

UNA NUOVA METODOLOGIA PER LA PREVISIONE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE DAL TRAFFICO STRADALE E FERROVIARIO

Federico Rossi(1), Andrea de Lieto Vollaro(2), Andrea Nicolini(1)

(1)Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Industriale

(2)Università degli Studi “La Sapienza”, Dipartimento di Fisica Tecnica

1. Introduzione

Gli effetti che l'esposizione alle vibrazioni determinano 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 9916 e UNI 9614 che stabiliscono le modalità di misura delle vibrazioni negli edifici e ne fissano i limiti di ammissibilità [1, 2]. 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 [3, 4]. Sebbene siano state proposte alcune complesse procedure di valutazione delle vibrazioni, che richiedono lunghi tempi di calcolo e un elevato numero di dati di input, allo stato attuale nessun metodo pratico è disponibile per la stima delle vibrazioni indotte da treni o veicoli su strada [5]. 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 [6]. In questo lavoro sono proposti due metodi di stima, pratici e semplici, per la previsione delle vibrazioni indotte rispettivamente dai treni e da veicoli su strada. Il primo 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. 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 note ma solo stimabili le caratteristiche del 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 la stima delle vibrazioni indotte da veicoli su strada. Il metodo è basato su una modellazione della sorgente di vibrazioni ed un modello di propagazione. La metodologia proposta consente di 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. 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 nel terreno dal transito di treni

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

2.1 Modellazione della sorgente di vibrazioni

Il trasferimento dell'energia prodotta dalla sorgente di vibrazioni (treno e terrapieno) al suolo è un fenomeno istantaneo governato da complessi meccanismi il cui andamento è difficilmente identificabile [7, 8]. 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:

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

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:

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

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

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

dove s è il massimo spostamento verticale ammesso per la rotaia a seguito del passaggio del treno [9-11]. 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:

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

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

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

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

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

2.2 Modello di propagazione

I fenomeni di propagazione delle onde di vibrazione sono stati modellati adottando le seguenti ipotesi:

- A. il terrapieno è una sorgente emittente continua la lunghezza della quale corrisponde alla lunghezza del treno [12-15]. La potenza media della sorgente per unità di lunghezza è espressa dall'Eq. (6).
- B. La propagazione dell'energia vibrazionale avviene sulla superficie del suolo per mezzo di onde di Rayleigh, la cui ampiezza decresce esponenzialmente in direzione verticale, perpendicolarmente alla superficie del suolo [16]. L'effetto delle onde primarie, secondarie e di Love è trascurato [17].
- C. Ogni porzione elementare della sorgente è una sorgente puntiforme che emette energia vibrazionale in modo omnidirezionale [18].

Se si considera un mezzo non dissipativo, l'energia vibrazionale trasportata dalle 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):

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

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:

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

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 [19]:

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

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

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

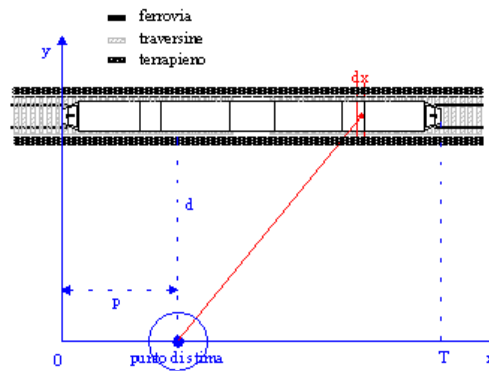


Figura 1 – schema di riferimento del modello

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

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

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

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

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 passante per il punto P. J_{\max} è data da:

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

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:

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

Il valore assoluto della velocità r.m.s. si ottiene combinando l'Eq. (14) con la seguente relazione [20, 21]:

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

Perciò:

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

Il livello assoluto di vibrazione è dato dalla seguente relazione:

