli spettri misurati per ogni tipo di treno relativi a ciascuna componente di moto (x e z), è stato determinato l'involuppo degli spettri, considerando i massimi valori ad ogni frequenza.

(2) Numerous measurements have been made for the trains ETR 500, ETR 460, IC E402 at different speeds. The acceleration spectrum of the two components of the motion (horizontal (x) and vertical (z)) has been calculated for each type of train and for each measurement, distinguishing between passage on embankment and passage on viaduct. By considering the maximum value at each frequency the envelope of the spectra has been determined for each type of train and for both the components of the motion (x and z).

la distanza dai binari. Qualitativamente è stato osservato che ([15]):

- le componenti del moto a bassa frequenza sono meno smorzate delle componenti ad alta frequenza;
- terreni più soffici attenuano più dei terreni rigidi.

In fig. 2 è riportata una legge di attenuazione tipo, che è stata misurata in un sito lungo la ferrovia Torino-Milano tramite il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) ([21], [22], [36]).

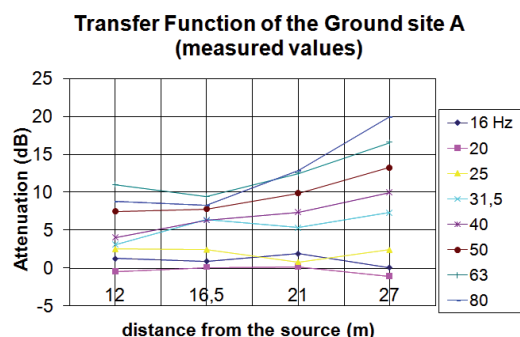


Fig. 2 - Attenuazione delle vibrazioni durante la propagazione nel terreno. *Attenuation of vibrations during propagation through the ground.*

3.5. Funzioni di trasferimento terreno-fondazione-struttura e fenomeni di risonanza

Durante la campagna sperimentale eseguita presso due siti è stata determinata una legge sperimentale, che correla il campo di moto sulla superficie libera del terreno esterno dell'edificio con il campo di moto al piano interrato dell'edificio, al livello delle fondazioni.

La legge empirica assume la seguente espressione:

$$A_3(f) = c_1 \cdot f + c_2 \quad (2)$$

- f = frequenza;
- $c_1 = 0,095$ dB/Hz;
- $c_2 = 2,527$ dB.

Una correlazione simile è stata determinata per la trasmissione delle vibrazioni attraverso la struttura dell'edificio. Il risultato è stato formalizzato tramite la seguente equazione:

$$A_4(f) = (n-1) \cdot (c_3 \cdot f + c_4) \quad (3)$$

- f = frequenza;
- n = numero di piani;
- $c_3 = 0,049$ dB/Hz;
- $c_4 = -1,158$ dB.

In fig. 2 a typical attenuation law is reported, as it has been experimentally measured at a site along the railway TO-MI by means of the MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) method ([21], [22], [36]).

3.5. Transfer functions of the ground-foundations-system, inside the building structure and resonance phenomena

During an experimental campaign executed at 2 sites it has been determined an empirical law, which correlates the wave motion on the free ground surface outside the building with the wave motion at the underground floor, near the base foundation. The empirical law shows the following form:

$$A_3(f) = c_1 \cdot f + c_2 \quad (2)$$

where:

- f = frequency;
- $c_1 = 0.095$ dB/Hz;
- $c_2 = 2.527$ dB.

A similar correlation has been investigated for the transmission of the vibrations through the building structure. The result has been formalized by means of the following equation:

$$A_4(f) = (n-1) \cdot (c_3 \cdot f + c_4) \quad (3)$$

where:

- f = frequency;
- n = number of floors;
- $c_3 = 0.049$ dB/Hz;
- $c_4 = -1.158$ dB.

For the resonance phenomena inside the building due to the natural frequencies of the floor it has been adopted an amplification of 5dB at about 20Hz for concrete structures.

$$A_5(f) = c_5(f) \quad (4)$$

where:

- f = frequency;
- $c_5 = 5$ dB only at 20Hz.

The value of the coefficients varies with the type of building.

3.6. Correction for real train speed

In order to consider the maximum allowed velocity instead of the measured train speed, the following relation has been used:

$$A_6(f) = 20 \log \left(\frac{V_{\max}}{V_{\text{misurata}}} \right) \quad (5)$$

Per considerare i fenomeni di risonanza all'interno dell'edificio dovuti alle frequenze naturali del singolo piano è stata adottata un'amplificazione di 5dB a circa 20Hz per strutture in calcestruzzo.

$$A_5(f) = c_5(f) \quad (4)$$

- f = frequenza;
- $c_5 = 0$ per frequenze diverse da 20Hz;
- $c_5 = 5\text{dB}$ solo a 20Hz.

I valori dei coefficienti variano per diverse tipologie di ricettore.

3.6. Correzione per la velocità reale del treno

Per tener conto della massima velocità ammessa sulla linea e quindi potenzialmente raggiungibile dal treno invece che la velocità effettivamente misurata, che può quindi essere inferiore a quella massima ammessa è stata adottata la seguente relazione:

$$A_6(f) = 20 \log \left(\frac{V_{\max}}{V_{\text{misurata}}} \right) \quad (5)$$

dove:

- V_{\max} = massima velocità ammessa del treno;
- V_{misurata} = velocità del treno effettivamente misurata durante la caratterizzazione della sorgente treno.

3.7. Effetti del sistema anti-vibrazioni

Se è presente un sistema di mitigazione dell'impatto da vibrazioni, allora gli effetti di attenuazione di tale sistema possono essere considerati introducendo il termine A_7 nell'equazione (1). Il termine A_7 dipende dal tipo di sistema di mitigazione adoperato. Ad esempio nel caso di materassini antivibranti può ridurre o anche amplificare il livello vibrazionale in funzione della frequenza di eccitazione. Nel caso del dispositivo proposto nel presente articolo il contributo è sempre negativo (riduce il livello vibrazionario) al di sopra della frequenza di filtro della barriera e nullo (né riduce, né amplifica il livello vibrazionario) per frequenze inferiori.

4. Misure Post-Operam

Successivamente al completamento della tratta di ferrovia AV Torino-Novara, una campagna di misure di vibrazioni è stata eseguita in diversi siti (tabella 5) prossimi alla linea ferroviaria. Le misure risultano in buon accordo con i livelli previsti utilizzando il modello matematico precedentemente descritto, con un valore assoluto dell'errore relativo medio (media aritmetica dei valori assoluti degli errori relativi) su tutti i siti riportati in tabella 5 pari al 9%. In tabella 5 sono riportati i livelli vibrazionali misurati e previsti in corrispondenza del piano più alto degli edifici considerati. Come termine di confronto è stato

where:

- V_{\max} = maximum allowed train speed;
- V_{measured} = train speed measured during source characterization.

3.7. Effects of the anti-vibration system

If a system for mitigation of the impact of the vibrations is present, then the attenuating effects of such a system can be considered by means of the term A_7 in equation (1). The term A_7 depends on the type of mitigation system.

4. Post-Operam measurements

After completion of the railway lot between Turin and Novara, a city located between Turin and Milan, a series of vibrations measurement at several sites has been executed. The measurements are in good agreement with the levels predicted by means of the previously described mathematical model, with an absolute value of the relative error averaged over all the considered sites equal to 9%. In table 5 the measured and the predicted vibrations levels at the top floor of the buildings are reported. As term of comparison the level L_w has been adopted, where L_w depends on the effective acceleration a_w weighted in frequency⁽³⁾:

$$L_w = 20 \log \left(\frac{a_w}{10^{-6} \text{ m/s}^2} \right) \quad (6)$$

– L_w expressed in dB.

