

Collana Tecnico-Scientifica
diretta da Giorgio Galli

Quaderno n. 21

FEDERICO ROSSI, ANDREA NICOLINI

MODELLI DI PREVISIONE DELLE
VIBRAZIONI INDOTTE DA TRENI E
VEICOLI SU STRADA NEL TERRENO

febbraio 2004

CIRIAF

Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento da Agenti Fisici

INDICE

Autori	pag. 4
Riassunto	pag. 6
Abstract	pag. 7
1. Introduzione	pag. 8
2. Modello di previsione delle vibrazioni indotte dai treni nel terreno	pag. 12
2.1 Modellazione della sorgente di vibrazioni	pag. 12
2.2 Modello di propagazione.....	pag. 14
2.3 Calibrazione del modello	pag. 20
2.4 Validazione del modello.....	pag. 25
3. Modello di previsione delle vibrazioni indotte da veicoli su strada nel terreno	pag. 33
3.1 Modellazione della sorgente di vibrazioni	pag. 33
3.2 Modello di propagazione.....	pag. 34
3.3 La campagna sperimentale di misura per l'individuazione del modello di previsione	pag. 37
3.4 Individuazione del modello della sorgente di vibrazioni	pag. 39
3.5 Validazione del modello.....	pag. 42
4. Conclusioni	pag. 45
5. Lista dei simboli	pag. 48
6. Bibliografia	pag. 53

Appendice: Normative tecniche	pag. 57
A.1 UNI 9614.....	pag. 57
A.2 UNI 9916.....	pag. 63

AUTORI

Federico Rossi

Nato a Perugia nel 1966, laureato in Ingegneria Elettronica nel 1992, è ricercatore confermato di Fisica Tecnica Ambientale presso la Facoltà di Ingegneria di Perugia e docente di Docente dei Corsi di Fisica Tecnica 1 e Proprietà Termofisiche dei Materiali presso il Corso di Laurea in Ingegneria dei Materiali di Terni. Segretario del CIRIAF, è autore di oltre 50 pubblicazioni nei settori delle proprietà termofisiche dei materiali, dell'acustica e della trasmissione del calore. Nel settembre 2003 è risultato idoneo ad una valutazione comparativa ad un posto di Professore Associato presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia nel settore scientifico disciplinare ING-IND/11 "Fisica Tecnica Ambientale".

Andrea Nicolini

Nato a Perugia nel 1972, si è laureato in Ingegneria Elettronica nel 1998; ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Fisica Tecnica Ambientale nel Maggio 2003. E' vincitore nel Novembre 2002 di un Concorso per Assegno di Ricerca presso l'Università degli Studi di Perugia dal titolo "Controllo Attivo del Rumore Ferroviario". Dal. 1999/2000 svolge esercitazioni ai Corsi della Sezione di Fisica Tecnica dell'Università di Perugia e del Corso di Laurea in Ingegneria dei Materiali a Terni. E'

Modelli di previsione delle vibrazioni indotte da treni e veicoli su strada nel terreno

autore di oltre 20 pubblicazioni nel campo delle proprietà termofisiche dei materiali, dell'acustica e della trasmissione del calore.

RIASSUNTO

Allo stato attuale non sono disponibili modelli pratici per la previsione dell'impatto ambientale di vibrazioni indotte da treni e veicoli su strada. In questo lavoro, inizialmente è proposto un semplice modello di previsione, calibrato relativamente a treni ad alta velocità. I dati di ingresso del modello sono le caratteristiche del treno, la velocità dello stesso e le caratteristiche della ferrovia; i dati di uscita del modello sono la velocità media di vibrazione del suolo ed il livello di velocità. I risultati forniti dal modello suddetto sono stati confrontati con numerosi dati sperimentali forniti da campagne di misura eseguite lungo le più importanti linee ferroviarie europee.

Successivamente è stato proposto un metodo originale per valutare i livelli di vibrazione dovuti a veicoli su strada. Una campagna di misure è stata condotta per individuare i livelli di accelerazione relativi a differenti tipologie di veicoli. Ogni passaggio di un veicolo è stato considerato come un singolo evento. I livelli di vibrazione dovuti a ciascun singolo evento sono stati misurati per mezzo di un sistema di acquisizione dati. I risultati delle misure hanno consentito di individuare le relazioni tra livelli di vibrazione, tipologia dei veicoli, velocità dei veicoli e caratteristiche del suolo. I livelli di accelerazione possono essere quindi stimati a diverse distanze dalla sorgente di vibrazioni adottando il modello di propagazione precedentemente introdotto relativamente ai treni.

ABSTRACT

No suitable handy tool is available to predict train and road vehicles induced vibration on environmental impact assessment. A simple prediction model is proposed which has been calibrated for high speed trains. Model input data are train characteristics, train speed and track properties; model output data are soil time average velocity and velocity level. Model results have been compared with numerous vibration data retrieved from measurement campaigns led along the most important high speed European rail tracks. Model performances have been tested by comparing measured and predicted vibration values.

Besides, an original method to evaluate vibration levels due to road vehicles is proposed. A measurement campaign has been carried out to individuate vibration acceleration levels for different typologies of road vehicles. Each vehicle passage has been considered as a single event. Vibration levels due to each single event have been measured by means of a data acquisition system. Measurement results allowed to individuate the relations among vibration levels, typology of vehicle, vehicle velocity and soil characteristics. Thus, acceleration levels may be estimated at different distances from the vibration source by adopting the propagation model which has been previously proposed for train induced soil vibrations.

1. INTRODUZIONE

Gli effetti che l'esposizione alle vibrazioni determina sull'uomo sono sostanzialmente di natura psicologica e biologica: i primi consistono in disturbi neuro-psichici che coinvolgono i terminali nervosi periferici; i secondi interessano il sistema nervoso e quello osseo, provocando aumenti della pressione sanguigna e del battito cardiaco, attenuazione dei riflessi, varie forme di artrosi e discopatie. Gli effetti possono variare in relazione alle caratteristiche fisiche del fenomeno, ai tempi e alle modalità di erogazione, e sono classificabili come effetti di danno, di disturbo o semplicemente di fastidio. L'aspetto più importante nello studio della componente vibrazioni riguarda, tuttavia, l'effetto provocato da queste ultime sulle strutture edilizie, ed in particolare su manufatti antichi di valore storico-artistico. Infatti se la propagazione delle vibrazioni avviene in terreni costituiti da materiali incoerenti o a bassa densità, questi ultimi possono subire degli assestamenti, tanto più evidenti se si tratta di sabbie in presenza di falda freatica, provocando cedimenti differenziali dei manufatti. A tale proposito sono stati proposti vari limiti ai valori della frequenza, dell'accelerazione e dell'ampiezza delle vibrazioni, per prevenire il danno agli edifici; tuttavia per il patrimonio monumentale, archeologico ed artistico, il problema è più complesso, in quanto la reazione alle sollecitazioni per ciascuna opera è influenzata da vari parametri quali: la tipologia, le dimensioni, l'età, lo stato di conservazione, il valore intrinseco, ecc. Sono tuttavia disponibili valori

limite delle vibrazioni, il superamento dei quali può determinare condizioni di rischio. La Legislazione italiana in materia di vibrazioni e di prevenzione dei rischi da esse derivanti è sprovvista di specifici provvedimenti; è dunque necessario fare riferimento alla normativa tecnica ed in particolare alle UNI 9614 e UNI 9916 (vedi Appendice) che stabiliscono le modalità di misura delle vibrazioni negli edifici e ne fissano i limiti di ammissibilità. Sono disponibili analoghi regolamenti internazionali quali le ISO 4866 e ISO 10137. Inoltre, l'effetto delle vibrazioni sul corpo umano ed i relativi limiti di esposizione è regolato dalle norme ISO 2631 Parte 1 e 2 e ISO 5349. La valutazione dell'impatto della componente vibrazione deve essere condotta con particolare attenzione nei ricettori sensibili, nei quali gli effetti negativi sono più pronunciati o meno tollerati; un apposito modello di calcolo e l'analisi delle caratteristiche geotecniche del territorio consentono la determinazione della distribuzione delle vibrazioni.

In particolare, le valutazioni di impatto ambientale richiedono la stima dei livelli di vibrazione indotti da carichi in movimento quali treni e veicoli su strada [1, 2]. Sebbene alcune procedure complesse, che richiedono lunghi tempi di calcolo e un elevato numero di dati di ingresso, sono note, allo stato attuale nessun metodo pratico è disponibile per la stima delle vibrazioni indotte da treni o veicoli su strada [3]. Le valutazioni di impatto ambientale, relativamente alla componente vibrazioni, sono spesso effettuate senza l'impiego di un modello matematico, ma semplicemente descrivendo i possibili effetti

macroscopici indotti dalle vibrazioni stesse [4]. In questo lavoro è inizialmente proposto un metodo pratico e semplice per la previsione delle vibrazioni indotte dai treni. Il metodo è stato introdotto relativamente a treni ad alta velocità. I dati di ingresso del modello sono la velocità e la massa del treno, la geometria delle rotaie, le caratteristiche del suolo e la distanza tra rotaie e punto di stima. I risultati del modello sono forniti in termini di velocità massima r.m.s. del suolo e livello di vibrazione. I risultati sono stati ottenuti adottando ipotesi sostenibili. Il modello è stato calibrato per mezzo di risultati di misure effettuate lungo una linea ferroviaria italiana. Inoltre, i risultati ottenuti mediante il modello proposto sono stati confrontati con numerosi dati sperimentali disponibili da campagne di misura condotte lungo linee ferroviarie europee ad alta velocità. Il confronto ha mostrato che l'errore massimo fornito dal modello è inferiore a 2.5 dB anche se non sono noti dati relativi al suolo. E' stato inoltre valutato il caso peggiore in condizioni conservative in modo da testare il modello quando le proprietà del suolo non sono neanche stimabili.

Nella seconda parte del lavoro è proposta una semplice metodologia per stimare le vibrazioni indotte da veicoli su strada. Il metodo è basato su una modellazione della sorgente di vibrazioni ed un modello di propagazione. In tal modo, è possibile stimare i livelli di vibrazione dovuti ad una strada impiegando come dati di ingresso i flussi di traffico e la velocità dei veicoli. I dati di ingresso del modello della sorgente di vibrazioni sono la tipologia del veicolo e la sua velocità: i dati di uscita

sono l'accelerazione r.m.s. e il livello dovuto ad un singolo evento (il passaggio di un veicolo). I livelli di accelerazione dovuti ad un singolo evento sono stati individuati relativamente a tre diverse tipologie di veicoli (automobili, furgoni e camion) per mezzo di una campagna di misure condotta lungo una strada italiana. Il modello di propagazione consente invece di determinare i livelli di vibrazione a diverse distanze dalla strada, considerando gli effetti dovuti all'assorbimento del suolo ed alla divergenza. I risultati forniti dal modello sono dati in termini di accelerazione r.m.s. e livello di vibrazione. Una campagna di misure è stata condotta allo scopo di confrontare i livelli misurati a diverse distanze dalla strada con quelli ottenuti mediante il metodo proposto. I risultati delle misure hanno mostrato che gli errori di stima dovuti al metodo individuato sono inferiori a 1.5 dB.

2. MODELLO DI PREVISIONE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE DAI TRENI NEL TERRENO

La stima delle velocità r.m.s. del suolo indotte dal passaggio di treni ad una data distanza dalla ferrovia prevede la modellazione sia della sorgente di vibrazioni che dei fenomeni di propagazione delle stesse.

2.1 MODELLAZIONE DELLA SORGENTE DI VIBRAZIONI

L'energia trasmessa dalla sorgente di vibrazioni (treno e terrapieno) al suolo è un fenomeno istantaneo governato da meccanismi complessi il cui andamento è difficilmente identificabile [5, 6]. Si introduce quindi la seguente ipotesi semplificativa: una porzione costante della potenza media trasferita dal treno in movimento al sistema ballast-terrapieno è poi ritrasferita al suolo circostante. Tale ipotesi è verificata se il sistema ballast-terrapieno e gli elementi di collegamento sono uniformi su tutta la linea ferroviaria; in tal caso, si può scrivere la seguente espressione:

$$W_0 = K \cdot W_T \quad (1)$$

dove la costante K deve essere individuata calibrando il modello.