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

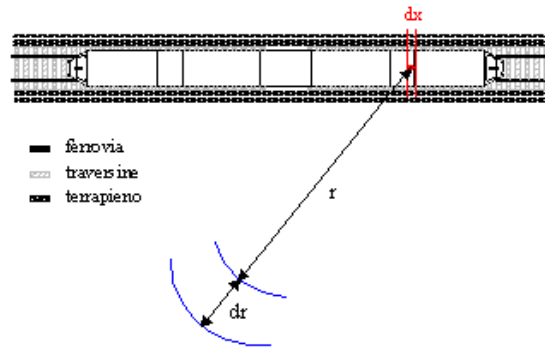


Figura 2 – schema di riferimento relativo alla dissipazione di energia

La velocità di propagazione delle onde di Rayleigh c_R è definita come segue [22]:

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

C può essere ricavata risolvendo la seguente relazione [22]:

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

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

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

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)). Sono stati scelti alcuni punti di misura lungo un tratto rettilineo di una linea ferroviaria ad alta velocità presso la stazione di Terontola (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, per mezzo di geofoni, ed elaborate mediante un sistema di acquisizione dati [23, 24]. 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:

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



Figura 3 – fotografia del sito di misura

Il sistema di elaborazione dati ha consentito 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:

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

$$(22) \quad u_{\text{ref}} = 10^{-8} \text{ m/s}$$

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:

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

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, treno ad alta velocità le cui caratteristiche sono: $M=620 \cdot 10^3$ 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. 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 $\nu=0.2$ [25]. 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. Il modello è stato calibrato determinando il valore di K (vedi Eq.(1)) che eguaglia i risultati forniti dal modello stesso (il livello dato dall'Eq. (17)) ai corrispondenti valori misurati. La calibrazione è stata eseguita assumendo il massimo spostamento verticale della rotaia s pari a $1 \cdot 10^{-2}$ m, ossia il massimo valore ammissibile [9].

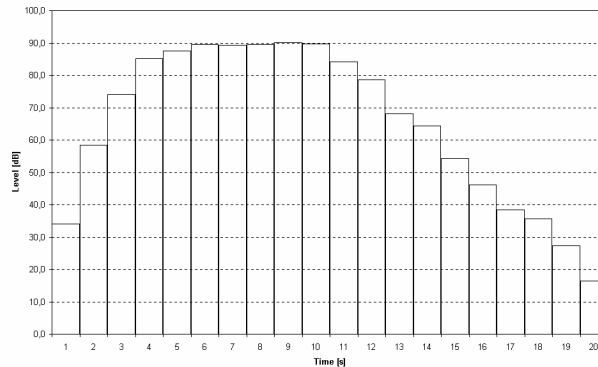


Figura 4 – storia temporale del livello di vibrazione dovuto al passaggio di un treno ETR500 (velocità del treno = 150Km/h, distanza del punto di misura dalla ferrovia = 10m)

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	
	<i>u</i>	<i>L</i>	<i>u</i>	<i>L</i>	<i>u</i>	<i>L</i>
	10^{-5} [m/s]	[dB]	10^{-5} [m/s]	[dB]	10^{-5} [m/s]	[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

Al variare della velocità del treno e della distanza dalla ferrovia, si ottengono differenti valori di K che eguagliano i valori stimati dal modello a quelli misurati. Ogni valore di K è comunque molto simile al suo valor medio \underline{K} (vedi Tabella 2). Di conseguenza, il modello può essere calibrato scegliendo:

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

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. 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 [26].