In figg. 4 and 5 an example is reported of the measured vibrations on the free surface of the ground at the base of the railway embankment.

The Fourier transform of the vibrations shows that the main energy content of the train vibrations is around 20 Hz.

5. Anti-vibration system

For the mitigation of the train vibrations along the Turin-Milan railway a new Anti-vibration System ([31]) has been proposed. It consists of a special barrier immersed into the ground, parallel to the railway, located at the foot of the railway embankment. The mitigation principle used by the barrier is creating an air inter-space inside the barrier, so that the vibrations are cut off. In fact

⁽³⁾ The effects produced by vibrations on the human beings depend on the frequency, hence proper filters must be applied to the acceleration value at different frequencies. The final result is to uniform all the components of the acceleration in terms of perception and disturb.

TABELLA 5 – TABLE 5

CONFRONTO TRA LIVELLI VIBRAZIONALI PREVISTI E MISURATI IN 8 SITI LUNGO LA TRATTA AV TRA TORINO E NOVARA
(CONDIZIONI FREE-FIELD) – COMPARISON AMONG PREDICTED AND MEASURED VIBRATIONS LEVELS AT 8 SITES ALONG
THE HIGH SPEED RAILWAY LOT BETWEEN TURIN AND NOVARA.

numero ricettore building number	Livello previsto asse Z Predicted Level Axe Z	Misure Measurements	Vmin treno Vmin train	Vmedia treno Vaverage train	Vmax treno Vmax train	Livello Max misurato Max measured Level	accelerazione misurata measured acceleration aw (mm/s ²)	errore relativo relative error	valore assoluto (errore relativo) ABS (relative error)
	(dB)		(km/h)	(km/h)	(km/h)	(dB)		(%)	(%)
1	71	1				65	1,8		
		2				62	1,3		
		3				61	1,1		
		4	131	152	186	63	1,4		
		Average media				63	1,4	13	13
2	69	1				64	1,6		
		2				61	1,1		
		3				66	2,0		
		4	121	133	169	68	2,5		
		Average media				65	1,7	6	6
3	74	1				75	5,6		
		2				75	5,6		
		3				77	7,1		
		4	261	285	314	70	3,2		
		Average media				74	5,2	-1	1
4	62	1				67	2,2		
		2				69	2,8		
		3				70	3,2		
		4	239	280	314	68	2,5		
		Average media				69	2,7	-10	10
5	63	1				66	2,0		
		2				72	4,0		
		3				67	2,2		
		4	203	265	305	70	3,2		
		Average media				69	2,7	-9	9
6	67	1				74	5,0		
		2				75	5,6		
		3				77	7,1		
		4	189	230	250	77	7,1		
		Average media				76	6,1	-11	11
7	70	1				66	2,0		
		2				67	2,2		
		3				67	2,2		
		4	255	274	297	66	2,0		
		Average media				67	2,1	5	5
8	64	1				76	6,3		
		2				76	6,3		
		3				76	6,3		
		4	244	257	289	75	5,6		
		Average media				76	6,1	-15	15

adottato il livello L_w che dipende dall'accelerazione effettiva a_w pesata in frequenza⁽³⁾:

⁽³⁾ Dato che gli effetti prodotti dalle vibrazioni sono differenti in funzione della frequenza delle accelerazioni, devono essere impiegati dei filtri che ponderano le accelerazioni a seconda del loro effetto sul soggetto esposto. Tali filtri rendono tutte le componenti dello spettro equivalenti in termini di percezione e quindi di disturbo. Per questo motivo il livello L_w e l'accelerazione a_w sono pesati o ponderati in frequenza.

the main contribution to surface vibrations is provided by Rayleigh waves, which are a combination of both shear and compressional waves; since shear waves cannot propagate through air, as a result surface vibrations are cut off by the special barrier. In this regard this anti-vibration system behaves exactly as an open trench. In fig. 3 the transmitted energy through a plane, infinite interface is plotted, as a function of the shear wave velocities of the two media separated by the interface.

It can be observed that when the receiving medium is

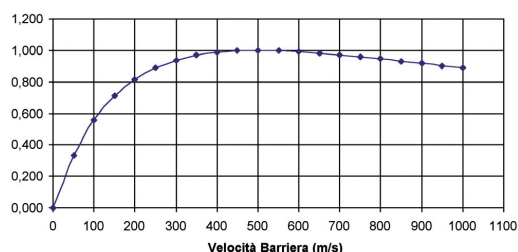


Fig. 3 - Trasmissione di energia (rapporto adimensionale tra energia trasmessa e energia incidente) all'interfaccia piana infinita tra terreno e barriera (sistema anti-vibrazione). *Energy transmission (ratio between transmitted energy and incident energy) at the infinite plane interface between the ground and the barrier (antivibration system).*

$$L_w = 20 \log \left(\frac{a_w}{10^{-6} \text{ m/s}^2} \right) \quad (6)$$

– L_w espresso in dB.

Nelle figg. 4 e 5 è riportato un esempio delle vibrazioni misurate sulla superficie libera del terreno ai piedi del rilevato ferroviario lungo la tratta compresa tra Torino e Novara.

La trasformata di Fourier delle vibrazioni prodotte dal treno AV mostra che il maggior contributo di energia è localizzato attorno a 20Hz.

5. Sistema anti-vibrazioni

Al fine di mitigare le vibrazioni prodotte dai treni AV lungo la linea ferroviaria Torino-Milano è stato proposto un nuovo sistema brevettato con la denominazione Anti-vibration System ([31]). Il sistema consiste in una speciale barriera immersa nel terreno, parallelamente alla linea ferroviaria, localizzata ai piedi del rilevato ferroviario. Il principio di mitigazione di cui si avvale la barriera è la creazione di un'intercapedine d'aria al suo interno, in modo che le vibrazioni siano riflesse. Infatti il contributo più significativo alle vibrazioni di superficie è fornito dalle onde di Rayleigh, che sono una combinazione sia delle onde di compressione sia di taglio; poiché le onde di taglio non possono propagarsi attraverso l'aria, ne consegue che anche le onde di Rayleigh e quindi anche le vibrazioni superficiali sono abbattute dalla speciale barriera. A tal riguardo il Sistema anti-vibrazioni assume un comportamento del tutto analogo ad una trincea aperta.

Nelle figg. 14 e 15 sono riportate due varianti della barriera. In fig. 14 la barriera è realizzata tramite setti rettilinei in cemento plastico, all'interno dei quali sono inseriti dei pannelli cavi in PVC o altro materiale, opportunamente sigillati per garantirne l'impermeabilità all'acqua. In fig. 15 il sistema antivibrazioni è realizzato tramite tubi cavi opportunamente impermeabilizzati.

A titolo esplicativo in fig. 3 è raffigurata una curva che esprime il rapporto adimensionale tra la quota di energia trasmessa e la quota di energia incidente attraverso una su-

perficie ($V_s=0$), as it is the case for the new anti-vibration system, then the incident energy is totally reflected back at the interface and there is not energy transmission. In fig. 6 a vertical section of the railway embankment with the new anti-vibration system on the right side is shown. The depth to be reached by the barrier depends upon several parameters: wavelengths of the vibration, Rayleigh dispersion curve of the ground, vibration limit level imposed by the code, intensity of the incoming vibrations. The barrier behaves like a low-pass-filter, since it stops vibrations that are characterized by frequencies higher than the cut-off frequency of the barrier⁽⁴⁾. For active barriers near the source of the vibrations the cut-off frequency of the barrier can be correlated to the required depth z of the barrier, to the wavelength λ and to the apparent phase velocity⁽⁵⁾ of Rayleigh waves V_R by the following simplified equation ([32], [33]):

$$z = 0,6 \cdot \lambda = 0,6 \frac{V_R}{f_{\text{filtro}}} \quad (7)$$

Since the main energy content of the train measurements has been observed around the frequency of 20 Hz (see figg. 4 and 5), as an example if a phase velocity $V_R = 400 \text{ m/s}$ is measured in the ground, then the required depth is about 12m.