La potenza media W_T trasferita dal treno al sistema ballast-terrapieno dipende dalla velocità del treno, dalla massa del treno, dalla

lunghezza dello stesso e dalla geometria della linea ferroviaria. Per determinare W_T , si introduce la massa specifica del treno come:

$$m = \frac{M}{T} \quad (2)$$

L'energia media trasferita dal treno per unità di lunghezza è data da:

$$e = m \cdot g \cdot s \quad (3)$$

dove s è il massimo spostamento verticale ammesso per la rotaia a seguito del passaggio del treno [7-9]. Il massimo spostamento verticale è scelto in modo da adottare ipotesi conservative. La potenza è ricavata assumendo che l'energia è trasferita al sistema ballast-terrapieno per mezzo delle traversine; inoltre, l'energia, come espressa dall'Eq. (3), è rilasciata nell'intervallo di tempo in cui il treno viaggia da una traversina alla successiva. In base a suddette ipotesi, la potenza associata all'Eq. (3) è data da:

$$w_T = m \cdot g \cdot s \cdot \frac{v_T}{i} \quad (4)$$

La potenza trasferita al sistema ballast-terrapieno da una porzione dx del treno è:

$$dW_T = m \cdot g \cdot s \cdot \frac{v_T}{i} \cdot dx \quad (5)$$

In base all'Eq. (1), la potenza media ritrasferita dal ballast-terrapieno al suolo da una porzione dx del treno è data da:

$$dW_0 = m \cdot g \cdot s \cdot \frac{v_T}{i} \cdot K \cdot dx \quad (6)$$

2.2 MODELLO DI PROPAGAZIONE

La propagazione delle onde di vibrazione è stata modellata adottando le seguenti ipotesi:

- A. il terrapieno è considerato come una sorgente emittente in modo continuo la lunghezza della quale corrisponde alla lunghezza del treno [10-13]. La potenza media della sorgente per unità di lunghezza è espressa dall'Eq. (6).
- B. L'energia vibrazionale è trasportata solo sulla superficie del suolo per mezzo di onde di Rayleigh, poiché la loro ampiezza decresce esponenzialmente in direzione verticale, perpendicolarmente alla superficie del suolo [14]. L'effetto delle onde primarie, secondarie e di Love è trascurato [15].

C. Ogni porzione elementare della sorgente è una sorgente puntiforme che emette energia vibrazionale in modo omnidirezionale [16].

Se si considera un mezzo non dissipativo, l'energia vibrazionale trasportata da onde di Rayleigh sulla superficie del suolo decresce proporzionalmente a $1/r$. In base alle ipotesi A, B e C, l'intensità media in un generico punto P può essere ricavata calcolando la potenza che attraversa un cerchio di diametro unitario centrato in P (vedi Fig.1):

$$dJ_r = \frac{dW_r}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (7)$$

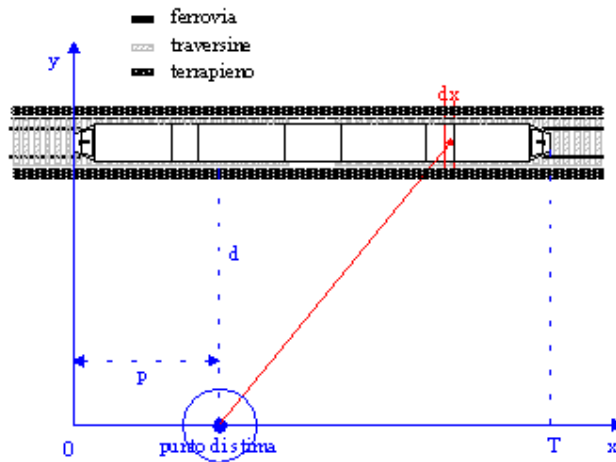


Fig. 1: schema di riferimento del modello

dW_r rappresenta la potenza totale prodotta da una sorgente elementare a distanza r dalla sorgente stessa. L'intensità nel punto P, dovuta all'intero treno, è data da:

$$J_r = \int_0^T \frac{dW_r}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (8)$$

dW_r può essere determinata come segue (vedi Fig.2): si consideri la potenza dissipata all'interno di un'area a forma di corona circolare centrata nella sorgente; il raggio interno della corona circolare è r , quello esterno è $r+dr$. La potenza dissipata può essere calcolata come la differenza tra la potenza che entra e quella che esce dalla corona circolare. Inoltre, la potenza dissipata è proporzionale alla potenza che entra nella corona circolare, allo spessore della corona circolare ed alle caratteristiche del suolo, ossia alla costante di dissipazione [17]:

$$-d(dW_r) = -(dW_{r+dr} - dW_r) = dW_r \cdot \alpha \cdot dr \quad (9)$$

Integrando l'Eq.(9), si ottiene la seguente relazione:

$$dW_r = dW_0 \cdot e^{-\alpha \cdot r} \quad (10)$$

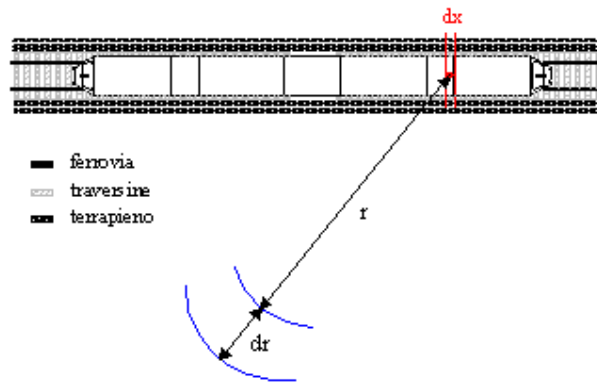


Fig. 2: schema di riferimento relativo alla dissipazione di energia

Combinando l'Eq. (6) e l'Eq. (9), si ottiene:

$$dW_r = m \cdot g \cdot s \cdot \frac{v_T}{i} \cdot K \cdot e^{-\alpha \cdot r} \cdot dx \quad (11)$$

In base all'Eq. (11), l'Eq. (8) diviene:

$$J_r = \int_0^T \frac{m \cdot g \cdot s \cdot v_T \cdot K \cdot e^{-\alpha \cdot r}}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot r} \cdot dx \quad (12)$$

In base allo schema di riferimento (vedi Fig.1), il massimo valore dell'intensità J_r si ottiene quando $p=T/2$, cioè quando la posizione del

treno è simmetrica rispetto alla linea perpendicolare che lo attraversa partendo dal punto P. J_{\max} è data da:

$$J_{\max} = \int_{-T/2}^{T/2} \frac{m \cdot g \cdot s \cdot v_T \cdot K \cdot e^{-\alpha \cdot \sqrt{x^2 + d^2}}}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \sqrt{x^2 + d^2}} dx \quad (13)$$

Poiché J_{\max} è la media temporale della potenza massima che attraversa un cerchio di diametro unitario centrato in P, la media temporale della densità di energia vibrazionale massima nel punto P è:

$$D_{\max} = \frac{J_{\max}}{c_R} \quad (14)$$

Il valore assoluto della velocità r.m.s. si ottiene combinando l'Eq. (14) con la seguente relazione [18, 19]:

$$D_{\max} = \rho_s \cdot u^2 \quad (15)$$

Perciò:

$$u = \sqrt{\frac{J_{\max}}{\rho_s \cdot c_R}} \quad (16)$$

Il livello assoluto di vibrazione è dato dalla seguente relazione:

$$L = 10 \cdot \log \left(\frac{u}{u_{\text{ref}}} \right)^2 ; \quad u_{\text{ref}} = 10^{-8} \text{ m/s} \quad (17)$$

La velocità di propagazione delle onde di Rayleigh c_R è definita come segue [20]:

$$c_R = C \cdot \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (18)$$

C può essere ricavata risolvendo la seguente relazione [20]:

$$C^6 - 8 \cdot C^4 + 8 \cdot \left(3 - \frac{1-2\nu}{1-\nu} \right) \cdot C^2 - 16 \cdot \left(1 - \frac{1-2\nu}{2 \cdot (1-\nu)} \right) = 0 \quad (19)$$

Nell'Eq. (18), il modulo di elasticità torsionale del suolo G è definito come mostrato nell'Eq. (20):

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (20)$$

2.3 CALIBRAZIONE DEL MODELLO

Il modello proposto è stato calibrato per mezzo di una campagna di misure. La calibrazione è necessaria allo scopo di determinare il valore della costante K (vedi Eq. (1)).

La campagna di misure

Sono stati scelti alcuni punti di misura lungo un tratto rettilineo di una linea ferroviaria ad alta velocità presso la stazione di Terontola (AR) in Italia (linea ferroviaria Roma-Firenze); nessun ponte o curva è situato vicino ai punti di misura (vedi Fig. 3). Le vibrazioni sono state misurate a 5, 10, 20 e 40 metri dalla mezzera della ferrovia. Le componenti di velocità delle particelle del suolo sono state misurate in base allo schema di riferimento di Fig. 3. Le misure sono state eseguite per mezzo di geofoni: il modello GS-32CT per la misura delle componenti x e y , GS-30CT per la componente z [21]. I segnali provenienti dai geofoni sono stati acquisiti ed elaborati per mezzo di un sistema di acquisizione OROS ed un codice numerico basato su DASY-LAB per l'elaborazione dei segnali di vibrazione [22]. L'elaborazione dei segnali ha consentito di calcolare le velocità r.m.s. delle particelle del suolo dalla storia temporale delle velocità istantanee indotte dal passaggio del treno. Il valore della velocità r.m.s. è stato calcolato mediante il codice numerico, impiegando le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} u_x &= \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N u_{x,j}; & \text{with } u_{x,j} &= \sqrt{\int_j^{j+1} v_{x,j}^2(t) \cdot dt} \\ u_y &= \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N u_{y,j}; & \text{with } u_{y,j} &= \sqrt{\int_j^{j+1} v_{y,j}^2(t) \cdot dt} \\ u_z &= \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N u_{z,j}; & \text{with } u_{z,j} &= \sqrt{\int_j^{j+1} v_{z,j}^2(t) \cdot dt} \end{aligned} \quad (21)$$



Fig. 3: fotografia del sito di misura

Il sistema di elaborazione dati consente inoltre di calcolare il livello di vibrazione relativo ad un intervallo di tempo di 1 s. Relativamente al j-

esimo intervallo di tempo di 1 s, il livello di vibrazione è definito come segue:

$$L_j = 10 \cdot \log \left(\frac{u_j}{u_{\text{ref}}} \right)^2 = 20 \cdot \log \left(\frac{\sqrt{u_{x,j}^2 + u_{y,j}^2 + u_{z,j}^2}}{u_{\text{ref}}} \right) \quad (22)$$

$$u_{\text{ref}} = 10^{-8} \text{ m/s}$$

Si definisce ora l'intervallo di tempo N come il tempo di integrazione totale della misura, differente per ogni passaggio di treno. Entro tale intervallo, ogni livello di vibrazione L_j relativo ad 1 s è superiore a 10 dB:

$$L_j > 10\text{dB} \quad (23)$$

La condizione data dall'Eq. (23) significa che, al di fuori dell'intervallo di tempo N, il passaggio del treno genera livelli di vibrazione inferiori a 10 dB. Le vibrazioni sono state misurate durante il passaggio di un ETR500. L'ETR500 è un treno italiano ad alta velocità le cui caratteristiche sono:

- $M=620 \cdot 10^3 \text{ Kg}$;
- $T=328\text{m}$.

La storia temporale del livello di vibrazione misurato durante il passaggio di un ETR500 è mostrata in Fig. 4, per una velocità del treno pari a 150Km/h ed una distanza del punto di misura dalla ferrovia pari a 10 m; in questo caso, $N=20$.