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: $\bar{K} = 1.983 \cdot 10^{-6} \approx 2 \cdot 10^{-6}$, $\sigma_k = 1.8 \cdot 10^{-7}$, $ K - \bar{K} _{\max} = 3.0 \cdot 10^{-7}$			

2.4 Validazione del modello

I livelli stimati mediante il modello proposto sono stati confrontati con i risultati di alcune campagne di misure condotte lungo le più importanti linee ferroviarie europee ad alta velocità [27]. Le caratteristiche dei treni esaminati sono riportate in Tabella 3. I risultati delle misure sono forniti 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). 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 $\alpha=0.06 \text{ m}^{-1}$ [28]; tale ipotesi è stata assunta in virtù del fatto che non sono note con esattezza le caratteristiche del suolo dove sono state effettuate le misure [27]. 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 ipotesi errata sul valore del rapporto di Poisson è trascurabile assumendo $\nu=0.2$ [29]. Sebbene le precedenti ipotesi siano 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 $E_{\min}=30 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, $\rho_{\min}=1.2 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$; $E_{\max}=100 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, $\rho_{\max}=2.3 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$ [29]. 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 [30, 31]. 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.

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

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

Tabella 4 – livello di vibrazione misurato lungo alcune linee ferroviarie europee ad alta velocità [27].

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	

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 ($E=90 \cdot 10^6 \text{Pa}$, $\rho=1.8 \cdot 10^3 \text{Kg/m}^3$) per ogni caso esaminato, le differenze tra livelli stimati e misurati sono molto piccole (vedi Tabella 5): la differenza media è $\underline{\Delta}=1.0\text{dB}$ mentre la differenza massima tra un livello stimato ed il corrispondente livello misurato è $\Delta_{\text{max}}=2.5\text{dB}$. Quando le proprietà del suolo sono note con esattezza, gli errori di stima dovrebbero essere ancora più piccoli. 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.

Tabella 5 – livelli di vibrazione stimati mediante il modello proposto relativi ad alcuni treni europei ad alta velocità. Differenza 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

Tabella 6 – caso peggiore: livelli di vibrazione stimati mediante il modello proposto e differenza 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

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: $E_{\min}=30 \cdot 10^6 \text{Pa}$, $\rho_{\min}=1.2 \cdot 10^3 \text{Kg/m}^3$ [29]. Nel caso peggiore, la media della differenza tra livelli stimati e misurati è $\Delta_{wr}=4.3 \text{dB}$ mentre il valor massimo della differenza tra livelli stimati ed i corrispondenti livelli misurati è $\Delta_{\max,wr}=5.8 \text{dB}$. 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.

3. Modello di previsione delle vibrazioni indotte da veicoli su strada nel terreno

La previsione dei livelli di accelerazione r.m.s. prodotti da veicoli su strada ad una determinata distanza può essere effettuata modellando sia la sorgente di vibrazioni che i fenomeni di propagazione delle stesse.

3.1 Modellazione della sorgente di vibrazioni

Il trasferimento dell'energia prodotta 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 breve distanza del punto di stima dalla strada. Ad esempio, 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 durante il percorso dalla sorgente al punto di stima è inferiore al 3% (vedi Eq. (27)). Perciò, l'accelerazione r.m.s. a distanza d_0 può essere rappresentata dalla seguente relazione:

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

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

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

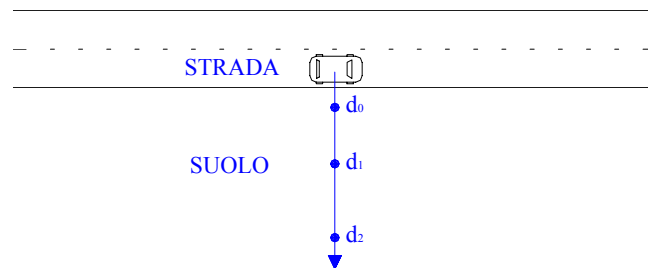


Figura 5 – schema di riferimento del modello per veicoli su strada

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 [13].
2. la propagazione dell'energia vibrazionale avviene sulla superficie del suolo per mezzo di onde di Rayleigh, la cui ampiezza decresce esponenzialmente in direzione verticale, perpendicolarmente alla superficie del suolo. L'effetto delle onde primarie, secondarie e di Love è trascurato [17].
3. Ogni sorgente emette energia vibrazionale in superficie in modo omnidirezionale [18].