The attenuation provided by the new anti-vibration system can be considered by means of the term A_7 in equation (1) as:

$$A_7(f) = -20 \log \left(\frac{I_2}{I_1} \right) \leq -20 \log(0,25) = -12 \text{ dB} \quad (8)$$

at frequencies higher than the cut-off frequency determined by means of the experimental dispersion curve of Rayleigh waves.

Where:

– I_1 = free field vibration amplitude;

– I_2 = vibration amplitude after mitigation.

According to the experimental work conducted by Woods ([32], [33]) a barrier or a trench can be considered effective if the vibration amplitude averaged among fre-

⁽⁴⁾ When a Rayleigh wave of given frequency f and wavelength λ encounters a barrier, the wave is reflected back if its wavelength is lower than $z/0.6$, z is the depth reached by the barrier. This condition can be expressed in terms of frequency, i.e. the wave is reflected back when its frequency is higher than the cut-off frequency that can be calculated by means of equation (7). When dealing with a vibration made of wave train, with waves of different frequencies and wavelengths, then all the waves with a frequency higher than the cut-off frequency are reflected back, all the other waves with a frequency lower than the cut-off frequency are transmitted over the barrier. In analogy with the electromagnetic field the barrier behaves as a filter that allows for the passage of the frequencies lower than the cut-off frequency.

⁽⁵⁾ The apparent phase velocity of Rayleigh waves is the phase velocity that can be measured in field. It is the result of the superposition of the several modes of Rayleigh at different frequencies.

perficie piana infinita in funzione della velocità delle onde di taglio del mezzo ricevente. Il mezzo di provenienza dell'onda incidente, ad esempio il terreno, ha una velocità delle onde di taglio $V_s=500\text{m/s}$; la velocità delle onde di taglio del mezzo ricevente, ad esempio barriera, è variabile. Si può osservare che nel caso il mezzo ricevente abbia la stessa velocità del mezzo di provenienza dell'onda ($V_s=500\text{m/s}$) la trasmissione di energia è totale, infatti il rapporto tra energia trasmessa ed energia incidente è pari ad 1. Quando invece il mezzo ricevente sia costituito da aria ($V_s=0$), come è il caso realizzato dal nuovo sistema anti-vibrazioni, allora l'energia incidente è totalmente riflessa indietro nel mezzo di provenienza in corrispondenza dell'interfaccia e non vi è alcuna trasmissione di energia. In fig. 6 è mostrata una sezione verticale del rilevato ferroviario insieme con il nuovo sistema anti-vibrazioni posto sul lato destro del rilevato.

La profondità da raggiungere con la barriera dipende da diversi parametri: lunghezze d'onda delle vibrazioni, curva di dispersione delle onde di Rayleigh del terreno, limite vibrazionale ammesso dalle norme, intensità delle vibrazioni. La barriera si comporta come un filtro passa basso, perché elimina le vibrazioni caratterizzate da una frequenza maggiore della frequenza di filtro della barriera⁽⁴⁾. Per barriere attive poste in prossimità della sorgente la frequenza di filtro può essere correlata alla profondità z richiesta per la barriera, alla lunghezza d'onda λ e alla velocità di fase apparente⁽⁵⁾ delle onde di Rayleigh

⁽⁴⁾ Quando un'onda Rayleigh di assegnata frequenza f e lunghezza d'onda λ incide sulla barriera, essa è riflessa indietro se la sua lunghezza d'onda è inferiore a $z/0,6$ essendo z la profondità della barriera. Questa condizione può essere espressa in termini di frequenze, affermando che l'onda è riflessa quando la sua frequenza è superiore alla frequenza di filtro (cut-off) calcolabile con l'equazione (7). In presenza di una vibrazione costituita da un treno di onde di diverse frequenze e lunghezze d'onda tutte le onde caratterizzate da frequenze superiori alla frequenza di filtro sono riflesse, tutte le onde con frequenza inferiore alla frequenza di filtro si trasmettono oltre la barriera. In analogia al settore elettronico la barriera si comporta come un filtro passa basso, nel senso che consente il passaggio delle onde con frequenza inferiore alla frequenza di filtro.

⁽⁵⁾ La velocità di fase apparente delle onde di Rayleigh è la velocità di fase che è possibile misurare sperimentalmente in sito ed è il risultato della sovrapposizione dei diversi modi di Rayleigh alle diverse frequenze.

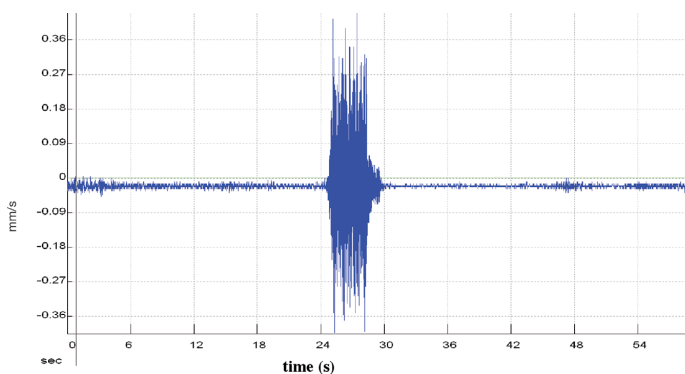


Fig. 4 - Vtreno=275km/h, misura CH1_48, misura n. 4, velocità verticale al sensore S1 posto ai piedi del rilevato ferroviario. $V_{\text{train}}=275\text{km/h}$, Measurement CH1_48, measurement n. 4. Vertical velocity at sensor S1 at the base of the railway embankment.

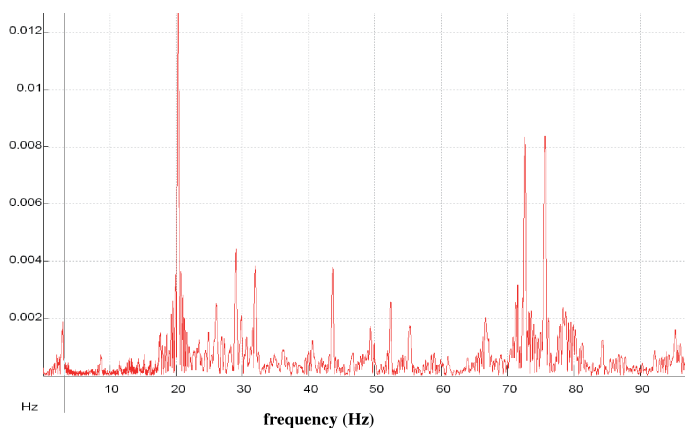


Fig. 5 - Trasformata di Fourier del segnale in figura 4. *Fourier transform of the signal in figure 4*

frequencies and distances after mitigation I_2 is less than the 25% of the initial free field vibration amplitude I_1 , i.e. $I_2 \leq 0.25I_1$.

5.1. Application of the analytical model

The analytical model of the mitigation action offered by the antivibration system has been applied to the building BT001/A (fig. 7) located at pk 101+600 near Bernate Ticino, at a distance of about 25m from the railway line.