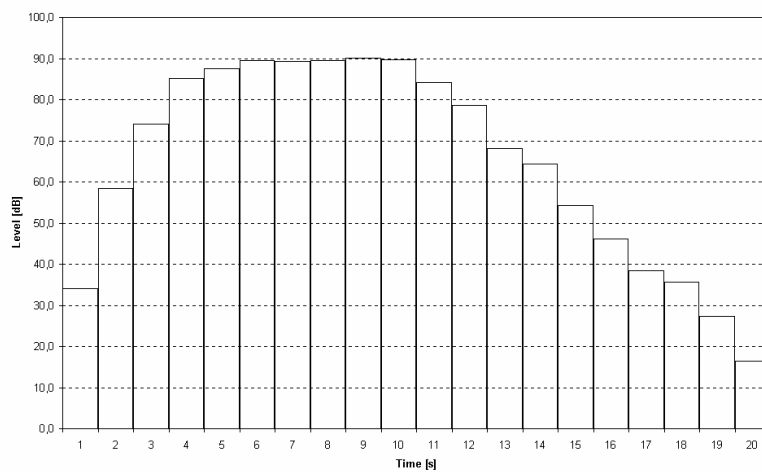


Fig. 4: storia temporale del livello di vibrazione dovuto al passaggio di un treno ETR500 (velocità del treno = 150Km/h, distanza del punto di misura dalla ferrovia = 10m)

Il suolo circostante il sito di misura è composto da arena compressa ad alta densità le cui caratteristiche sono $E=90 \cdot 10^6$ Pa e $\nu=0.2$ [23]. Le velocità r.m.s. misurate sono riportate in Tabella 1 per diversi valori della velocità del treno e della distanza del punto di misura dalla ferrovia.

Tabella 1: risultati delle misure. Valori delle velocità r.m.s. e dei livelli di vibrazione durante il passaggio di un ETR500

Distanza del punto di misura dalla ferrovia [m]	Velocità del treno [km/h]					
	100		150		200	
	10^{-5} [m/s]	$L \text{ [dB]}$	10^{-5} [m/s]	$L \text{ [dB]}$	10^{-5} [m/s]	$L \text{ [dB]}$
5	18.0	85.1	21.5	86.6	26.3	88.4
10	14.7	83.3	17.1	84.7	20.5	86.2
20	8.2	78.3	11.4	81.1	11.6	81.3
40	4.1	72.3	5.3	74.5	6.1	75.7

La calibrazione

Il modello è stato calibrato determinando il valore di K (vedi Eq.(1)) che eguaglia i risultati dati dal modello (il livello fornito dall'Eq. (17)) ai corrispondenti valori misurati. La calibrazione è stata eseguita ponendo il massimo spostamento verticale della rotaia $s=1 \cdot 10^{-2}$ m, ossia il massimo valore ammissibile [7]. Al variare della velocità del treno e della distanza dalla ferrovia, il valore di K che eguaglia i valori stimati dal modello a quelli misurati è diverso. Ogni valore di K è comunque molto vicino al suo valor medio \underline{K} (vedi Tabella 2). Di conseguenza, il modello può essere calibrato scegliendo:

$$K = \underline{K} = 2 \cdot 10^{-6} \quad (24)$$

In base alla Tabella 2, la differenza massima assoluta tra i valori di K ed il suo valor medio è $|K - \underline{K}|_{\max} = 3.0 \cdot 10^{-7}$, mentre la deviazione

standard dei valori di K è $\sigma_K=1.8 \cdot 10^{-7}$. Calibrando il modello in base alla relazione (24), l'errore massimo, in termini di livello di vibrazione stimato, è inferiore a 0.75 dB.

Tabella 2: valori di K che eguagliano i risultati dati dal modello a quelli ottenuti dalla campagna di misure

Distanza dalla ferrovia [m]	Velocità del treno [km/h]		
	100	150	150
	K	K	K
5	$1.9 \cdot 10^{-6}$	$1.8 \cdot 10^{-6}$	$2.0 \cdot 10^{-6}$
10	$2.2 \cdot 10^{-6}$	$2.0 \cdot 10^{-6}$	$2.2 \cdot 10^{-6}$
20	$1.7 \cdot 10^{-6}$	$2.2 \cdot 10^{-6}$	$1.7 \cdot 10^{-6}$
40	$1.9 \cdot 10^{-6}$	$2.1 \cdot 10^{-6}$	$2.1 \cdot 10^{-6}$
Media: $\underline{K} = 1.983 \cdot 10^{-6} \approx 2 \cdot 10^{-6}$ $\sigma_k = 1.8 \cdot 10^{-7}$ $ K - \underline{K} _{\max} = 3.0 \cdot 10^{-7}$			

In base alla precedente osservazione, si suppone che K sia lo stesso per ogni linea ferroviaria ad alta velocità; tale ipotesi è ammissibile perché i criteri realizzativi del ballast e del terrapieno sono gli stessi per ogni linea ferroviaria ad alta velocità [24].

2.4 VALIDAZIONE DEL MODELLO

Metodologia per la validazione del modello

I livelli stimati mediante il modello proposto sono stati confrontati con i risultati di campagne di misure condotte lungo le più importanti

linee ferroviarie europee ad alta velocità [25]. Le caratteristiche dei treni esaminati sono mostrate in Tabella 3. I dati relativi alle misure sono riportati in termini di livelli di vibrazione e sono disponibili per diverse condizioni di misura (distanza tra il punto di misura e la ferrovia, velocità del treno, tipologia di treno).

Tabella 3: *caratteristiche dei treni ad alta velocità di cui sono state valutate le vibrazioni indotte sul suolo circostante*

<i>Tipologia di treno</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Massa [Kg]</i>	<i>Lunghezza [m]</i>
Pendolino	Velocità massima: 250 Km/h Potenza totale: 6.24 MW Configurazione: 9 vagoni Paese: Italia	$450 \cdot 10^3$	236
EuroStar	Velocità massima: 300 Km/h Potenza totale: 12.2 MW Configurazione: 1 locomotiva + 18 vagoni + 1 locomotiva Paese: Francia	$770 \cdot 10^3$	394
TGV (Atlantique)	Velocità massima: 300 Km/h Potenza totale: 8.8 MW Configurazione: 1 locomotiva + 10 vagoni + 1 locomotiva Paese: Francia	$500 \cdot 10^3$	238
TGV (North)	Velocità massima: 300 Km/h Potenza totale: 8.8 MW Configurazione: 1 locomotiva + 10 vagoni + 1 locomotiva Paese: Francia	$400 \cdot 10^3$	200
X2000	Velocità massima: 210 Km/h Configurazione: 1 locomotiva, 3 vagoni passeggeri, 1 vagone ristorante e and 1 vagone cabina Paese: Svezia	$375 \cdot 10^3$	165

Il confronto tra i risultati forniti dal modello e dalle misure è stato effettuato assumendo che le linee ferroviarie ad alta velocità siano realizzate su un suolo compresso ad alta densità, le cui caratteristiche si suppone siano $E=90\cdot 10^6\text{Pa}$, $\rho=1.8\cdot 10^3\text{Kg/m}^3$ and $\alpha=0.06\text{ m}^{-1}$ [26]; tale ipotesi è stata assunta in virtù del fatto che non sono note le proprietà del suolo dove sono state effettuate le misure [25]. Inoltre, è possibile mostrare che i risultati forniti dal modello dipendono molto debolmente dal valore del rapporto di Poisson (l'errore massimo in termini di livello di vibrazione è inferiore a 0.2 dB se si assume $\nu=0.3$ invece che $\nu=0.18$); perciò, si può affermare che l'errore di stima dovuto ad una errata scelta del valore del rapporto di Poisson è trascurabile assumendo $\nu=0.2$ [27]. Sebbene le precedenti ipotesi sono sostenibili, è stata esaminata anche una condizione di caso peggiore in modo da individuare l'errore massimo di stima dei livelli di vibrazione nel caso in cui non è possibile assumere alcuna ipotesi sul tipo di suolo. Il caso peggiore si presenta quando la differenza tra il livello stimato e quello misurato è la massima possibile. Si può osservare (vedi Eq. (16), (18) e (20)) che il livello di vibrazione dipende dal modulo di Young e dalla densità del suolo in modo monotono decrescente; perciò, la massima differenza tra un livello stimato e quello misurato si verifica quando il modulo di Young e la densità del suolo assumono contemporaneamente i valori minimi ammissibili o, alternativamente, i valori massimi possibili. Inoltre, assumendo i valori minimi ammissibili per il modulo di Young e la densità del suolo, si

ottengono i valori più elevati dei livelli stimati. I valori minimi e massimi ammissibili per il modulo di Young e la densità del suolo sono $E_{min}=30 \cdot 10^6$ Pa, $\rho_{min} = 1.2 \cdot 10^3$ Kg/m³; $E_{max}=100 \cdot 10^6$ Pa, $\rho_{max}=2.3 \cdot 10^3$ Kg/m³ [27].

Risultati delle misure e validazione del modello

I livelli di vibrazione misurati, indotti sul suolo circostante dai più importanti treni ad alta velocità europei, sono riportati in Tabella 4. A causa delle differenti caratteristiche dei cinque treni esaminati, le misure dei livelli di vibrazione non sono state effettuate per la medesima velocità del treno ma per la velocità che generalmente caratterizza ciascun treno [28, 29]. Anche le distanze di misura sono diverse per ogni tipologia di treno.

I livelli di vibrazione stimati mediante il modello proposto sono riportati in Tabella 5. La stima è stata effettuata impiegando come dati di ingresso del modello le caratteristiche dei treni riportate in Tabella 3, nelle stesse condizioni geometriche e di velocità del treno utilizzate per le misure. Se si considera un suolo ad alta densità ($E=90 \cdot 10^6$ Pa, $\rho=1.8 \cdot 10^3$ Kg/m³) per ogni caso esaminato, le differenze tra livelli stimati e misurati sono molto piccole (vedi Tabella 5): la differenza media è $\Delta=1.0$ dB mentre la differenza massima tra un livello stimato ed il corrispondente livello misurato è $\Delta_{max}=2.5$ dB. Quando le proprietà del suolo sono note, gli errori di stima dovrebbero essere ancora più piccoli.

Tabella 4: livello di vibrazione misurato lungo alcune linee ferroviarie europee durante il passaggio di treni ad alta velocità [25].

Pendolino				
Distanza tra punto di misura e ferrovia [m]	Velocità [km/h]			
	240	200	160	
10	86.6	85.1	83.1	dB
25	81.4	79.2	77.2	
45	75.0	72.8	70.8	
Eurostar				
Distanza tra punto di misura e ferrovia [m]	Velocità [km/h]			
	260	200	160	
18	83.6	81.4	79.4	dB
25	81.4	79.2	77.2	
55	72.3	70.1	68.1	
TGV Atlantique				
Distanza tra punto di misura e ferrovia [m]	Velocità [km/h]			
	260	200	160	
25	81.4	79.2	77.2	dB
30	79.7	77.4	75.5	
100	59.6	57.3	55.4	
TGV North				
Distanza tra punto di misura e ferrovia [m]	Velocità [km/h]			
	260	200	160	
18	84.1	81.8	79.9	dB
25	81.8	79.6	77.6	
55	72.4	70.2	68.2	
X2000				
Distanza tra punto di misura e ferrovia [m]	Velocità [km/h]			
	190	160	120	
20	82.8	81.3	78.8	dB
40	76.5	75.0	72.5	
60	70.5	69.0	66.5	

Tabella 5: livelli di vibrazione stimati mediante il modello proposto relativi ad alcuni treni europei ad alta velocità. Differenza Δ tra livelli stimati e misurati

Pendolino						
Distanza tra punto di stima e ferrovia [m]	Velocità [km/h]					
	240		200		160	
	L [dB]	Δ [dB]	L [dB]	Δ [dB]	L [dB]	Δ [dB]
10	86.7	+0.1	85.9	+0.8	84.9	+1.8
25	81.4	+0.0	80.3	+1.1	79.3	+2.1
45	75.1	+0.1	73.9	+1.1	72.9	+2.1
Eurostar						
Distanza tra punto di stima e ferrovia [m]	Velocità [km/h]					
	260		200		160	
	L [dB]	Δ [dB]	L [dB]	Δ [dB]	L [dB]	Δ [dB]
18	84.0	+0.4	82.8	+1.4	81.9	+2.5
25	81.5	+0.1	80.4	+1.2	79.4	+2.2
55	72.2	- 0.1	71.0	+0.9	70.0	+2.2
TGV Atlantique						
Distanza tra punto di stima e ferrovia [m]	Velocità [km/h]					
	260		200		160	
	L [dB]	Δ [dB]	L [dB]	Δ [dB]	L [dB]	Δ [dB]
25	81.8	+0.4	80.7	+1.5	79.7	+2.5
30	80.2	+0.5	79.1	+1.7	78.0	+2.5
100	59.5	- 0.1	58.3	+1.0	57.3	+1.9
TGV North						
Distanza tra punto di stima e ferrovia [m]	Velocità [km/h]					
	260		200		160	
	L [dB]	Δ [dB]	L [dB]	Δ [dB]	L [dB]	Δ [dB]
18	84.1	+0.0	83.0	+1.2	82.0	+2.1
25	81.6	- 0.2	80.5	+0.9	79.5	+1.9
55	72.2	- 0.2	71.0	+0.8	70.1	+1.9
X2000						
Distanza tra punto di stima e ferrovia [m]	Velocità [km/h]					
	190		160		120	
	L [dB]	Δ [dB]	L [dB]	Δ [dB]	L [dB]	Δ [dB]
20	82.6	- 0.2	81.8	+0.5	80.6	+1.8
40	75.9	+0.6	75.0	+0.0	74.0	+1.5
60	69.9	- 0.6	69.1	+0.1	67.9	+1.4

Si può inoltre evidenziare come solo 6 dei 45 livelli stimati sono più bassi dei corrispondenti livelli misurati, a causa dell'approccio conservativo.

