

# **ORIGINE, PROPAGAZIONE E MODELLI PREVISIONALI DELLE VIBRAZIONI DEI MEZZI DI TRASPORTO**

Raffaele Pisani  
Studio di Ingegneria Acustica Rivoli (Torino)

## **1. Premessa**

L'aumentata domanda di trasporto su gomma e su ferro ha portato alla sensibilità delle popolazioni residenti ed all'attenzione dei tecnici il fenomeno delle vibrazioni emesse dai mezzi di trasporto.

Gli studi di impatto ambientale per le nuove infrastrutture lineari di trasporto (DPCM 27/12/88) devono necessariamente considerare la componente vibrazione stante l'aumentato numero di mezzi pesanti in circolazione sulle strade e la realizzazione di nuove linee ferrate per il trasporto veloce delle merci e dei passeggeri. Allo studio d'impatto ambientale non possono sottrarsi anche i progetti per le nuove linee tranviarie e metropolitane che sono previste in numerose città d'Italia (metropolitane di Torino, Roma, Milano, nuova linea tranviaria in Bologna etc.).

La componente vibrazione negli studi di impatto ambientale viene sovente trascurata per numerosi motivi quali la complessità della misurazione (lungo tre assi ortogonali), la forte dipendenza dei risultati dal punto di misura, la scarsa conoscenza della emissione da parte delle sorgenti (veicoli pesanti su gomma, treni etc.), la varietà dei modi di propagazione dell'energia meccanica nel terreno che la stessa sorgente può eccitare in relazione anche alla composizione del terreno stesso, la difficoltà di determinare la funzione di accoppiamento mutuo tra edifici e terreno, la grande diversità di risposta alle vibrazioni dei componenti edilizi ed in fine la mancanza di leggi che fissino i limiti ammissibili delle vibrazioni sulle strutture edilizie e sull'uomo.

Alla difficoltà oggettiva di poter descrivere la situazione della componente sul territorio prima della realizzazione dell'opera in progetto, si aggiunge ancora la mancanza di modelli di previsione per le vibrazioni (come li intendono gli acustici) e la scarsa conoscenza dei criteri di progettazione delle opere di mitigazione compresa una seria casistica di risultati ottenuti laddove sono state realizzate opere di riduzione delle vibrazioni.

In Italia sono già state realizzate opere di un certo impegno per la riduzione delle vibrazioni generate dai mezzi di trasporto mentre altre sono in progetto. Per il trasporto su gomma valga, per tutti, l'esempio dell'attraversamento in sotterraneo della città di Lecco. L'opera, inaugurata da pochi mesi, ha richiesto un notevole impegno finanziario da parte dell'ANAS per ridurre non solo il rumore agli imbocchi delle gallerie, ma anche le vibrazioni emesse dai mezzi pesanti nel sottosuolo della città: la sede di scorrimento delle due carreggiate in galleria è completamente isolata dalle strutture mediante materassini di gomma e massetto di ripartizione dei carichi in c.a. Per il trasporto su ferro valgono i progetti per la linea ad Alta Velocità che attraversa numerosi centri urbani. Nel caso di Bologna, ad esempio, l'attraversamento della città avverrà in sotterranea con plausibile apprensione per la generazione e propagazione delle vibrazioni sugli edifici in aderenza al tracciato.

Discorrendo sempre del tema relativo alla difficoltà di approccio e di progettazione delle opere di contenimento delle vibrazioni indotte dai mezzi di trasporto si vuole infine sottolineare un aspetto singolare che trova parziale riscontro nella propagazione e controllo del rumore. Una errata progettazione delle opere di isolamento da rumore arreca poco danno in quanto il rumore si riduce, a conti fatti, di poco o niente. Per le vibrazioni, al contrario, una errata progettazione delle opere di mitigazione può sortire l'effetto contrario con aumento, anche pericoloso, della componente per effetto della risonanza delle strutture investite dall'energia meccanica.