In fig. 8 the main characteristics of the building are reported; in fig. 9 are summarised the results of the analytic model in the free-field conditions (without the antivibration system). It can be observed that vibrational level calculated according to UNI 9614 is equal to 75.6 dB for the vertical z

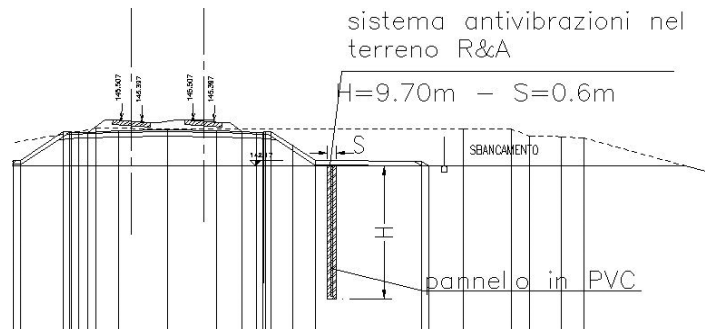


Fig. 6 - Sezione verticale del rilevato ferroviario dotato del nuovo sistema anti-vibrazioni sul lato destro. Vertical section of the railway embankment with the new anti-vibration system on the right side.

V_R tramite la seguente formula semplificata ([32], [33]):

$$z = 0,6 \cdot \lambda = 0,6 \frac{V_R}{f_{\text{filtro}}} \quad (7)$$

Dato che il maggior contenuto energetico delle vibrazioni dei treni misurate sulla linea AV Torino-Novara è stato osservato attorno a 20 Hz (figg. 4 e 5), se per esempio si considera una velocità di fase apparente misurata nel terreno pari a $V_R = 400\text{m/s}$, allora la profondità minima richiesta per la barriera affinché sia efficace è pari a circa $z = 12\text{m}$. Se invece il terreno è rigido con $V_R = 800\text{m/s}$, allora la profondità minima risulta pari a $z = 6\text{m}$.

L'attenuazione prevista dal nuovo sistema anti-vibrazioni può essere considerata tramite il termine A_f nell'equazione (1):

$$A_f(f) = -20 \log \left(\frac{I_2}{I_1} \right) \leq -20 \log(0,25)$$

$$A_f(f) \leq -12\text{dB} \quad (8)$$

dove:

- I_1 = ampiezza della vibrazione senza barriera;
- I_2 = ampiezza della vibrazione con barriera.

Da applicare a frequenze superiori alla frequenza di filtro della barriera valutata con la curva di dispersione sperimentale delle onde di Rayleigh.

Secondo i risultati del lavoro sperimentale del Prof. Woods ([32], [33])

axis and 72.4 dB for the horizontal axis x. Also for both axes x and z the limit of disturb fixed by ISO 2631-2 has been overcome at frequencies higher than about 20 Hz-25 Hz. The antivibration system previously described has been calculated to mitigate the vibrational impact.

The design mainly consists of determining the length of the barrier and the depth immersed into the ground.

The length of the barrier in this case is equal to about $L=200\text{m}$ and allows the shadow cone projected by

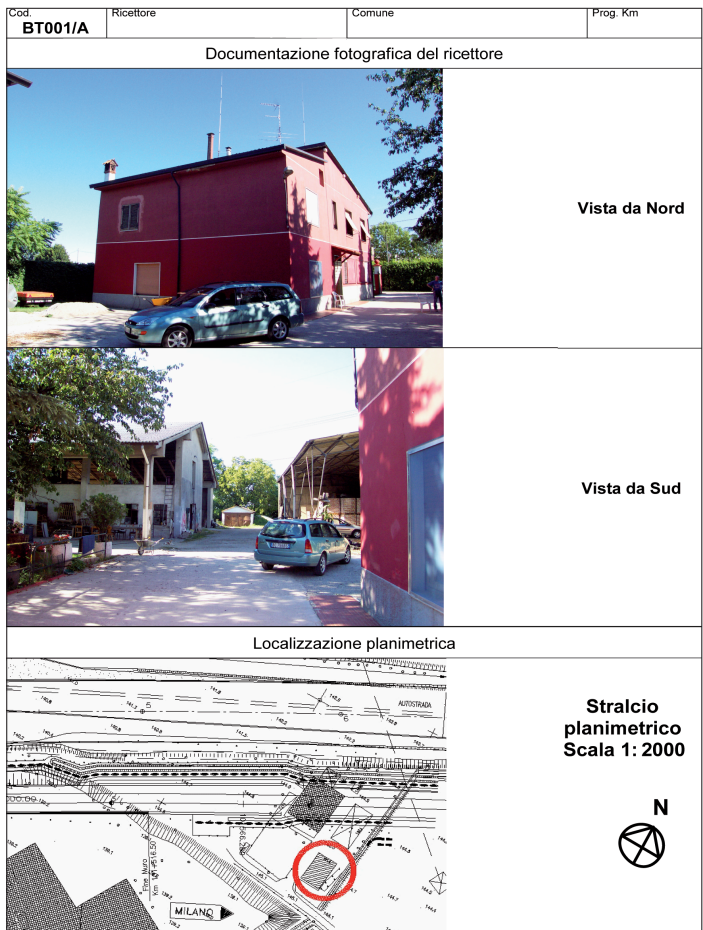
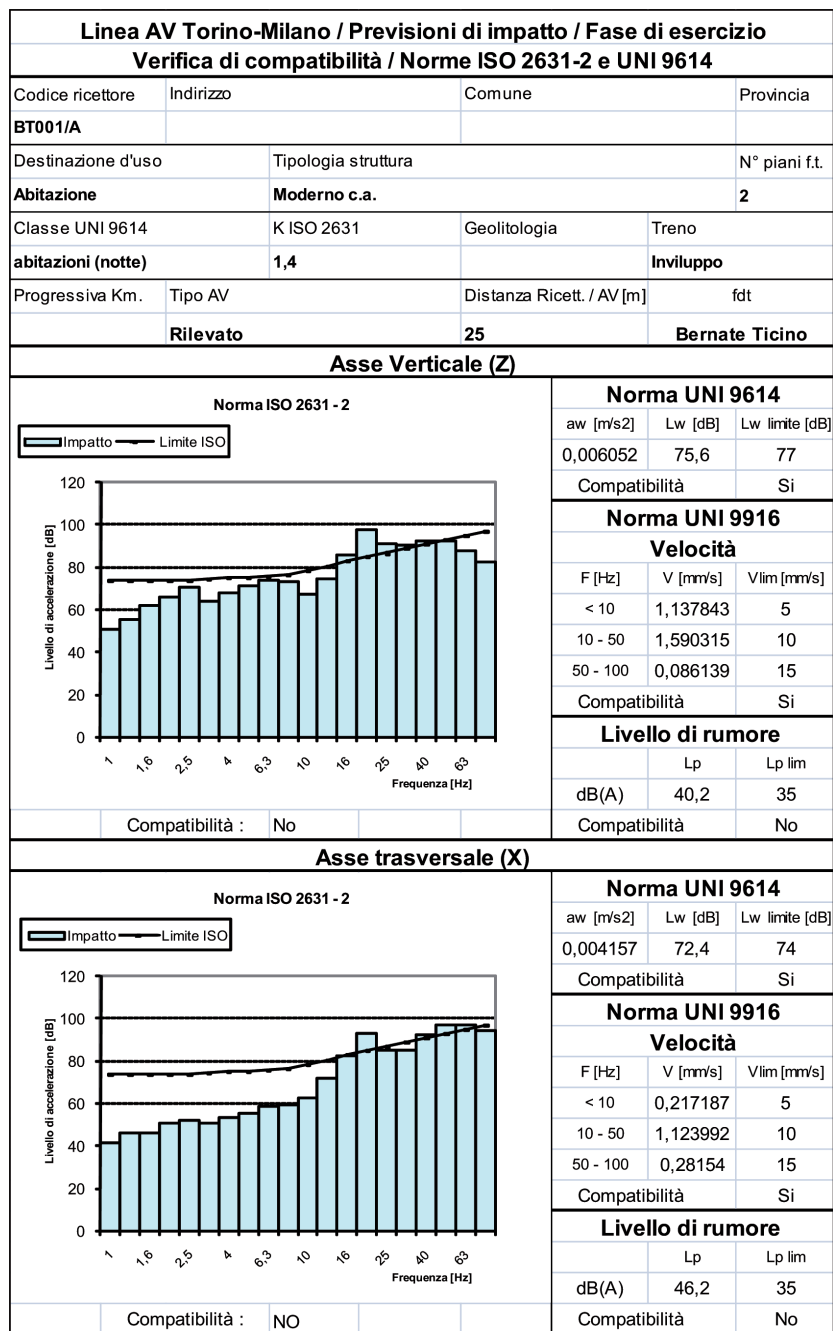