I livelli stimati nel caso peggiore sono riportati in Tabella 6. Si può dimostrare che il caso peggiore si verifica quando sia il modulo di Young che la densità del suolo assumono il minimo valore ammissibile: $E_{\min}=30 \cdot 10^6 \text{Pa}$, $\rho_{\min}=1.2 \cdot 10^3 \text{Kg/m}^3$ [27]. Nel caso peggiore, la media della differenza tra livelli stimati e misurati è $\Delta_{\text{wr}}=4.3\text{dB}$ mentre il valore massimo della differenza tra livelli stimati ed i corrispondenti livelli misurati è $\Delta_{\text{max,wr}}=5.8\text{dB}$. Ogni livello stimato riportato in Tabella 6 è più elevato del corrispondente livello misurato; perciò, a causa della dipendenza del livello di vibrazione dal modulo di Young e dalla densità del suolo (vedi Eq. (16),(18) e (20)), il caso peggiore costituisce anche il caso più conservativo.

Tabella 6: caso peggiore: livelli di vibrazione stimati mediante il modello proposto e differenza Δ tra valori stimati e misurati

Pendolino						
Distanza tra punto di stima e ferrovia [m]	Velocità [km/h]					
	240		200		160	
	L [dB]	Δ_{wr} [dB]	L [dB]	Δ_{wr} [dB]	L [dB]	Δ_{wr} [dB]
10	90.1	+3.5	89.2	+4.1	88.2	+5.1
25	84.7	+3.3	83.6	+4.4	82.6	+5.4
45	78.3	+3.3	77.2	+4.4	76.2	+5.4
Eurostar						
Distanza tra punto di stima e ferrovia [m]	Velocità [km/h]					
	260		200		160	
	L [dB]	Δ_{wr} [dB]	L [dB]	Δ_{wr} [dB]	L [dB]	Δ_{wr} [dB]
18	87.3	+3.7	86.1	+4.7	85.1	+5.7
25	84.8	+3.4	83.7	+4.5	82.7	+5.5
55	75.4	+3.1	74.3	+4.2	73.3	+5.2
TGV Atlantique						
Distanza tra punto di stima e ferrovia [m]	Velocità [km/h]					
	260		200		160	
	L [dB]	Δ_{wr} [dB]	L [dB]	Δ_{wr} [dB]	L [dB]	Δ_{wr} [dB]
25	85.1	+3.7	84.0	+4.8	83.0	+5.8
30	83.5	+3.8	82.3	+4.9	81.3	+5.8
100	62.7	+3.1	61.6	+4.3	60.6	+5.2
TGV North						
Distanza tra punto di stima e ferrovia [m]	Velocità [km/h]					
	260		200		160	
	L [dB]	Δ_{wr} [dB]	L [dB]	Δ_{wr} [dB]	L [dB]	Δ_{wr} [dB]
18	87.4	+3.3	86.2	+4.4	85.2	+5.3
25	84.9	+3.1	83.8	+4.2	82.8	+5.2
55	75.5	+3.1	74.4	+4.2	73.4	+5.2
X2000						
Distanza tra punto di stima e ferrovia [m]	Velocità [km/h]					
	190		160		120	
	L [dB]	Δ_{wr} [dB]	L [dB]	Δ_{wr} [dB]	L [dB]	Δ_{wr} [dB]
20	85.8	+3.0	85.1	+3.8	83.8	+5.0
40	79.2	+2.7	78.5	+3.5	77.2	+4.7
60	73.1	+2.6	72.4	+3.4	71.1	+4.6

3. MODELLO DI PREVISIONE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE DA VEICOLI SU STRADA NEL TERRENO

La stima dei livelli di accelerazione r.m.s. prodotti da veicoli su strada ad una determinata distanza prevede che siano modellati sia la sorgente di vibrazioni che i fenomeni di propagazione delle stesse.

3.1 MODELLAZIONE DELLA SORGENTE DI VIBRAZIONI

L'energia trasferita da un singolo veicolo (la sorgente di vibrazioni) al suolo è un fenomeno istantaneo governato da meccanismi complessi l'andamento dei quali è difficilmente identificabile. Perciò, si introduce la seguente ipotesi: ogni passaggio di un veicolo è considerato come un singolo evento. L'accelerazione r.m.s. dovuta ad un singolo evento ed il livello di vibrazione associato al singolo evento (SEVL – Single Event Vibration Level) in un dato punto di stima dipendono dalla tipologia del veicolo, dalla sua velocità e dalle caratteristiche del suolo. La dipendenza del SEVL dalle caratteristiche del suolo può essere trascurata se si considera una distanza breve del punto di stima dalla strada. Per una distanza d_0 tra il punto di stima e la mezzzeria della strada pari a 3 m (vedi Fig. 5), l'energia assorbita da un suolo compresso ad alta densità (caso piuttosto frequente) durante il percorso dalla sorgente al punto di stima è inferiore al 3% (vedi Eq. (27)).

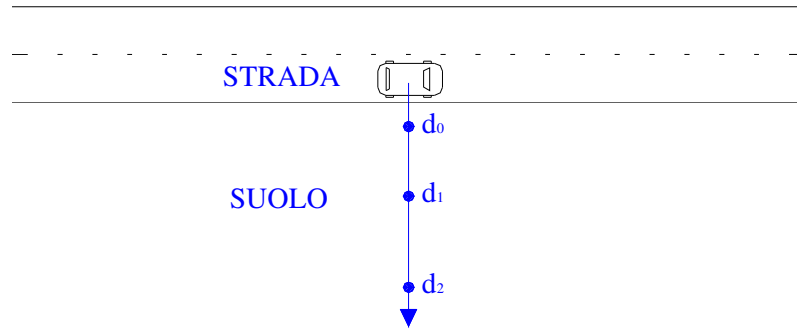


Fig. 5: *schema di riferimento del modello per veicoli su strada*

Perciò, l'accelerazione r.m.s. a distanza d_0 può essere rappresentata dalla seguente relazione:

$$a_0 = a_0 (\text{TYP}, v_v) \quad (25)$$

Il SEVL a distanza d_0 può essere scritto come segue [30]:

$$\text{SEVL}_0 = 10 \cdot \log \left(\frac{a_0}{a_{\text{ref}}} \right)^2 = \text{SEVL}_0 (\text{TYP}, v_v) \quad (26)$$

3.2 MODELLO DI PROPAGAZIONE

La propagazione delle onde vibrazionali è stata modellata adottando le seguenti ipotesi:

1. la strada è considerata come una sorgente emittente la cui lunghezza corrisponde alla lunghezza del veicolo [11].
2. L'energia vibrazionale è trasportata solo sulla superficie del suolo per mezzo di onde di Rayleigh poiché la loro ampiezza decresce esponenzialmente in direzione verticale, perpendicolarmente alla superficie del suolo. L'effetto delle onde primarie, secondarie e di Love è trascurato [15].
3. Ogni sorgente emette energia vibrazionale in superficie in modo omnidirezionale [16].

Se si considera il mezzo come non dissipativo, l'energia vibrazionale trasportata dalle onde di Rayleigh attraverso la superficie del suolo decresce proporzionalmente a $1/d$. In base alle ipotesi 1, 2 e 3, l'intensità media in un generico punto di stima P può essere ricavata calcolando la potenza che attraversa un cerchio di diametro unitario centrato nel punto P stesso:

$$J_d = \frac{W_d}{2 \cdot \pi \cdot d} \quad (27)$$

W_d rappresenta la potenza totale prodotta da una sorgente elementare, disponibile a distanza d dalla sorgente stessa. W_d può essere determinata come segue:

$$W_d = W_0 \cdot e^{-\alpha \cdot d} \quad (28)$$

Perciò, le intensità medie relative ad una distanza generica d ed a una distanza di riferimento d_0 sono:

$$J_d = \frac{W_0 \cdot e^{-\alpha \cdot d}}{2 \cdot \pi \cdot d} \quad (29)$$
$$J_0 = \frac{W_0 \cdot e^{-\alpha \cdot d_0}}{2 \cdot \pi \cdot d_0}$$

Si può quindi scrivere la seguente relazione:

$$\frac{J_d}{J_0} = e^{-\alpha \cdot (d-d_0)} \cdot \frac{d_0}{d} \quad (30)$$

Il valore assoluto dell'accelerazione r.m.s. si ottiene dalla seguente equazione [12]:

$$\frac{J_d}{J_0} = \frac{a_d^2}{a_0^2} \quad (31)$$

Perciò:

$$a_d = a_0 \cdot \sqrt{e^{-\alpha \cdot (d-d_0)} \cdot \frac{d_0}{d}} \quad (32)$$

e:

$$SEVL = 10 \cdot \log \left(\frac{a_d}{a_{ref}} \right)^2 ; \quad a_{ref} = 10^{-6} \text{ m/s}^2 \quad (33)$$

3.3 LA CAMPAGNA SPERIMENTALE DI MISURA PER L'INDIVIDUAZIONE DEL MODELLO DI PREVISIONE

Una campagna di misure è stata condotta allo scopo di:

- individuare i valori di $SEVL_0$ relativi a diverse tipologie di veicoli;
- confrontare i valori di SEVL ottenuti mediante il metodo proposto con quelli misurati al variare della velocità del veicolo, della tipologia dello stesso e della distanza tra punto di stima e strada.

Sono state individuate tre tipologie di veicoli:

- A) Automobili;
- B) Furgoni;
- C) Camion.

I punti di misura sono stati scelti lungo una strada rettilinea presso Terni; non sono presenti ponti, curve, incroci e fossati nelle vicinanze dei

punti di misura. Le vibrazioni sono state misurate al variare della velocità dei veicoli alle seguenti distanze dalla mezzzeria della strada:

- 3 m per l'individuazione di $SEVL_0$;
- 6, 7 e 10 m per il confronto tra i risultati forniti dal modello e quelli dati dalle misure.

Le componenti dell'accelerazione delle particelle del suolo sono state misurate per mezzo di accelerometri (modello PCB 393C, vedi Fig. 6).

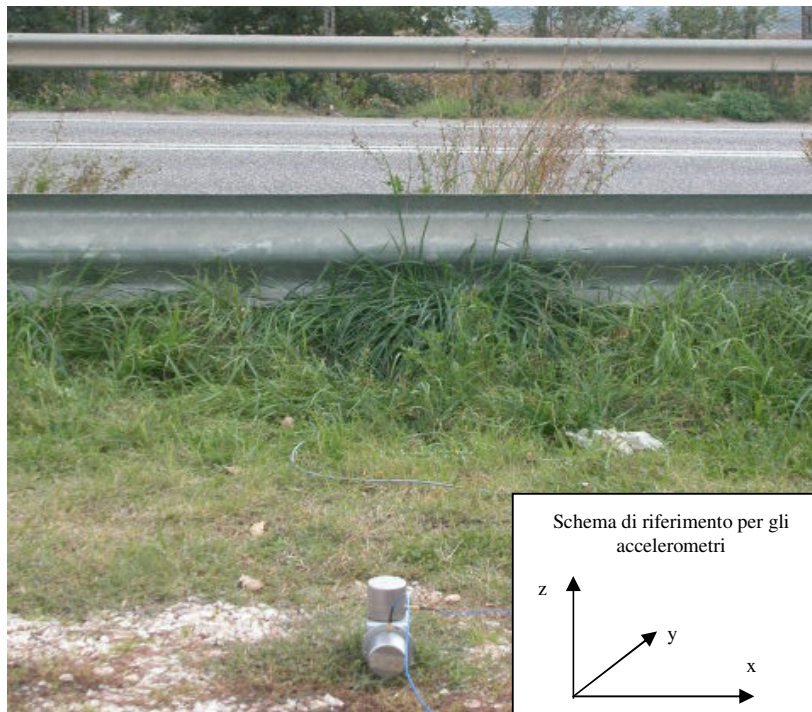


Fig. 6: *fotografia del sito di misura*

I segnali provenienti dagli accelerometri sono stati acquisiti ed elaborati per mezzo del sistema di acquisizione dati Symphonie della 01dB.