Per quanto riguarda il quadro generale di riferimento per un completo studio del problema occorre tenere presente gli effetti delle vibrazioni di una certa entità:

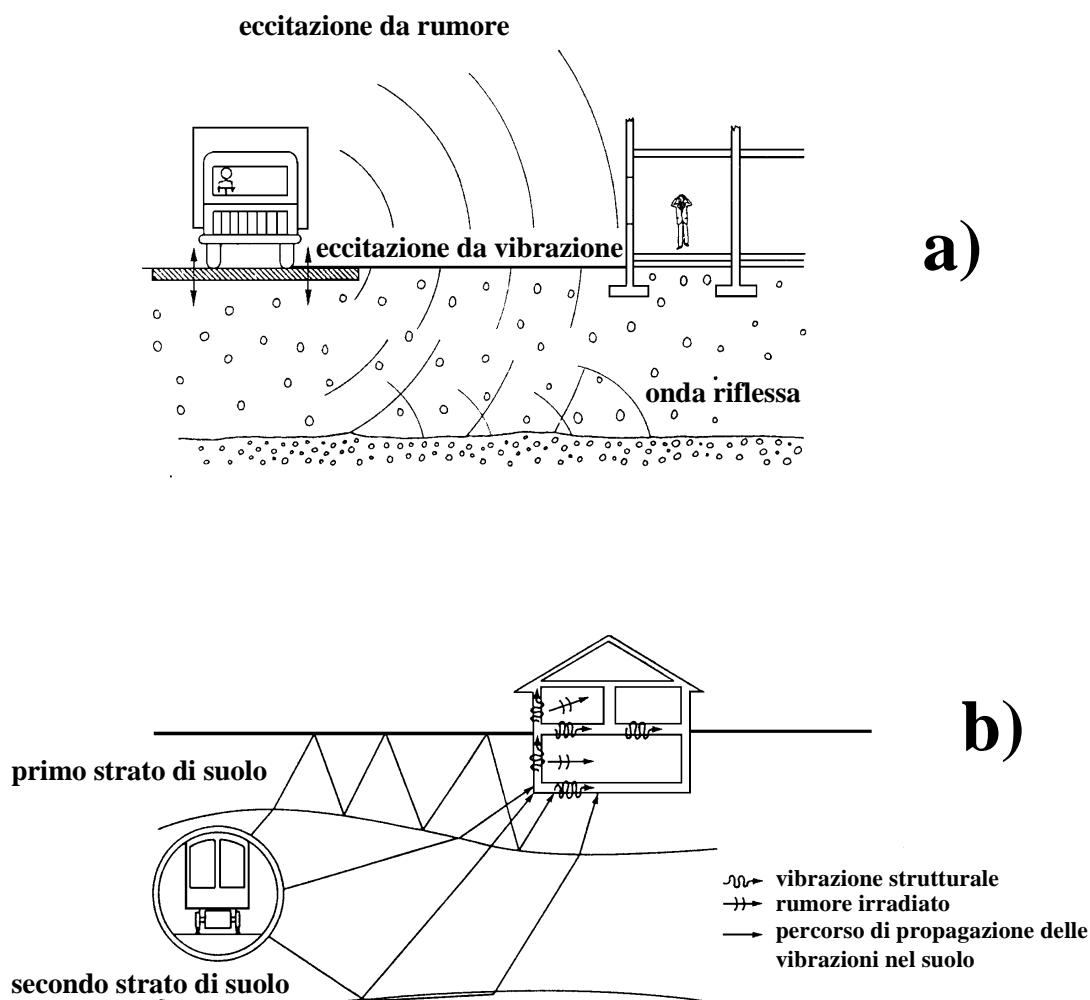
- le vibrazioni creano disturbo alle persone che le percepiscono come tremolio che si propaga lungo il corpo
- le vibrazioni possono arrecare danno alle strutture edilizie con la formazione di crepe sull'intonaco, sul pavimento o con l'insorgere di danni più gravi
- le vibrazioni possono indurre un rumore indesiderato alle basse frequenze all'interno delle abitazioni specialmente in quelle più protette sotto il profilo dell'isolamento acustico verso i rumori provenienti dall'esterno.
- le vibrazioni possono indurre rumori secondari quali tintinnio di oggetti (bicchieri etc.)