Fig. 7 - foto e ubicazione planimetrica del ricettore BT001/A. Pictures and planimetric position of the building BT001/A

Cod. BT001/A	Ricettore	Comune	Prog. Km
Localizzazione:			
Descrizione del ricettore:		Rilievo eseguito il 04/07/02	
<p>Cascina costruita nel 1960. La tipologia costruttiva è di tipo tradizionale con muri portanti. L'edificio adibito ad abitazione è costituito da due piani fuori terra più sottotetto e cantinino parziale. Le fondazioni sono a trave continua in C.A.. I solai sono costituiti da putrelle in ferro con luce massima di 5 x 5 m.</p>			
Contatto:			
CARATTERIZZAZIONE EDIFICIO			
Distanza planimetrica dalla linea ferroviaria (m): 25 m		Distanza altimetrica dalla linea ferroviaria (m):	
Caratteristiche geometriche: (altezza, larghezza, lunghezza) (m): 8 x 12 x 16			
Stato di conservazione in relazione alle strutture portanti: Ottimo			
Tipologia e dimensione dei solai: Luce max 5 x 5 m			
Tipi di locali o di edifici e livelli limite riferiti agli assi x e y (UNI 9614): <input type="checkbox"/> Area critica 71 dB <input checked="" type="checkbox"/> Abitazione 74 dB <input type="checkbox"/> Uffici 83 dB <input type="checkbox"/> Fabbrica 89 dB		Tipologia edificio (Norma DIN 4150): <input type="checkbox"/> Categoria 1 (edifici commerciali, industriali, etc...) <input checked="" type="checkbox"/> Categoria 2 (edifici residenziali o simili) <input type="checkbox"/> Categoria 3 (strutture sensibili alle vibrazioni)	
Categoria di strutture (Norma UNI 9916): <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input checked="" type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 <input type="checkbox"/> 8 Gruppo di edifici (Norma UNI 9916) <input checked="" type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 Classe di fondazione (Norma UNI 9916) <input checked="" type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C Tipo di terreno (Norma UNI 9916) <input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C <input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/> E <input type="checkbox"/> F			
CARATTERISTICHE DELLA SORGENTE DI VIBRAZIONE PREESISTENTE			
Sorgente: <input checked="" type="checkbox"/> Traffico stradale <input type="checkbox"/> Traffico ferroviario <input type="checkbox"/> Attività produttive <input type="checkbox"/> Altro <input type="checkbox"/> Nulla		Tipologia vibrazioni (UNI 9614/3.1): <input checked="" type="checkbox"/> Stazionarie <input type="checkbox"/> Transitorie <input type="checkbox"/> Impulsive	
Descrizione: Si avvertono le vibrazioni dovute al traffico autostradale			

Fig. 8 - Caratteristiche del ricettore BT001/A. *Characteristics of the building BT001/A.*

Fig. 9 - Livello vibrazionale previsto nel ricettore BT001/A. *Vibrational level predicted in the building BT001/A.*

una barriera o una trincea aperta può essere considerata efficace se l'ampiezza I_2 delle vibrazioni dopo l'installazione della barriera, mediata sia in frequenza, sia sulla distanza, risulta essere inferiore al 25% dell'ampiezza I_1 delle vibrazioni misurate prima dell'installazione della barriera, cioè se $I_2 \leq 0,25 I_1$.

5.1. Esempio di applicazione del modello

A titolo esemplificativo il modello previsionale del potere di mitigazione del livello vibratorio fornito dal sistema antivibrazione è stato applicato al ricettore BT001/A (fig. 7) in prossimità della progressiva chilometrica (pk) 101+600 a Bernate Ticino, distante circa 25m dalla linea AV.

In fig. 8 sono riportate le caratteristiche salienti del ricettore e in fig. 9 sono sintetizzati i risultati del modello

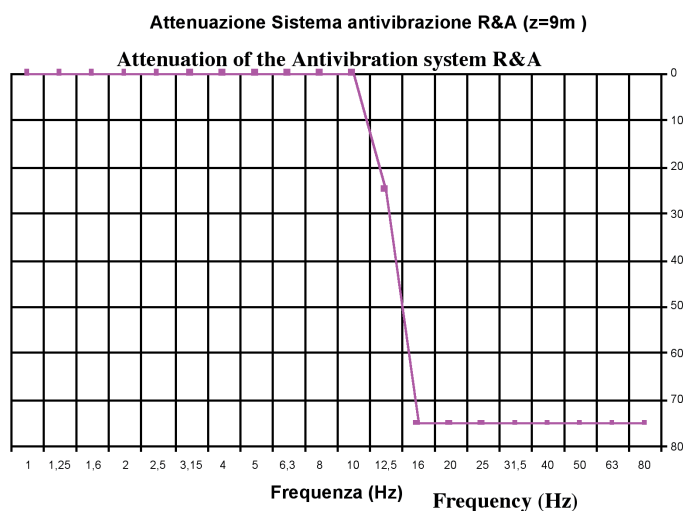


Fig. 10 - Caratterizzazione in frequenza del filtro passa basso costituito dal "Sistema Antivibrazioni nel terreno R&A" $H=9m$ nel sito BT001/A. *Dynamic frequency behaviour of the Antivibration System R&A" $H=9m$ on the site BT001/A.*

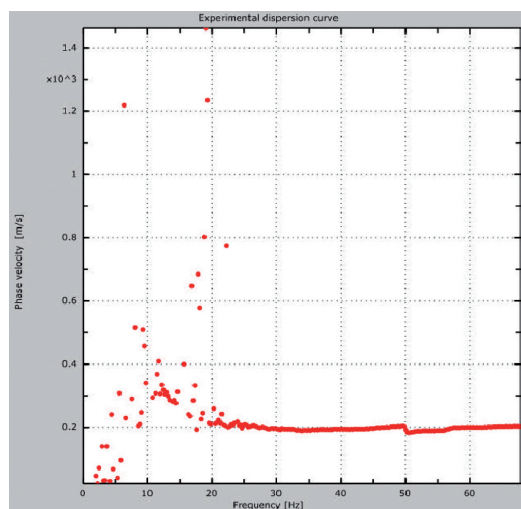


Fig. 11 - Velocità di propagazione delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza nel sito BT001/A (terreno sabbioso-giaioso debolmente addensato). *Propagation velocity of Rayleigh surface waves as a function of frequency on the site BT001/A (sand-gravel of low density).*

⁽⁶⁾ La curva di dispersione apparente è una caratteristica intrinseca del suolo, che può essere affetta dalla particolare configurazione dello stendimento dei sensori usati per misurarla. Il tipo di sorgente usata (colpo di mazza da 8 kg sul terreno in questo caso) per misurare la curva di dispersione può influenzare il