L'elaborazione dei segnali ha consentito di calcolare le componenti r.m.s. dell'accelerazione (a_x , a_y e a_z) dalla storia temporale delle accelerazioni istantanee indotte dai veicoli.

Il suolo del sito di misura è composto da arena compressa ad alta densità le cui caratteristiche sono $E=90 \cdot 10^6$ Pa e $\nu=0.2$ [6]. Il SEVL dovuto ad un singolo evento (il passaggio di un veicolo) è stato calcolato come segue:

$$\text{SEVL} = 10 \cdot \log\left(\frac{a}{a_{\text{ref}}}\right)^2 = 20 \cdot \log\left(\frac{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}}{a_{\text{ref}}}\right) \quad (34)$$

3.4 INDIVIDUAZIONE DEL MODELLO DELLA SORGENTE DI VIBRAZIONI

I risultati delle misure relative ad una distanza di 3 m dalla mezzzeria della strada sono riportati in Tabella 7 per le tipologie di veicoli A, B e C. In particolare, la Tabella 7 riporta le accelerazioni r.m.s. misurate ed i valori del SEVL_0 al variare della velocità dei veicoli.

Tabella 7: risultati delle misure per l'individuazione del $SEVL_0$

Tipologia di veicolo	Velocità del veicolo (km/h)	Valori di accelerazione r.m.s. misurati (m/s^2)	$SEVL_0$ misurato (dB)
A	72,4	0,001145	61,00
A	84,3	0,001407	62,98
A	87,0	0,001389	63,34
A	94,7	0,001634	64,24
A	96,5	0,001637	64,42
A	101,4	0,001797	64,90
A	102,4	0,001819	64,99
A	105,0	0,001967	65,22
A	109,9	0,001892	65,62
A	115,5	0,002045	66,04
A	127,9	0,002054	66,84
A	142,6	0,002369	67,61
B	65,0	0,003259	70,40
B	70,6	0,003767	71,77
B	72,5	0,003934	72,16
B	78,6	0,004665	73,27
B	84,2	0,005095	74,11
B	85,0	0,005352	74,22
B	91,0	0,005729	74,97
B	95,0	0,006071	75,42
B	101,2	0,006312	76,03
B	115,6	0,007156	77,19
B	120,5	0,007399	77,53
B	125,2	0,007789	77,82
C	55,1	0,003934	72,22
C	61,6	0,005868	74,80
C	65,5	0,006451	75,97
C	70,1	0,006956	77,09
C	71,7	0,007611	77,43
C	77,3	0,008411	78,49
C	78,1	0,008678	78,63
C	80,4	0,008845	78,99
C	86,6	0,009441	79,87
C	88,2	0,009873	80,07
C	90,1	0,010190	80,30
C	100,2	0,011895	81,37

I risultati hanno consentito di ricavare la seguente relazione per l'individuazione di $SEVL_0$:

$$a_0 = K \cdot \ln \left(\frac{v_v}{v_0} \right); \quad v_0 = 40 \text{ km/h} \quad (35)$$

dove

$$\begin{aligned} K &= 0.00189 \text{ m/s}^{-2} \text{ (tipologia A - automobile)} \\ K &= 0.00682 \text{ m/s}^{-2} \text{ (tipologia B - furgone)} \\ K &= 0.01275 \text{ m/s}^{-2} \text{ (tipologia C - camion)} \end{aligned} \quad (36)$$

SEVL può essere stimato a diverse distanze combinando le Eq. (32), (33) e (35):

$$SEVL = 20 \cdot \log \left(\frac{K \cdot \ln \left(\frac{v_v}{v_0} \right) \cdot \sqrt{e^{-\alpha \cdot (d-d_0)} \cdot \frac{d_0}{d}}}{a_{ref}} \right) \quad (37)$$

Perciò, il modello proposto consente di stimare il livello di vibrazione dovuto ad una strada ad una generica distanza conoscendo i flussi di traffico N_i relativi alle diverse tipologie di veicoli:

$$VL = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{SEVL_{car}}{10} \cdot N_{car}} + 10^{\frac{SEVL_{van}}{10} \cdot N_{van}} + 10^{\frac{SEVL_{truck}}{10} \cdot N_{truck}} \right) \quad (38)$$

3.5 VALIDAZIONE DEL MODELLO

Le Tabelle 8, 9 e 10 mostrano il confronto tra i valori di SEVL misurati e quelli ottenuti mediante il modello proposto per diverse distanze tra punto di stima e strada.

Tabella 8: confronto tra il metodo di stima proposto ed i risultati delle misure (tipologia di veicolo A)

Distanza tra punto di stima e strada (m)	Velocità del veicolo (km/h)	SEVL misurato (dB)	SEVL stimato (dB)	Δ (dB)
6	113,7	62,10	62,77	0,68
7	58,2	53,80	53,16	-0,65
7	62,2	54,31	54,58	0,27
7	75,9	57,56	57,81	0,25
7	86,8	59,34	59,46	0,11
7	88,0	59,96	59,62	-0,34
7	93,6	59,34	60,27	0,93
7	96,6	59,87	60,58	0,72
7	103,0	61,34	61,19	-0,15
7	127,9	62,48	62,98	0,50
10	73,0	55,19	55,58	0,39
10	95,1	58,33	58,75	0,42
10	118,0	59,87	60,68	0,81

In base alle Tabelle 8, 9 e 10, il massimo valore dell'errore di stima Δ è:

- inferiore a 1.0 dB (tipologia A - automobile);
- inferiore a 1.2 dB (tipologia B - furgone);
- inferiore a 1.5 dB (tipologia C - camion).

Gli errori di stima massimi relativi alla tipologia C sono superiori a quelli delle tipologie A e B. Ciò è dovuto al fatto che la massa di un camion è fortemente dipendente dal carico trasportato.

Tabella 9: *confronto tra il metodo di stima proposto ed i risultati delle misure (tipologia di veicolo B)*

Distanza tra punto di stima e strada (m)	Velocità del veicolo (km/h)	SEVL misurato (dB)	SEVL stimato (dB)	Δ (dB)
6	88,4	70,79	71,52	0,72
6	90,3	71,22	71,75	0,54
6	111,7	72,62	73,77	1,15
7	92,1	72,26	71,25	-1,02
7	95,6	72,38	71,63	-0,75
7	101,4	71,62	72,19	0,57
7	102,3	72,26	72,28	0,02
7	120,4	73,18	73,67	0,48
10	68,0	65,88	65,64	-0,24
10	70,5	65,37	66,21	0,84
10	72,1	66,14	66,55	0,41
10	91,6	68,69	69,51	0,82
10	99,6	70,04	70,35	0,31

Tabella 10: *confronto tra il metodo di stima proposto ed i risultati delle misure (tipologia di veicolo C)*

Distanza tra punto di stima e strada (m)	Velocità del veicolo (km/h)	SEVL misurato (dB)	SEVL stimato (dB)	Δ (dB)
6	62,1	70,94	71,84	0,90
6	110,1	78,78	79,08	0,30
6	73,8	73,30	74,72	1,42
7	69,9	73,51	73,20	-0,31
7	74,8	73,82	74,18	0,36
7	77,9	73,92	74,73	0,81
7	80,1	74,69	75,08	0,39
7	86,6	75,43	76,02	0,59
7	87,3	76,29	76,10	-0,20
7	95,4	76,45	77,04	0,59
10	70,4	70,94	71,62	0,69
10	82,7	73,51	73,79	0,29
10	92,6	74,69	75,05	0,36

4. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono stati proposti e verificati due modelli di previsione delle vibrazioni indotte sul suolo da carichi in movimento: un modello è relativo ai treni, l'altro ai veicoli su strada.

Il modello proposto per la stima delle vibrazioni prodotte dai treni fornisce le velocità r.m.s. ed i livelli di vibrazione indotti. Il modello è stato calibrato per mezzo di una campagna di misure condotta lungo una linea ferroviaria italiana ad alta velocità durante il passaggio di un ETR500. Il modello è stato confrontato con dati disponibili su misure dei livelli di vibrazione prodotti da treni ad alta velocità sulle più importanti linee ferroviarie europee. Il confronto tra valori stimati e misurati è stato effettuato senza la conoscenza sulle proprietà del suolo; dato che sono state considerate linee ad alta velocità, è stata assunta l'ipotesi di suolo compresso ad alta densità ($E=90 \cdot 10^6 \text{Pa}$, $\rho=1.8 \cdot 10^3 \text{Kg/m}^3$). La piccola differenza tra livelli stimati e misurati (differenza media $\underline{\Delta} = +1.0\text{dB}$, differenza massima $\Delta_{\text{max}} = +2.5\text{dB}$) costituisce un errore paragonabile a quello commesso da modelli più sofisticati [14]; l'impiego di tali modelli, contrariamente a quello proposto, richiede lunghi tempi di calcolo ed un elevato numero di dati di ingresso [14]. I risultati dati dal modello proposto giustificano inoltre le seguenti ipotesi, precedentemente assunte:

- il valore della costante di calibrazione K può essere considerato unico per ogni linea ferroviaria ad alta velocità;

- l'assunzione di suolo compresso ad alta densità per ogni linea ferroviaria ad alta velocità è sostenibile se non sono disponibili dati specifici sul suolo.

Inoltre, la conoscenza di dati specifici sulle proprietà del suolo potrebbe consentire stime più accurate. Se non sono possibili ipotesi sulle proprietà del suolo, il modello proposto può essere impiegato nella condizione di caso peggiore, che si verifica quando il modulo di Young e la densità del suolo assumono il minimo valore ammissibile ($E=30 \cdot 10^6 \text{Pa}$, $\rho=1.2 \cdot 10^3 \text{Kg/m}^3$): in questo caso, il modello fornisce i più elevati livelli di vibrazione stimati. Paragonando i livelli stimati nel caso peggiore a quelli misurati, l'errore massimo commesso dal modello è +5.8dB (livello stimato meno livello misurato). Tale valore può essere considerato ammissibile come primo approccio (Survey Method) per una stima delle vibrazioni; infatti, i livelli stimati nel caso peggiore rappresentano un limite superiore ai livelli effettivi prodotti, date le ipotesi conservative adottate.

Il metodo proposto per la stima dei livelli di vibrazione prodotti da veicoli su strada fornisce i livelli di vibrazione dovuti alla strada dati i flussi di traffico e le velocità dei veicoli. Il metodo è basato sulla determinazione dei livelli di vibrazione associati al singolo evento (SEVL), ossia al passaggio di un veicolo. La sorgente di vibrazioni è stata modellata mediante una campagna di misure. I risultati delle misure hanno mostrato che i valori delle accelerazioni r.m.s dipendono dalla

velocità del veicolo attraverso una relazione logaritmica. L'espressione dei SEVL ad una distanza di riferimento pari a 3 m dalla strada è stata individuata relativamente a tre tipologie di veicoli (automobili, furgoni e camion). Un modello di propagazione simile a quello già proposto per i treni consente poi di stimare i valori dei SEVL a diverse distanze. I valori stimati sono stati confrontati con quelli ottenuti mediante la campagna di misure. I risultati hanno mostrato un errore massimo di stima pari a 1.5 dB.