Se si considera il suolo come un mezzo non dissipativo, l'energia vibrazionale trasportata dalle onde di Rayleigh attraverso la superficie 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:

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

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:

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

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

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

$$J_0 = \frac{W_0 \cdot e^{-\alpha \cdot d_0}}{2 \cdot \pi \cdot d}$$

Si può quindi scrivere la seguente relazione:

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

Il valore assoluto dell'accelerazione r.m.s. si ottiene dalla seguente equazione [14]:

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

Perciò:

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

e:

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

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 nei pressi di Terni, in assenza di ponti, curve, incroci e fossati nelle vicinanze. Le vibrazioni sono state misurate al variare della velocità dei veicoli alle seguenti distanze dalla mezzera 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).

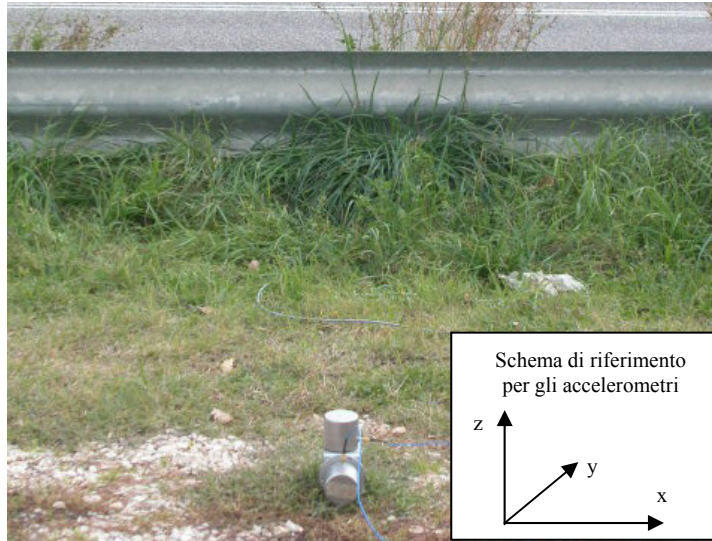


Figura 6 – fotografia del sito di misura

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:

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

3.4 Individuazione del modello della sorgente di vibrazioni

I risultati delle misure, ossia le accelerazioni r.m.s. misurate ed i valori del $SEVL_0$ relativi ad una distanza di 3 m dalla mezzzeria della strada, sono riportati in Tabella 7 per le tipologie di veicoli A, B e C al variare della velocità dei veicoli stessi. I risultati hanno consentito di ricavare la seguente relazione per l'individuazione di $SEVL_0$:

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

dove:

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

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

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

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:

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

Tabella 7 – risultati delle misure per l'individuazione del SEVL₀

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

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. 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 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

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 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 primo modello proposto fornisce le velocità r.m.s. ed i livelli di vibrazione indotti dal transito di treni ad alta velocità. 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 treni ETR500. I valori forniti dal modello suddetto sono stati confrontati 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 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 [16]; l'impiego di tali modelli, contrariamente a quello proposto, richiede lunghi tempi di calcolo ed un elevato numero di dati di ingresso [16]. 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 ($E=30 \cdot 10^6 \text{Pa}$, $\rho=1.2 \cdot 10^3 \text{Kg/m}^3$). Paragonando i livelli stimati nel caso peggiore a quelli misurati, l'errore massimo commesso dal modello è $+5.8 \text{dB}$ (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 del 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
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
\underline{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
L_j	dB	Livello di vibrazione riferito ad un intervallo di 1 s
M	Kg	Massa totale del treno
m	$Kg \cdot m^{-1}$	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	$Kg \cdot m^{-3}$	Densità del suolo
ρ_{max}	$Kg \cdot m^{-3}$	Valore massimo della densità del suolo
ρ_{min}	$Kg \cdot m^{-3}$	Valore minimo della densità del suolo
ρ_s	$Kg \cdot m^{-2}$	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	$m \cdot s^{-1}$	Velocità r.m.s. delle particelle del suolo
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
\square	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