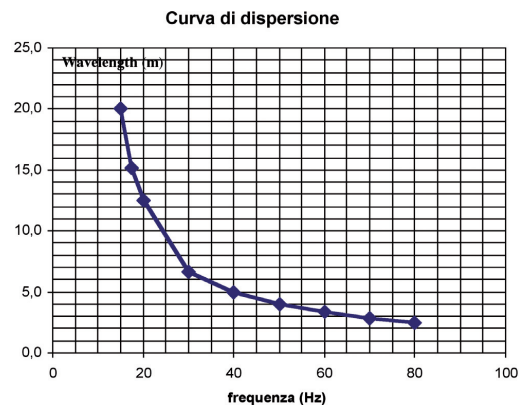


Fig. 12 - Lunghezza d'onda delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza nel sito BT001/A⁽⁶⁾. *Wavelength of Rayleigh waves as a function of frequency on the site BT001/A⁽⁶⁾.*

⁽⁶⁾ The apparent dispersion curve is an intrinsic characteristic of the ground, which can be influenced by the particular array of the sensors used to measure it on field. The type of source used in the measurement (hitting hammer of 8 kg in this case) influences the frequency range where the dispersion curve is detected, i.e. the dispersion curve can be measured only at those frequencies where the source energizes the ground. By varying the type of the source the range of frequency varies within which the dispersion curve is detected, nevertheless the value of the dispersion curve remains unchanged. The dispersion curve can be represented in different domains: wave number – frequency, phase velocity – frequency, frequency – wavelength; because the wave number, the wavelength and the phase velocity are physical quantities inter-correlated.

previsionale precedentemente descritto in campo aperto (assenza di sistema di mitigazione). Si osserva che il livello vibrazionale stimato secondo la Norma UNI 9614 è pari a 75,6 dB per l'asse verticale z e 72,4 dB per l'asse orizzontale x e che per entrambi gli assi il limite di disturbo previsto dalla Norma ISO 2631-2 è superato a partire da frequenze superiori a circa 20 Hz-25 Hz. Per mitigare l'impatto vibrazionale prodotto dai treni ad alta velocità è stato dimensionato il sistema anti-vibrazioni presentato in precedenza.

Il dimensionamento consiste essenzialmente nel determinare la lunghezza della barriera e la profondità di infissione nel terreno. La lunghezza della barriera L nel caso in esame pari a circa L=200m è tale da garantire che il cono d'ombra generato dalla barriera interessi il ricettore e che la distanza tra il ricettore e l'estremità della barriera sia sufficiente ad avere un livello vibratorio in campo aperto inferiore ai limiti normativi. Facendo riferimento alla fig. 16, la lunghezza L della barriera è data da:

$$L = 2 \cdot \sqrt{(D \min^2 - D^2)} \quad (9)$$

dove:

– Dmin = distanza minima a partire dalla quale il livello vibrazionale indotto dal passaggio del treno sull'edificio ricettore in assenza di barriera risulta inferiore al limite normativo;

– D = distanza dell'edificio ricettore dalla linea ferroviaria.

La profondità di infissione della barriera dipende dalle caratteristiche dinamiche del terreno, in particolare dalla velocità di propagazione delle onde di superficie (fig. 11) e dalla frequenza di filtro che si vuole raggiungere.

range di frequenza entro cui è visibile la curva di dispersione, nel senso che la curva di dispersione è misurata solo nel range di frequenze energizzate dalla sorgente usata. Al variare del tipo di sorgente varia il range di frequenze entro cui la curva di dispersione è visibile, ma il valore della curva resta invariato alle diverse frequenze. La curva di dispersione del suolo può essere rappresentata in diversi domini: frequenza-numero d'onda, velocità di fase – frequenza, frequenza-numero d'onda, essendo il numero d'onda, la lunghezza d'onda e la velocità di fase grandezze fisiche correlate tra loro.

the barrier to cover the building, so that the distance between the end point of the barrier and the building is sufficient to have a vibrational level under the limits imposed by the codes. With reference to fig. 16 the length of the barrier L can be calculated as:

$$L = 2 \cdot \sqrt{(D \min^2 - D^2)} \quad (9)$$

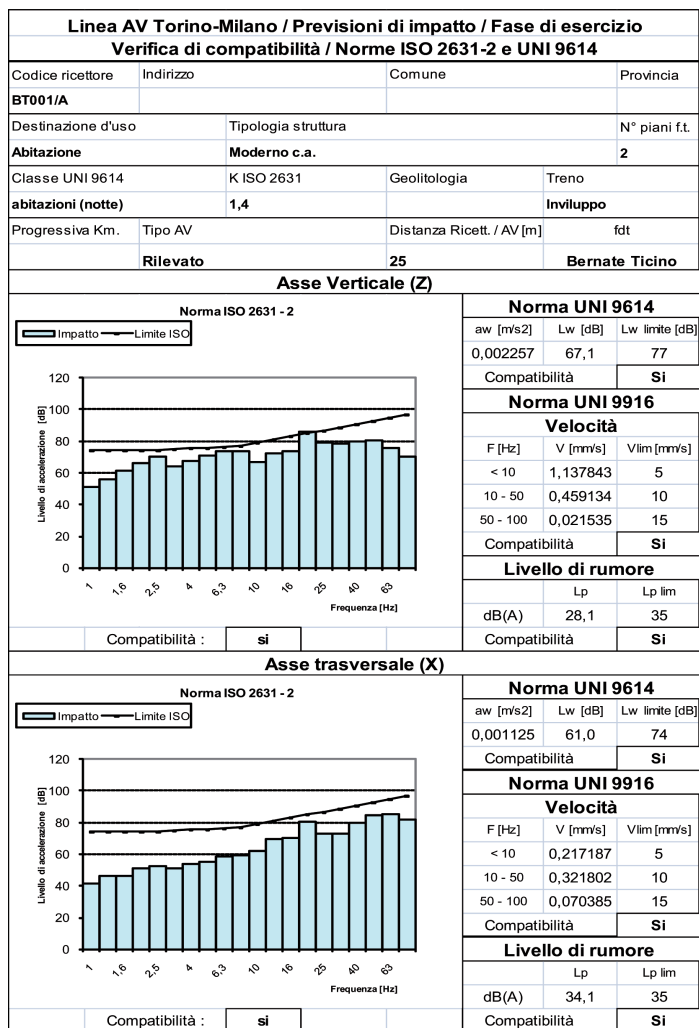


Fig. 13 - Livello vibrazionale atteso dopo l'installazione del sistema antivibrazioni nel terreno R&A nel sito BT001/A. *Vibrational level predicted on site BT001/A after the installation of the antivibration system R&A.*

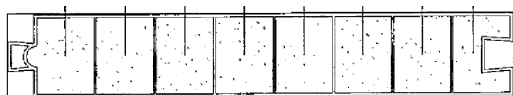
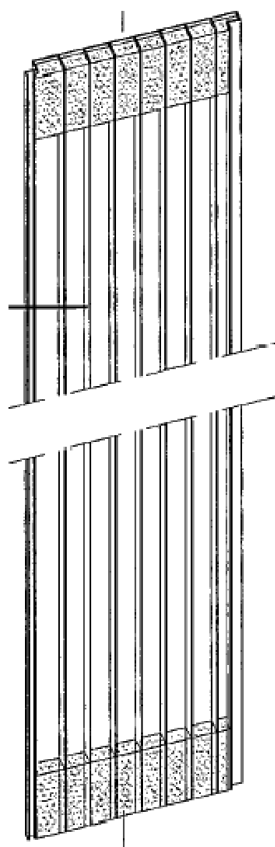
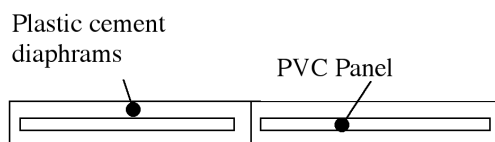


Fig. 14 - Sistema antivibrazione R&A: sezione del diaframma in cemento plastico e sezioni verticale e orizzontale del pannello in PVC interno al setto di calcestruzzo plastico. Antivibration system R&A: horizontal section of the diaphragms, vertical and horizontal sections of the PVC panel inside the plastic cement diaphragm.