5. LISTA DEI SIMBOLI

Simbolo	Unità di misura	Descrizione
a_d	$m \cdot s^{-2}$	Accelerazione r.m.s. a distanza d
a_0	$m \cdot s^{-2}$	Accelerazione r.m.s. alla distanza di riferimento d_0
a_{ref}	$m \cdot s^{-2}$	Valore di riferimento dell'accelerazione
a_x	$m \cdot s^{-2}$	Componente x dell'accelerazione r.m.s.
a_y	$m \cdot s^{-2}$	Componente y dell'accelerazione r.m.s.
a_z	$m \cdot s^{-2}$	Componente z dell'accelerazione r.m.s.
α	m^{-1}	Costante di dissipazione del suolo
C	adimensionale	Costante relativa alla velocità di propagazione delle onde di Rayleigh
c_R	$m \cdot s^{-1}$	Velocità di propagazione delle onde di Rayleigh
D_{max}	$J \cdot m^{-2}$	Densità di energia vibrazionale massima
d	m	Distanza minima tra la ferrovia ed il punto di stima
d	m	Distanza tra punto di stima e mezzeria della strada
d_0	m	Distanza di riferimento tra punto di stima e mezzeria della strada
$\underline{\Delta}$	dB	Valore medio della differenza tra livelli stimati e misurati
Δ_{max}	dB	Valore massimo della differenza tra livelli stimati e misurati
$\Delta_{max,wr}$	dB	Caso peggiore: valore massimo della differenza tra livelli stimati e misurati
$\underline{\Delta}_{wr}$	dB	Caso peggiore: valore medio della differenza tra livelli stimati e misurati
E	Pa	Modulo di Young del suolo

Modelli di previsione delle vibrazioni indotte da treni e veicoli su strada nel terreno

E_{\max}	Pa	Valore massimo del modulo di Young del suolo
E_{\min}	Pa	Valore minimo del modulo di Young del suolo
e	$J \cdot m^{-1}$	Energia trasferita dal treno al sistema ballast-terrapieno per unità di lunghezza
G	Pa	Modulo di elasticità torsionale del suolo
g	$m \cdot s^{-2}$	Accelerazione di gravità
i	m	Distanza tra due traversine consecutive
J_d	$W \cdot m^{-1}$	Intensità di vibrazione media trasferita dal veicolo su strada al suolo circostante a distanza d
J_0	$W \cdot m^{-1}$	Intensità di vibrazione media trasferita dal veicolo su strada al suolo circostante a distanza d_0
J_{\max}	$W \cdot m^{-1}$	Intensità di vibrazione media trasferita quando la posizione del treno è simmetrica rispetto ad una linea perpendicolare che passa per il punto di stima
J_r	$W \cdot m^{-1}$	Intensità di vibrazione media trasferita dal treno al suolo circostante a distanza r
K	adimensionale	Costante di calibrazione del modello relativo ai treni
K	$m \cdot s^{-2}$	Costante di calibrazione del modello di propagazione delle vibrazioni indotte da veicoli su strada
\underline{K}	adimensionale	Valor medio della costante di calibrazione del modello relativo ai treni
$ K - \underline{K} _{\max}$	adimensionale	Differenza massima assoluta tra K e \underline{K}
L	dB	Livello di vibrazione assoluto

Modelli di previsione delle vibrazioni indotte da treni e veicoli su strada nel terreno

L_j	dB	Livello di vibrazione riferito ad un intervallo di 1 s
M	Kg	Massa totale del treno
m	$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-1}$	Massa specifica del treno
N	adimensionale	Numero di intervalli da 1 s in cui sono generate vibrazioni quando il treno attraversa l'area circostante il punto di stima
N_i	adimensionale	Flusso di traffico dovuto alla tipologia i-esima di veicolo
p	m	Distanza tra $x=0$ ed il punto di stima (vedi Fig.1)
r	m	Distanza tra un punto sulla superficie del suolo ed un punto che rappresenta la sorgente
ρ	$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Densità del suolo
ρ_{\max}	$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Valore massimo della densità del suolo
ρ_{\min}	$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Valore minimo della densità del suolo
ρ_s	$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2}$	Densità superficiale del suolo
SEVL	dB	Livello di vibrazione associato al singolo evento
SEVL_i	dB	Livello di vibrazione associato al singolo evento dovuto alla i-esima tipologia di veicolo
SEVL_0	dB	Livello di vibrazione associato al singolo evento alla distanza di riferimento d_0
s	m	Spostamento massimo verticale della ferrovia
σ_K	adimensionale	Deviazione standard di K
T	m	Lunghezza del treno
TYP	acronimo	Tipologia di veicolo
u	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Velocità r.m.s. delle particelle del suolo

Modelli di previsione delle vibrazioni indotte da treni e veicoli su strada nel terreno

u_j	$m \cdot s^{-1}$	Velocità r.m.s. delle particelle del suolo riferita ad un intervallo di 1 s
u_{ref}	$m \cdot s^{-1}$	Valore di riferimento della velocità delle particelle del suolo
u_x	$m \cdot s^{-1}$	Componente x della velocità r.m.s. delle particelle del suolo
$u_{x,j}$	$m \cdot s^{-1}$	Componente x della velocità r.m.s. delle particelle del suolo riferita ad un intervallo di 1 s
u_y	$m \cdot s^{-1}$	Componente y della velocità r.m.s. delle particelle del suolo
$u_{y,j}$	$m \cdot s^{-1}$	Componente y della velocità r.m.s. delle particelle del suolo riferita ad un intervallo di 1 s
u_z	$m \cdot s^{-1}$	Componente z della velocità r.m.s. delle particelle del suolo
$u_{z,j}$	$m \cdot s^{-1}$	Componente z della velocità r.m.s. delle particelle del suolo riferita ad un intervallo di 1 s
ν	adimensionale	Rapporto di Poisson del suolo
VL	dB	Livello di vibrazione dovuto ad una strada
v_T	$m \cdot s^{-1}$	Velocità del treno
v_v	$m \cdot s^{-1}$	Velocità del veicolo su strada
$v_{x,j}$	$m \cdot s^{-1}$	Componente x della velocità istantanea delle particelle del suolo
$v_{y,j}$	$m \cdot s^{-1}$	Componente y della velocità istantanea delle particelle del suolo
$v_{z,j}$	$m \cdot s^{-1}$	Componente z della velocità istantanea delle particelle del suolo
W_d	W	Potenza trasferita dal veicolo su strada al suolo circostante a distanza d

Modelli di previsione delle vibrazioni indotte da treni e veicoli su strada nel terreno

W_0	W	Potenza trasferita dal treno o dal veicolo su strada al suolo circostante
W_r	W	Potenza trasferita dal treno al suolo circostante a distanza r
W_{r+dr}	W	Potenza trasferita dal treno al suolo circostante a distanza $r+dr$
W_T	W	Potenza trasferita dal treno al sistema ballast-terrapieno
w_T	$W \cdot m^{-1}$	Potenza trasferita dal treno al sistema ballast-terrapieno per unità di lunghezza
x	m	Porzione di treno

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] U.S. Department of Transportation, “Transit Noise and Vibration Impact Assessment”, Federal Transit Administration, Report DOT-T-95-16, April 1995.
- [2] Crone A, Astrup T, Finne P., “Prediction of Vibrations and Structure-Borne Noise from Railways”, InterNoise 99, Florida, USA, 1999.
- [3] Ekevid T, Li M.X.D, Wiberg N., “Adaptive Finite Element Analysis of Wave Propagation Under Moving Loads Induced by High Speed Trains”, ECCOMAS 2000, Barcelona, September 2000.
- [4] Takemiya H., “Simulation for Vibration Prediction and Mitigation of Track-Ground due to Highspeed Trains - Case of X-2000 in Sweden –“, Informal Workshop at Royal Institute of Technology, Sweden, July 23, 2001.
- [5] Richert F.E, Hall J.R., “Vibrations of Soils and Foundations. Prentice-Hall Inc.”, Englewood Cliffs, NJ, 1970.
- [6] Lai C.G, Callerio A, Faccioli E, Martino A., “Mathematical Modeling of Railway-Induced Ground Vibrations”, WAVE 2000, Bochum, Germany, December 2000.
- [7] Heelis M.E, Collop A.C, Dawson A.R, Chapman D.N, Krylov V., “Predicting and Measuring Vertical Track Displacements on Soft Subgrades”, Railway Engineering 99, London, May 1999.
- [8] Fryba L., “Vibration of Solids and Structures under Moving Loads”,

Telford, London, 1999.

- [9] Fortin J.P., “Dynamic Track Deformation. French Railway Review”, Vol. 1, 1983.
- [10] Takemiya H., “Prediction of Ground Vibration Induced by High-Speed Train Operation”, 18th Sino-Japan Technology Seminar, Taipei, Taiwan, 1997.
- [11] Le Houdec D., “Modelling and Analysis of Ground Vibration Problems: a Review.”, Civil and Structural Engineering Computing, Chapter 19, 2001.
- [12] Hunt H.E.M., “Measurement and Modelling of Traffic Induced Ground Vibration”, Ph.D. Thesis, Cambridge University, England, 1988.
- [13] Gutowski T.G, Wittig L.E, Dym C.L., “Some Aspects of the Ground Vibration Problem”, Noise Control Engineering, vol. 10:3, 1978.
- [14] Hung H, Yang Y., “A Review of Researches on Ground-Borne Vibrations with Emphasis on Those Induced by Trains”, Proc. Natl. Sci. Counc., Vol. 25, No.1, 2001.
- [15] Krylov V.V, Dawson A.R, Heelis M.E, Collop A.C., “Rail Movement and Ground Waves Caused by High-Speed Trains Approaching Track-Soil Critical Velocities”, Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 14, Part F, 2000.
- [16] Beranek L.L., “Noise and Vibration Control”, edited by L.L. Beranek, 1988.

- [17] DeGrande G., “Free Field Vibration Measurements during the Passage of a Thalys High Speed Train”, Katholieke Universiteit Leuven, Report BWM-2000-06, 2002.
- [18] Moncada Lo Giudice G, Santoboni S., “Acustica”, Masson Editoriale, 1995.
- [19] Spagnolo R., “Manuale di Acustica”, UTET Libreria, Torino, 2001.
- [20] Timoshenko S.P., “Theory of Elasticity”, Mc Graw Hill Inc., USA, 1970.
- [21] Geo Space, “Geo Space Geophones GS-30CT & GS-32CT”, www.geospacelp.com/g30ct.htm, 2002.
- [22] DASYTec, “DASYLab User Guide“, www.dasytec.com, 2001.
- [23] Damiani A.V, Minelli G, Pialli G., “L'Unita' Falterona - Trasimeno nell'area compresa fra la Val di Chiana e la Valle Tiberina: Sezione Terontola - Abbazia di Cassiano”, Carta Geologica, Studi Geologici Camerti, 2000.
- [24] Heelis M.E, Collop A.C, Dawson A.R, Chapman D.N, Krylov V., “Resilient Modulus of Soft Soil Beneath High Speed Rail Lines”, Transportation Research Board 99, Washington D.C., January 1999.
- [25] U.S. Department of Transportation, “High Speed Ground Transportation – Noise and Vibration Impact Assessment”, Federal Railroad Administration, Report N. 293630-1, December 1998.
- [26] Amick H., “A Frequency-Dependent Soil Propagation Model”, SPIE Conference on Current Development in Vibration Control for Optomechanical Systems, Denver, Colorado, July 1999.

- [27] Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J., “The Rock Physics Handbook”, Cambridge Univ. Press, 1998.
- [28] Strohl M.P., “Europe’s High Speed Trains”, 1993.
- [29] Saurenman H.J, Nelson J.T, Wilson G.P., “Handbook of Urban Rail Noise and Vibration Control”, prepared under contract to US DOT/Transportation System Center, Report UMTA-MA-06-0099-82-2, February 1982.
- [30] Beranek L.L., Ver I.L., “Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications”, Interscience, 1992.
- [31] Piali G., “Carta Geologica dell’Umbria”, 1995.

APPENDICE: NORMATIVE TECNICHE

A.1 UNI 9614

La norma UNI 9614 “Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo” definisce il metodo di misura delle vibrazioni di livello costante immesse negli edifici ad opera di sorgenti esterne o interne agli edifici stessi. Le vibrazioni trasmesse negli edifici sono classificate in tre tipologie:

- di livello costante, quando il livello dell’accelerazione complessiva ponderata in frequenza rilevato mediante la costante di tempo “slow” (1 s) varia nel tempo in un intervallo di ampiezza inferiore a 5 dB;
- di livello non costante, quando il livello suddetto varia nel tempo in un intervallo di ampiezza superiore a 5 dB;
- impulsive, quando danno luogo ad un rapido innalzamento del livello di accelerazione sino ad un valore massimo seguito da un decadimento che può causare una serie di oscillazioni della struttura che si estinguono nel tempo.

Le direzioni lungo le quali si propagano le vibrazioni vengono riferite alla postura assunta dal soggetto esposto. Gli assi di riferimento x, y e z sono definiti nel seguente modo (vedi Figura A.1):

- asse z, passante per il coccige e la testa;
- asse x, passante per la schiena ed il petto;
- asse y: passante per le due spalle.