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] UNI 9916, “Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici”, 1991
- [2] UNI 9614, “Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo”, 1990.
- [3] U.S. Department of Transportation, “Transit Noise and Vibration Impact Assessment”, Federal Transit Administration, Report DOT-T-95-16, April 1995.
- [4] Crone A, Astrup T, Finne P., “Prediction of Vibrations and Structure-Borne Noise from Railways”, InterNoise 99, Florida, USA, 1999.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Richert F.E, Hall J.R., “Vibrations of Soils and Foundations. Prentice-Hall Inc.”, Englewood Cliffs, NJ, 1970.
- [8] Lai C.G, Callerio A, Faccioli E, Martino A., “Mathematical Modeling of Railway-Induced Ground Vibrations”, WAVE 2000, Bochum, Germany, December 2000.
- [9] 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.
- [10] Fryba L., “Vibration of Solids and Structures under Moving Loads”, Telford, London, 1999.
- [11] Fortin J.P., “Dynamic Track Deformation. French Railway Review”, Vol. 1, 1983.
- [12] Takemiya H., “Prediction of Ground Vibration Induced by High-Speed Train Operation”, 18th Sino-Japan Technology Seminar, Taipei, Taiwan, 1997.
- [13] Le Houdec D., “Modelling and Analysis of Ground Vibration Problems: a Review.”, Civil and Structural Engineering Computing, Chapter 19, 2001.
- [14] Hunt H.E.M., “Measurement and Modelling of Traffic Induced Ground Vibration”, Ph.D. Thesis, Cambridge University, England, 1988.
- [15] Gutowski T.G, Wittig L.E, Dym C.L., “Some Aspects of the Ground Vibration Problem”, Noise Control Engineering, vol. 10:3, 1978.
- [16] Hung H, Yang Y., “A Review of Researches on Ground-Borne Vibrations with Emphasis on Those Induced by Trains”, Proc. Natl. Sci. Council., Vol. 25, No.1, 2001.
- [17] 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.
- [18] Beranek L.L., “Noise and Vibration Control”, edited by L.L. Beranek, 1988.
- [19] DeGrande G., “Free Field Vibration Measurements during the Passage of a Thalys High Speed Train”, Katholieke Universiteit Leuven, Report BWM-2000-06, 2002.
- [20] Moncada Lo Giudice G, Santoboni S., “Acustica”, Masson Editoriale, 1995.
- [21] Spagnolo R., “Manuale di Acustica”, UTET Libreria, Torino, 2001.
- [22] Timoshenko S.P., “Theory of Elasticity”, Mc Graw Hill Inc., USA, 1970.
- [23] Geo Space, “Geo Space Geophones GS-30CT & GS-32CT”, www.geospacelp.com/g30ct.htm, 2002.
- [24] DASYTec, “DASYLab User Guide“, www.dasytec.com, 2001.

- [25] Damiani A.V, Minelli G, Piali 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.
- [26] 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.
- [27] U.S. Department of Transportation, “High Speed Ground Transportation – Noise and Vibration Impact Assessment”, Federal Railroad Administration, Report N. 293630-1, December 1998.
- [28] Amick H., “A Frequency-Dependent Soil Propagation Model”, SPIE Conference on Current Development in Vibration Control for Optomechanical Systems, Denver, Colorado, July 1999.
- [29] Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J., “The Rock Physics Handbook”, Cambridge Univ. Press, 1998.
- [30] Strohl M.P., “Europe’s High Speed Trains”, 1993.
- [31] 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.
- [32] Beranek L.L., Ver I.L., “Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications”, Interscience, 1992.
- [33] Piali G., “Carta Geologica dell’Umbria”, 1995.