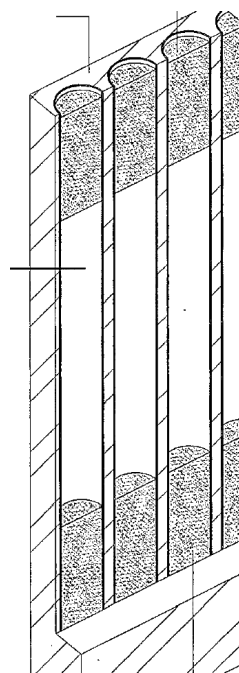


Fig. 15 - Sistema antivibrazione R&A: versione alternativa con tubi cavi. Antivibration system R&A: alternative version with tubes.

where:

- D_{min} = minimum distance from which the vibrational level induced by the train on the building is below the law limit, in free field conditions;
- D = distance between the building and the railway.

The immersion depth of the barrier depends on the dynamic characteristics of the ground, particularly on the propagation velocity of the Rayleigh surface waves (fig. 11) and on the cut-off frequency which is required. Above the cut-off frequency the intensity of the wave motion will be reduced according to equation (8). In this case an immersion depth $h=9m$ means a cut-off wavelength $\lambda=15m$ and hence (fig. 12) a cut-off frequency $f=15Hz-20Hz$. The barrier attenuates the intensity of the initial wave motion of at least 75% (fig. 10). After the installation of the barrier the expected vibrational level inside the building is 67.1 dB for the vertical axis z and 61.0 dB for the horizontal axis x . Also for both axes the vibrational level is under the limit imposed by ISO 2631-2 at all frequencies higher than 20 Hz -25 Hz where the limit was overcome in free-field conditions (fig. 13).

re. Al di sopra della frequenza di filtro l'intensità del campo di moto sarà ridotta in accordo alla relazione (8). Nel caso in esame adottando una profondità della barriera $h=9\text{m}$ segue che la lunghezza d'onda di filtro è pari a circa $\lambda=15\text{m}$ a cui corrisponde (fig. 12) una frequenza di filtro pari a $f=15\text{ Hz}-20\text{ Hz}$. La barriera rappresenta un filtro passa basso che attenua di almeno il 75% l'intensità iniziale del campo di moto (fig. 10). A seguito dell'installazione della barriera il livello vibratorio atteso all'interno del ricettore è pari a 67,1 dB per l'asse verticale z e 61,0 dB per l'asse orizzontale x . Inoltre per entrambi gli assi il livello di vibrazione è al di sotto del limite di disturbo previsto dalla Norma ISO 2631-2 a tutte le frequenze superiori a circa 20 Hz -25 Hz dove il limite era invece superato in condizioni di campo libero (fig. 13).

6. Conclusioni

Nel presente articolo è stato descritto un modello analitico semplificato, che è stato usato per prevedere il potenziale impatto causato dalle vibrazioni prodotte dai treni AV lungo la linea ferroviaria Torino-Milano.

I livelli vibrazionali previsti sono in buon accordo con i livelli misurati nella tratta tra Torino e Novara già in esercizio. È stato inoltre proposto un nuovo sistema anti-vibrazioni sulla tratta compresa tra Novara e Milano, in fase di completamento, per mitigare il potenziale impatto ambientale causato dalle vibrazioni dei treni. È stata proposta una campagna di prove del nuovo sistema di mitigazione da eseguire in località Bernate Ticino. I dati sperimentali che saranno misurati consentiranno di verificare l'efficacia previsionale del modello teorico e di confermare i risultati sperimentali già ottenuti dal Prof. WOODS ([32], [33]) nel caso di trincee aperte.

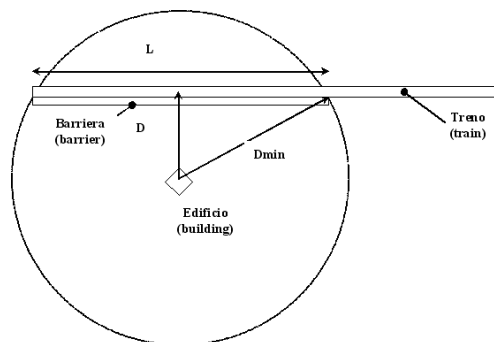


Fig. 16 - Determinazione della lunghezza della barriera nel sistema antivibrazioni R&A. Determination of the length of the barrier in the antivibration system R&A.

6. Conclusions

A simplified analytical model has been described, which has been used to predict the vibration impact caused by high speed trains along the railway between Turin and Milan. The vibrations levels predicted by the model are in good agreement with the vibrations levels measured after completion of the first lot between Turin and Novara. Also a new anti-vibration system has been proposed in a test field in Bernate Ticino along the second lot between Novara and Milan, to mitigate the environmental impact caused by train vibrations.

The experimental data that will be measured in the test field will allow to verify the reliability of the analytical model and to confirm the experimental results which were already obtained by Prof. Woods ([32], [33]) with the open trenches.

BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] Italferr, report n. A112-00-E-15-RG-AR0103-002-0, "Tutela, mitigazione e monitoraggio ambientale vibrazioni – caratterizzazione sorgente - Tratta A.V".
- [2] Norme UNI 9614, UNI 9916 e ISO 2631-2.
- [3] D.M. 16.01.1996: "Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche".
- [4] A. DE STEFANO, S. FOTI, R. LANCELLOTTA, V. ROMA, (1999): "L'isolamento sismico delle strutture su pali", Atti del IX Convegno Nazionale di Ingegneria Sismica in Italia, Torino 20-23 Settembre 1999.
- [5] A. DE STEFANO, S. FOTI, R. LANCELLOTTA, V. ROMA, (1999): "Dissipazione dell'energia in strutture su pali", Atti del IX Convegno Nazionale di Ingegneria Sismica in Italia, Torino 20-23 Settembre 1999.
- [6] G. HEBELER, C.G. LAI, C. OROZCO, G. RIX, V. ROMA, (2001): "Recent advances in Surface Wave methods for Geotechnical Site Characterization", XV International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul 27-31 Agosto 2001.
- [7] V. ROMA, (1998): "Attenuazione della risposta sismica di strutture su pali", Tesi di Laurea (Master Thesis) Politecnico di Torino.