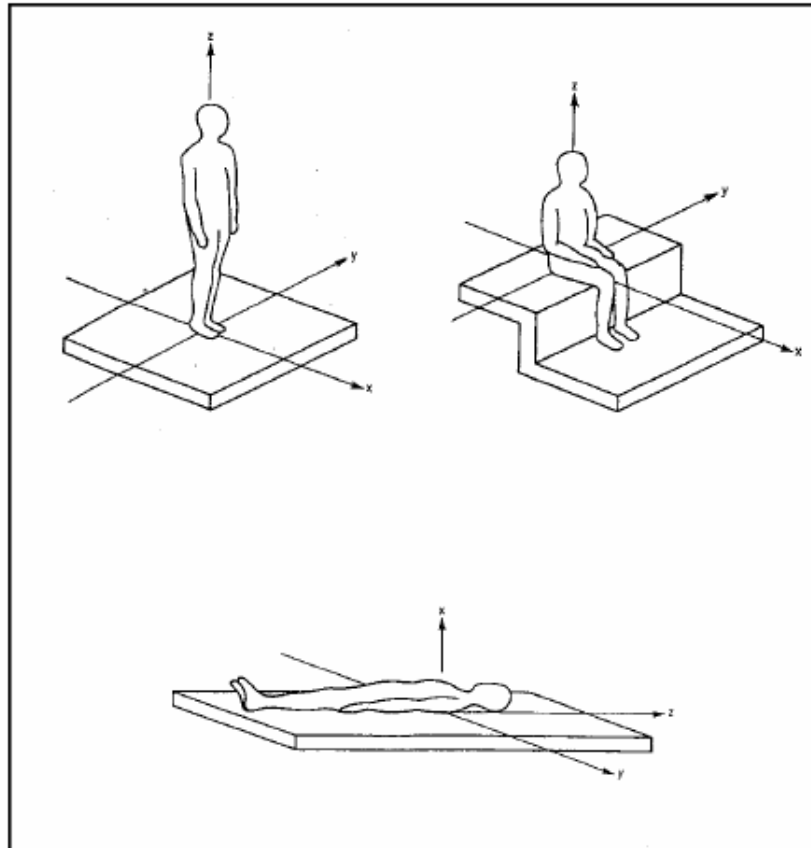


Fig. A.1: *direzioni delle vibrazioni e posizioni dei rilievi*

I locali o gli edifici in cui vengono immesse le vibrazioni vengono classificati a seconda della loro destinazione d'uso in aree critiche, abitazioni, uffici o fabbriche. Le vibrazioni di livello costante vanno

caratterizzate misurando il valore r.m.s. dell'accelerazione (in m/s^2) o il corrispondente livello (in dB), secondo la seguente espressione:

$$L = 20 \log(a/a_0) \quad (\text{A.1})$$

dove a è il valore r.m.s. dell'accelerazione, mentre $a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$. Gli effetti delle vibrazioni di frequenza diversa sono cumulativi per cui va impiegato un metodo di misura basato sulla valutazione delle accelerazioni nell'intervallo 1-80 Hz. Dato che gli effetti prodotti dalle vibrazioni sono differenti a seconda della frequenza delle accelerazioni, vanno impiegati dei filtri che le ponderano a seconda del loro effetto sul soggetto esposto (vedi Fig. A.2). In alternativa, è possibile effettuare un'analisi dell'accelerazione in terzi di ottava nell'intervallo 1-80 Hz, sottraendo ai livelli riscontrati banda per banda una quantità pari a quella definita dall'attenuazione dei filtri di ponderazione.

L'Appendice A della UNI 9614 (che non rappresenta peraltro parte integrale della norma) fornisce informazioni sui criteri di valutazione della risposta soggettiva alle vibrazioni. Nel caso di vibrazioni di livello costante, sono riportati i valori limite delle accelerazioni r.m.s. e dei livelli relativamente agli assi x, y e z (vedi Tabelle A.1 e A.2). Il giudizio sull'accettabilità del disturbo oggettivamente riscontrato dovrà ovviamente tener conto di fattori quali la frequenza con cui si verifica il fenomeno vibratorio e la sua durata.

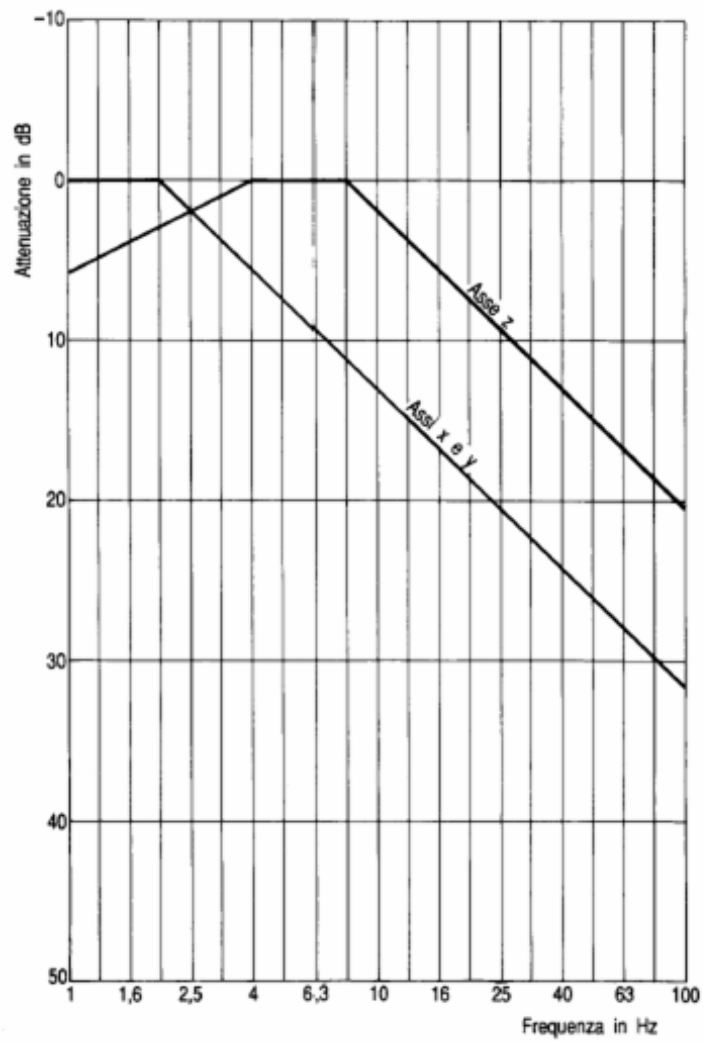


Fig. A.2: *filtri di ponderazione*

Tabella A.1: valori e livelli limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza validi per l'asse z

Tipo di locale o edificio	a (m/s²)	L (dB)
<i>aree critiche</i>	$5.0 \cdot 10^{-3}$	74
<i>abitazioni (notte)</i>	$7.0 \cdot 10^{-3}$	77
<i>abitazioni (giorno)</i>	$10.0 \cdot 10^{-3}$	80
<i>uffici</i>	$20.0 \cdot 10^{-3}$	86
<i>fabbriche</i>	$40.0 \cdot 10^{-3}$	92

Tabella A.2: valori e livelli limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza validi per gli assi x e y

Tipo di locale o edificio	a (m/s²)	L (dB)
<i>aree critiche</i>	$3.6 \cdot 10^{-3}$	71
<i>abitazioni (notte)</i>	$5.0 \cdot 10^{-3}$	74
<i>abitazioni (giorno)</i>	$7.2 \cdot 10^{-3}$	77
<i>uffici</i>	$14.4 \cdot 10^{-3}$	83
<i>fabbriche</i>	$28.8 \cdot 10^{-3}$	89

Le Tabelle A.1 e A.2 sono valide anche per la definizione dei limiti relativi alle vibrazioni di livello non costante, che possono essere misurate rilevando, in un intervallo di tempo rappresentativo, l'accelerazione equivalente ($a_{w,eq}$) o il livello equivalente dell'accelerazione ($L_{w,eq}$), così definiti:

$$a_{w,eq} = \left[(1/T) \cdot \int_0^T [a_w(t)]^2 dt \right]^{0.5} \quad (A.2)$$

$$L_{w,eq} = 10 \cdot \log \left[(1/T) \cdot \int_0^T [a_w(t)/a_0]^2 dt \right]^{0.5}$$

dove: $a_w(t)$ è l'accelerazione complessiva ponderata in frequenza espressa in m/s^2 ; T è la durata del rilievo espresso in secondi; a_0 è l'accelerazione di riferimento ($10^{-6} m/s^2$). Per le vibrazioni impulsive si deve confrontare il valore di picco dell'accelerazione moltiplicato per 0.71 o il livello di picco diminuito di 3 dB con quelli riportati in Tabella A.3.

Tabella A.3: valori limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza validi per le vibrazioni impulsive

Tipo di locale o edificio	asse z (m/s^2)	assi x e y (m/s^2)
aree critiche	$5.0 \cdot 10^{-3}$	$3.6 \cdot 10^{-3}$
abitazioni (notte)	$7.0 \cdot 10^{-3}$	$5.0 \cdot 10^{-3}$
abitazioni (giorno)	0.30	0.22
uffici e fabbriche	0.64	0.46

Nel caso si manifestino più di 3 eventi impulsivi giornalieri i limiti fissati per le abitazioni (di giorno), gli uffici e le fabbriche vanno diminuiti in base al numero di eventi e alla loro durata, moltiplicandoli

per un fattore correttivo F. Nessuna riduzione può essere applicata per le aree critiche e per le abitazioni di notte. Nel caso di impulsi di durata inferiore a 1 s si deve porre $F = 1.7 \cdot N^{-0.5}$. Per impulsi di durata maggiore si deve porre $F = 1.7 \cdot N^{-0.5} \cdot t^{-k}$, con $k = 1.22$ per pavimenti in calcestruzzo e $k = 0.32$ per pavimenti in legno (N è il numero di eventi giornalieri). Qualora i limiti così calcolati risultassero inferiori ai limiti previsti per le vibrazioni di livello stazionario, dovranno essere adottati questi ultimi valori. Infine, nel caso di vibrazioni prodotte da veicoli ferroviari e immesse nelle abitazioni, sono indicati come riferimento i valori $30.0 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$ (asse z) e $21.6 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$ (assi x e y).

A.2 UNI 9916

La norma UNI 9916 “Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici” fornisce una guida per la scelta di appropriati metodi di misura, di trattamento dei dati e di valutazione dei fenomeni vibratorii allo scopo di permettere anche la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici. Altro scopo della norma è di ottenere dati comparabili sulle caratteristiche delle vibrazioni rilevate in tempi diversi su uno stesso edificio, o su edifici diversi a parità di sorgente di eccitazione, nonché di fornire criteri di valutazione degli effetti delle vibrazioni medesime. Sono considerate diverse tipologie di sorgente di vibrazioni, distinte in interne (movimenti umani, macchinari rotante o alternativi, macchinari impulsivi, mezzi in movimento) o esterne (vento, traffico, attività di costruzione esterne, esplosione di mine). La sorgente,

dal punto di vista delle eccitazioni prodotte, è inoltre caratterizzata dal tipo, dalla durata e dalla distribuzione spettrale dell'eccitazione.

I tipi di eccitazione si distinguono secondo le caratteristiche del moto vibratorio ed il tipo di sorgente generatrice. In relazione alle caratteristiche del moto vibratorio, si possono individuare:

- sorgenti deterministiche, descrivibili con equazioni matematiche;
- sorgenti non deterministiche (aleatorie), ossia eccitazioni casuali descrivibili solo in termini statistici.

In relazione alle caratteristiche della sorgente, si possono individuare:

- eccitazioni ambientali, attribuite ad una sorgente appartenente all'ambiente in cui la struttura è inserite (es. vento, traffico);
- eccitazioni forzate, introdotte mediante eccitatori singoli o multipli allo scopo di studiare le caratteristiche dinamiche dell'edificio.

L'eccitazione può essere inoltre classificata, in relazione alla durata, come continua o transitoria, in termini della costante di durata T_r della risposta di un edificio in condizioni di risonanza:

$$T_r = 1/(2 \cdot \pi \cdot \zeta_r \cdot f_r) \quad (\text{A.3})$$

dove f_r è la frequenza di risonanza, ζ_r il coefficiente di smorzamento associato a f_r , r è l'indice della risonanza strutturale. L'eccitazione è definita continua se agisce sull'edificio continuativamente

per una durata superiore a $5T_1$, dove la costante di durata T_1 è associata alla frequenza più bassa stimata dell'edificio (f_1). Alternativamente, l'eccitazione si definisce transitoria.