In molti casi i fenomeni sopra elencati trovano una esaltazione per il fenomeno della risonanza per cui anche vibrazioni non avvertibili fisicamente vengono rivelate da numerosi "indicatori" e creano le proteste più accese.

Nel presente lavoro si vuole dare risalto agli aspetti più difficili che si incontrano nello studio e nella propagazione delle vibrazioni e cioè a quelli legati alla conoscenza della emissione della sorgente, alla definizione delle modalità di propagazione delle vibrazioni nel suolo, alle risposte degli edifici ed al calcolo previsionale.

Per gli aspetti normativi di riferimenti, si ricorda che a tutt'oggi non esiste in Italia una legge quadro sull'inquinamento da vibrazioni che fissi i limiti della componente sul territorio per cui il professionista utilizza, per le proprie valutazioni, valori segnalati dalle norme internazionali ISO e da quelle nazionali DIN, UNI etc.

Per quanto riguarda il tipo di trasporto che caratterizza l'eccitazione del terreno dobbiamo distinguere quello su gomma da quello su ferro. Per le caratteristiche di propagazione nel suolo, invece, è necessario distinguere il tracciato in superficie da quello in sotterraneo Fig. 1.



**Fig.1** - *Vibrazioni dell'edificio eccitate dal rumore e dalle vibrazioni che si propagano sul terreno. a) Sorgente in superficie, b) Sorgente nel sottosuolo.*

La sorgente di vibrazione può eccitare modi diversi di vibrazione in relazione alla direzione, intensità e frequenza della forza trasmessa al terreno ed in relazione alle caratteristiche meccaniche del mezzo solido. Per le discontinuità e per la presenza delle stratificazioni del terreno, si possono propagare meglio uno o più modi.

La perturbazione elastica raggiungerà l'edificio attraverso le fondazioni producendo i propri effetti legati alla intensità che variano dal disturbando alle persone che occupano l'edificio al danno alle strutture (muri di tamponamento, divisori ecc.). L'effetto sulle strutture e sulle persone dipende dal *modo* di propagazione ed in particolare dall'intensità della componente verticale ed orizzontale. L'attenuazione dell'onda elastica nel terreno è determinata dalle costanti elastiche e di smorzamento del terreno stesso, dal modo di propagazione e dal tipo di sorgente.

## **2. Studio d'impatto da vibrazioni generate dal traffico**

L'impostazione di uno studio d'impatto ambientale per le vibrazioni si sviluppa nei consueti capitoli di uno studio di impatto per ciascuna delle componenti (rumore, paesaggio etc.). I passi sono: la definizione dello stato attuale della componente presso i ricettori, la previsione della componente in fase di esercizio dell'infrastruttura di trasporto, la eventuale definizione delle opere di mitigazione. Ovviamente i valori delle grandezze misurate o calcolate devono essere confrontati con i valori di riferimento segnalati da specifiche normative. La complessità dello studio è palese se si tiene presente che la generazione e la propagazione delle vibrazioni avviene nel terreno e dipende in larga misura dalla consistenza geologica del sottosuolo, dalla sua stratigrafia, dalle caratteristiche degli edifici e dal tipo di vetture ed armamento utilizzato se si parla di strada ferrata o di tramvia. Questi aspetti non sono immediatamente palesi e sono complicati ulteriormente dalla vasta tipologia edilizia che si incontra lungo il tracciato dell'infrastruttura e dalle caratteristiche estremamente variabili del sottosuolo ulteriormente modificate localmente dalla fitta rete dei servizi (gas, acqua fognature etc.) che possono avere imposto specifiche e puntuali opere di consolidamento del terreno.