- [8] V. ROMA, (2001): *"Dynamic Soil Characterization by means of Rayleigh Waves"*, Tesi di Dottorato (PhD Thesis) Politecnico di Torino.
- [9] V. ROMA, R. LANCELLOTTA, G. RIX, (2001): *"Frequencies and wavenumbers of Resonance in horizontally stratified media for traveling Rayleigh waves"*, XI International Conference on Waves and Stability in Continuous Media, Porto Ercole 3-9 Giugno 2001.
- [10] V. ROMA, G. HEBELER, G. RIX, C.G. LAI, (2002): *"Geotechnical soil characterization using fundamental and higher Rayleigh modes propagation in layered media"*, XII European Conference on Earthquake Engineering, London 9-13 Settembre 2002.
- [11] S. FOTI, C.G. LAI, G. RIX, V. ROMA, (2002): *"Simultaneous measurement and inversion of surface wave dispersion and attenuation curves"*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 22 (2002) 923-930.
- [12] MASOERO, CERAVOLO (1995) *"La valutazione dell'impatto ambientale da vibrazioni ferroviarie"*, Ingegneria Ferroviaria.
- [13] V. ROMA, (2002): *"Automated inversion of Rayleigh geometrical dispersion relation for geotechnical soil identification"*, 3rd World Conference on Structural Control, Como 7-12 April 2002.
- [14] V. ROMA, (2003): *"Soil Properties and Site characterization through Rayleigh Waves"*, International Conference on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Lione, Settembre 2003.
- [15] V. ROMA, (2004): *"Dynamic Soil Identification by means of Rayleigh Waves"*, XI Conferenza Nazionale di Ingegneria Sismica in Italia, Genova, Gennaio 2004.
- [16] V. ROMA, M.A. MAHTAB, (2004): *"Use of Rayleigh Waves as Reference for Determining Setback Distances for Explosions near Shorelines"*, Poster Session, 6th Bay of Fundy Workshop, September 29-October 2, 2004, Cornwallis Park, Nova Scotia.
- [17] A. MAHTAB, K.L. STANTON, V. ROMA, (2004): *"Environmental Impacts of Blasting for Stone Quarries near Bay of Fundy"*, 6th Bay of Fundy Workshop, September 29-October 2, 2004, Cornwallis Park, Nova Scotia.
- [18] V. ROMA, M. PESCATORE, (2005): *"Environmental impact caused by high speed train vibrations"*, International Geotechnical Conference: Soil-structure interaction: calculation methods and engineering practice, 26-28 May, 2005, St. Petersburg (accettato per pubblicazione).
- [19] M. BERGAMASCHI, L. LOCATELLI, D. QUADRELLI, V. ROMA, (2006): *"Soil-Structure dynamic interaction: application to design and construction of the facilities of a gas power plant"*, XIIIth Danube-European Conference on Geotechnical Engineering (29-31 May 2006, Lubiana) Active Geotechnical Design in Infrastructure Development.
- [20] V. ROMA, (2007): *"Impatto ambientale causato da vibrazioni prodotte da treni ad alta velocità"*, XII Conferenza Nazionale di Ingegneria Sismica in Italia, Pisa, Giugno 2007.
- [21] V. ROMA, (2007): *"Caratterizzazione geotecnica sismica dei suoli con il metodo MASW"*, XII Conferenza Nazionale di Ingegneria Sismica in Italia, Pisa, Giugno 2007.
- [22] V. ROMA, (2007): *"Caratterizzazione geotecnica sismica dei suoli con il metodo MASW"*, testo e manuale del software MASW, sul sito www.masw.it.
- [23] D.M. 16.01.1996: *"Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche"*.
- [24] OPCM n. 3274 del 20/03/03 del Consiglio dei ministri – Allegato 1 – *"Criteri per l'individuazione delle zone sismiche – Individuazione, formazione e aggiornamento degli elenchi nelle medesime zone"*.
- [25] OPCM n. 3274 del 20/03/03 del Consiglio dei ministri – Allegato 4 – *"Norme Tecniche per il progetto sismico delle opere di fondazione e sostegno dei terreni"*.
- [26] OPCM n.3316 (2003) - Modifiche ed integrazioni all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n.3274 del 20.03.03.
- [27] D.M. 14/01/2008: *"Norme tecniche per le costruzioni"*.
- [28] Circolare 2/02/2009 contenente le Istruzioni per l'applicazione delle *"Nuove norme tecniche per le costruzioni"* di cui al D.M. 14/09/2008.
- [29] D.M. 14/09/2005: *"Norme tecniche per le costruzioni"*.
- [30] H.J. SAURENMAN, J.T. NELSON, G.P. WILSON, (1982): *"Handbook of urban rail noise and vibration control"*, 1982, U.S. Department of Transportation, Washington D.C. Table 8-2 «Increase in A-weighted groundborne noise due to various wheel/rail conditions relative to smooth welded rail and trued wheels».

- [31] R&A (2008): "International patent PCT/IT2008/000017- Anti-Vibrations System".
- [32] F.E. JR. RICHART, J.R. JR. HALL, R.F. WOODS, (1970): "Vibrations of Soils and Foundations", Prentice Hall, Inc., New Jersey.
- [33] R.D. WOODS, (1967): "Screening of elastic surface waves by trenches", PhD Thesis, University of Michigan.
- [34] WOLF, (1985): "Dynamic soil-structure interaction", Prentice-Hall.
- [35] CLOUGH and PENZIEN, (1993): "Dynamic of structures", McGraw-Hill.
- [36] V. ROMA, (2001): "Dynamic Soil Characterization by means of Rayleigh Waves", PhD Thesis, Technical University of Turin (Politecnico).
- [37] Documento Italferr n. GN.F0/331 (5/6/96): "Linee guida per l'elaborazione dei progetti di mitigazione delle vibrazioni prodotte dal vettore ferroviario".
- [38] Documento Italferr n. RP.SF.00.05: "Linee guida per la progettazione e la posa di armamento antivibrante tappetino" del 5/3/98.
- [39] Documento Italferr n. SP AM 0000 006 REV.A: "Specifica Tecnica – U.O. Ambiente – Titolo: Progetto Vibrazionale – Progetto esecutivo".
- [40] Documento Italferr n. A102 0EF1 R6 IM600 001 rev. (Maggio 98) "Studio di sistemi di smorzamento vibrazioni".

Sommaire	Zusammenfassung
<p>VIBRATIONS ENGENDRÉES PAR LES TRAINS À HAUTE VITESSE SUR LA LIGNE TURIN-MILAN ET SYSTÈMES D'ATTÉNUATION "HIGH SPEED TRAIN"</p> <p>Le récent développement des lignes ferroviaires à haute vitesse dans différents pays, mais surtout en Europe, a rendu plus évidents le dérangement et les dommages causés par les vibrations. Les vibrations engendrées par les trains sont le résultat de l'interaction dynamique SSI (Interaction Terrain - Structure) entre le train, les rails et le terrain. Dans cet article, on présente l'expérience acquise dans le cadre du projet de la ligne à haute vitesse entre Turin et Milan. Grâce à un modèle mathématique, on rend compte de la comparaison entre les niveaux de vibration prévus pendant la phase de projet et les niveaux de vibration mesurés après l'achèvement du premier lot de la liaison ferroviaire entre Turin et Novara. En outre, on présente un nouveau système anti-vibration, qui a été proposé le long de la ligne ferroviaire Novara-Milan pour atténuer l'impact potentiel des vibrations causées par les trains. Les considérations exposées dans cet article représentent une méthodologie opérationnelle qui a pour but de prévoir et d'atténuer l'impact des vibrations des trains.</p>	<p>VON ZÜGEN ERZEUGTEN BODENSCHWINGUNGEN AUF DER NBS TÜRIN-MAILAND. DÄMPFUNGSSYSTEM "HIGH SPEED TRAIN"</p> <p>Die Wechselwirkungen zwischen Zügen und Ober- Unterbau erzeugen Bodenschwingungen. Gewonnene Erfahrungen während des Baus der NBS Tülin-Mailand. Vergleich zwischen teoretischbestimmte Schwingungspegeln und Betriebsmessungen auf der Strecke Tülin-Novara. Beschreibung eines neuen Dämpfungssystems, von dem eine nützliche Methodik für die Lösung solchen Problemen ableitet wird.</p>