Per quanto riguarda la caratterizzazione di una sorgente di eccitazione in base alla sua distribuzione spettrale, in Tabella A.4 sono riportate le gamme di frequenza di interesse per vari tipi di eccitazioni.

Tabella A.4: *gamme di frequenza caratteristiche di diverse sorgenti di vibrazioni*

Tipo di sorgente	Gamma di frequenza (Hz)
<i>Traffico (su strada e rotaia)</i>	da 1 a 80
<i>Esplosioni</i>	da 1 a 300
<i>Battitura di pali</i>	da 1 a 100
<i>Macchine esterne all'edificio</i>	da 1 a 300
<i>Macchine interne all'edificio</i>	da 1 a 1000
<i>Attività umana interessanti indirettamente l'edificio</i>	da 0.1 a 100
<i>Attività umana interessanti direttamente l'edificio</i>	da 0.1 a 12
<i>Vento</i>	da 0.1 a 10

La risposta di un edificio o di suoi elementi strutturali sottoposti ad eccitazione dinamica dipende, oltre che dalla distribuzione spettrale dell'eccitazione stessa, anche dalle caratteristiche dinamiche dell'edificio. Queste sono influenzate fra l'altro dalla tipologia strutturale dell'edificio, di cui l'appendice A contiene una classificazione secondo la probabile

reazione alle vibrazioni meccaniche trasmesse attraverso il terreno. La classificazione viene effettuata in base ai seguenti fattori:

- tipo di costruzione;
- tipo di fondazione;
- tipo di terreno;
- fattori di importanza sociale.

Le strutture comprese nella classificazione riguardano:

- tutti gli edifici residenziali e gli edifici utilizzati per le attività professionali (case, uffici, ospedali, case di cura, ecc.);
- gli edifici pubblici (municipi, chiese, ecc.);
- edifici vecchi ed antichi con un valore architettonico, archeologico e storico;
- le strutture industriali più leggere spesso concepite secondo le modalità costruttive in uso per gli edifici abitativi.

Mentre non sono considerate le seguenti strutture:

- strutture con più di dieci piani;
- strutture più pesanti, come i reattori nucleari e le loro parti accessorie ed altri impianti di potenza pesanti, i laminatoi, le strutture dell'industria chimica pesante, tutti i tipi di sbarramento e le strutture contenenti liquidi e materiali granulari (per esempio serbatoi e cisterne), le strutture per lo stoccaggio del petrolio, i silos ecc.;
- tutte le strutture sotterranee;
- tutte le strutture marittime.

La categoria di struttura è classificata in una scala da 1 a 8 (a numero crescente di categoria corrisponde una minore resistenza alle vibrazioni) in base ad una ripartizione in due gruppi di edifici: edifici vecchi e antichi o strutture costruite con criteri tradizionali (Gruppo 1) e edifici e strutture moderne (Gruppo 2). L'associazione della categoria viene fatta risalire alle caratteristiche tipologiche e costruttive della costruzione e al numero di piani (vedi Tabella A.5).

Le fondazioni sono classificate in tre classi:

- Classe A: pali legati in calcestruzzo armato e acciaio; platee rigide in calcestruzzo armato ed in acciaio; pali di legno legati tra loro; muri di sostegno a gravità.
- Classe B: pali non legati in cemento armato; fondazioni continue (a trave rovescia); pali e platee in legno.
- Classe C: i muri di sostegno leggeri; fondazioni massicce in pietra; assenza di fondazioni, muri appoggiati direttamente sul terreno.

Il terreno viene infine classificato in sei classi:

- tipo a: rocce non fessurate o rocce molto solide, leggermente fessurate o sabbie cementate;
- tipo b: terreni compattati a stratificazione orizzontale;
- tipo c: terreni poco compattati a stratificazione orizzontale;
- tipo d: piani inclinati, con superficie di scorrimento potenziale;
- tipo e: terreni granulari, sabbie, ghiaie (senza coesione) e argille coesive sature;
- tipo f: materiale di riporto.

Tabella A.5: categorie di strutture e gruppi di edifici

Categorie di strutture		Gruppi di edifici	
		1	2
← Resistenza decrescente alle vibrazioni	1	Costruzioni industriali pesanti da cinque a sette piani, di tipo resistente ai terremoti. Strutture pesanti, compresi ponti, fortezze, bastioni.	Costruzioni industriali ad ossatura pesante di due o tre piani costruiti in cemento armato oppure a struttura metallica con rivestimento di fogli o pannelli di tamponamento costruiti di pietre, mattoni o di elementi prefabbricati di acciaio, solai in acciaio o in calcestruzzo prefabbricato o gettato in opera. Costruzioni industriali pesanti in acciaio o calcestruzzo armato con struttura composita.
	2	Edifici pubblici pesanti ad ossatura in legno, di tipo resistente ai terremoti.	Immobili da cinque a nove piani e più, uffici, ospedali, costruzioni industriali ad ossatura leggera in calcestruzzo armato od a struttura in acciaio con pannelli di tamponamento in pietre, mattoni o elementi prefabbricati non concepiti per resistere ai terremoti.
	3	Case di uno o due piani a ossatura in legno e costruzioni di uso similare, con tamponamenti e/o rivestimenti di tipo resistente ai terremoti.	Costruzioni industriali abbastanza leggere di tipo aperto ad un solo piano, giunti per tramezzi, ossatura in acciaio, alluminio, in legno o in calcestruzzo con rivestimenti in foglio leggero e tamponamenti in pannelli leggeri di tipo resistente ai terremoti.
	4	Costruzioni a più piani, abbastanza pesanti utilizzate come magazzini di media importanza o come abitazione da cinque a sette piani o più.	Abitazioni a due piani e costruzioni di utilizzo similare costruite in pietra, mattoni o elementi prefabbricati comportanti un solaio e un tetto rinforzato o interamente costruite in calcestruzzo armato o materiali simili, tutte di tipo resistente ai terremoti.
	5	Case da quattro a sei piani ed edifici di utilizzo urbano, costruiti in pietre o mattoni, con muri portanti di costruzione più pesante, comprese le case padronali e le residenze di tipo "piccolo castello".	Edifici da abitazione e simili da quattro a dieci piani principalmente costruiti in pietre leggere e mattoni, legati in gran parte da muri interni di materiali simili e da solai in calcestruzzo armato prefabbricato o gettato in opera almeno a ciascun piano.
	6	Case di due piani ed edifici di utilizzo similare costruiti in pietre, in mattoni o argilla, con solette e copertura in legno. Torri costruite in pietra, in mattoni o argilla, con solette e copertura in legno. Torri costruite in pietra o mattoni, di tipo resistente ai terremoti.	Case di abitazione ed edifici di utilizzo similare a due piani, compresi uffici costruiti con muri in pietra, in mattoni, in elementi prefabbricati e con strutture di solette e di copertura in legno o prefabbricate.
	7	Chiese di grande altezza, saloni e strutture simili in pietra o in mattoni con arcate o di tipo "articolato" con o senza volte, comprese le chiese di minor importanza con arcate e costruzioni simili. Chiese basse ad ossatura pesante di tipo "aperto" (cioè non controventate) e rimesse, compresi stalle, garages, costruzioni simili con solette e coperture in legno molto pesanti.	Case e costruzioni simili ad uno o due piani, costruzioni più leggere realizzate con materiali leggeri prefabbricati o preparati in opera con combinazioni di questi materiali.
	8	Rovine ed altre costruzioni in cattivo stato. Tutte le costruzioni della categoria 7 aventi un valore storico.	

Per la classificazione degli edifici viene riportata sempre in appendice A la Tabella A.6.

Tabella A.6: classificazione degli edifici secondo la resistenza meccanica alle vibrazioni e la tolleranza accettabile per gli effetti delle vibrazioni

Classe dell'edificio*	Categoria di struttura								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
	Classe di fondazione (maiuscolo) e tipo di terreno (minuscolo)								
← Resistenza decrescente alle vibrazioni	1	Aa							
	2	Ab	Aa	Aa	Aa				
	3		Ab, Ba	Ab, Ba	Ab	Aa, Ab			
	4		Ac, Bb	Bb	Ac	Ac, Ba, Bb			
	5		Bc	Ac		Bc	Ba		
	6		Af		Ad	Bd	Bb, Ca	Ba	
	7			Af	Ae	Be	Bc, Cb	Bb, Ca	
	8						Be, Cc	Bc, Cb	
	9		Bf				Cd	Bd, Cc	Aa
	10			Bf			Ce	Be, Cd	Ab
	11				Cf	Cf		Ce	Ba
	12						Cf		Bc, Ca
	13							Cf	Bd, Cb, Cc
	14								Cd, Ce, Cf

*Numero di classe elevato = alto grado di protezione richiesto

Le caratteristiche dinamiche dell'edificio sono inoltre influenzate dalle caratteristiche di interazione suolo-struttura (ossia è richiesta la determinazione della velocità dell'onda di taglio e del modulo di dinamico del terreno), dalle caratteristiche del terreno, dalle frequenze naturali dell'edificio e dalle sue caratteristiche di smorzamento.

Nella norma sono inoltre definite le metodologie di misura delle vibrazioni; sono quindi riportati i metodi per la definizione delle grandezze da misurare in relazione alla finalità della misura, per la scelta del numero e delle posizioni di misura, per la scelta ed il fissaggio dei trasduttori agli elementi strutturali o al terreno.

L'Appendice B della UNI 9916, che ha solo carattere informativo in quanto non costituisce parte integrante della norma, contiene i criteri di accettabilità dei livelli delle vibrazioni, tratti da altre normative o letteratura.

Secondo la norma DIN 4150/3, le velocità massime ammissibili per vibrazioni transitorie sono:

- sull'edificio (nel suo complesso): $v < 5$ mm/s in direzione orizzontale misurata all'ultimo piano;
- sui pavimenti: $v < 20$ mm/s in direzione verticale nel punto di massima vibrazione.

Le velocità massime ammissibili per vibrazioni stazionarie sono:

- sull'edificio (nel suo complesso): $v < 5$ mm/s in direzione orizzontale misurata all'ultimo piano;

- sui pavimenti: $v < 10$ mm/s in direzione verticale nel punto di massima vibrazione.

Secondo il Building Research Establishment Digest n. 278 dell'ottobre 1983, sono necessarie vibrazioni continuative con ampiezze dell'ordine di 2,5 mm in spostamento, con frequenza intorno a 1 Hz, per produrre distacchi di intonaco di rilevante entità.

Secondo il Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici del 24 Gennaio 1986 "Norme tecniche relative alle costruzioni sismiche", lo spettro di risposta orizzontale di riferimento da utilizzarsi, per la progettazione degli edifici in zona sismica è piatto per frequenze superiori a 1.25 Hz, con accelerazione data da:

$$a = g \cdot C \cdot R \cdot \varepsilon \cdot \beta \cdot I \quad (\text{A.4})$$

dove $g = 9.81$ m/s², C è il coefficiente di intensità sismica, R il coefficiente di risposta, ε il coefficiente di fondazione, β il coefficiente di struttura e I il coefficiente di protezione sismica. Per edifici in zona sismica di 2^a categoria (C = 0.7), l'accelerazione minima di progetto deve essere circa 0.7 m/s² se si assegna valore unitario agli altri coefficienti.

La norma UNI 9916 riporta infine, sempre in Appendice B, una tabella con le velocità ammissibili, al variare della struttura in esame e del campo di frequenza dell'eccitazione (vedi Tabella A.7).

Tabella A.7: Velocità ammissibili

Categoria	Tipi di strutture	Velocità di vibrazione in mm/s*			
		Misura alla fondazione			Misura al pavimento dell'ultimo piano
		Campi di frequenza (Hz)			Frequenze diverse
		< 10	10-50	50-100**	
1	Edifici utilizzati per scopi commerciali, edifici industriali e simili	20	20-40	40-50	40
2	Edifici residenziali e simili	5	5-15	15-20	15
3	Strutture particolarmente sensibili, non rientranti nelle categorie precedenti e di grande valore intrinseco	3	8-10	8-10	8

* Si intende la massima delle tre componenti della velocità nel punto di misura.
 ** Per frequenze maggiori di 100 Hz possono applicarsi i valori riportati in questa colonna