Sovente si rende necessario effettuare un primo sondaggio sperimentale sin dalla fase di studio d'impatto ambientale al fine di acquisire una maggiore conoscenza del sottosuolo e di quantificare alcuni parametri necessari al calcolo di previsione della componente all'interno degli edifici. Si passa poi ad una attenta analisi delle tipologie edilizie presenti lungo il tracciato, alla definizione della emissione della sorgente, alla scelta di un modello di calcolo per la previsione dell'entità del fenomeno vibratorio ed alla definizione dei parametri di riferimento per valutarne gli effetti.

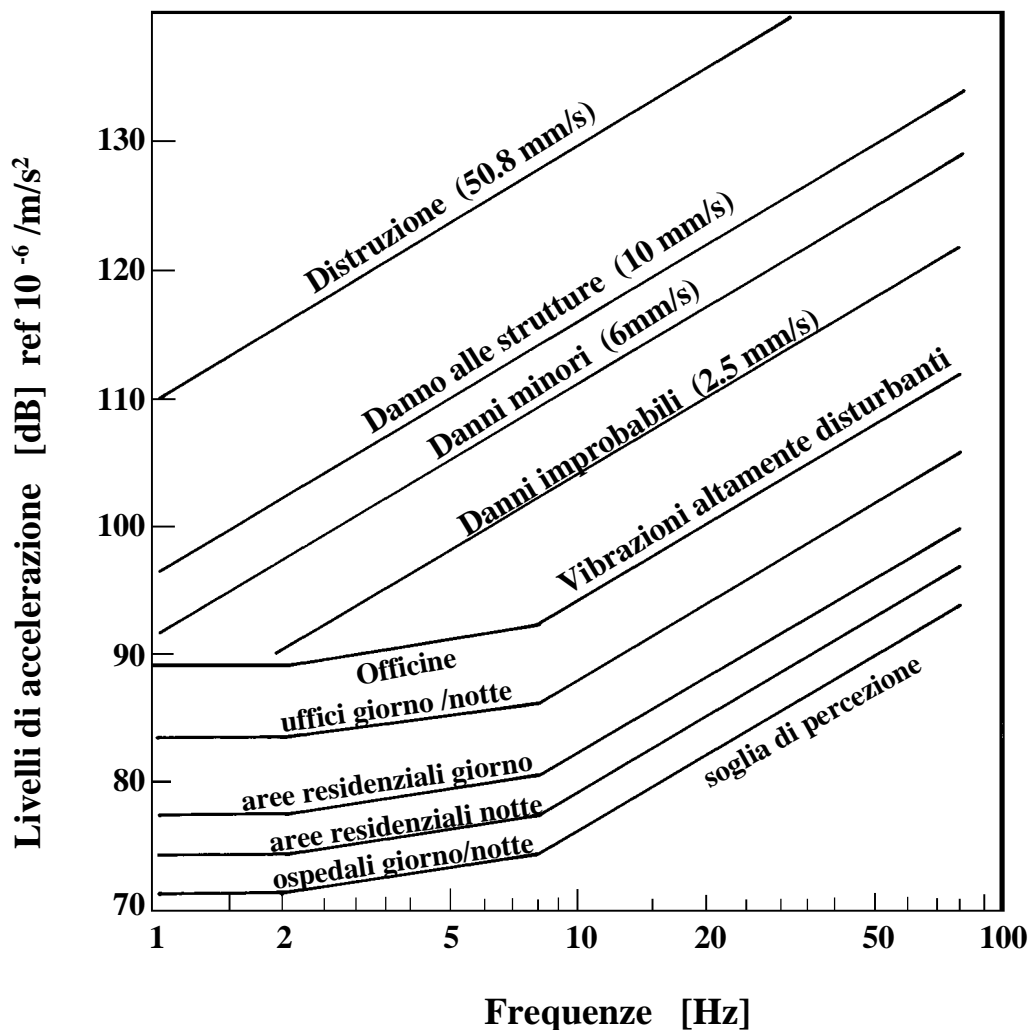
Le due fasi più impegnative nello studio d'impatto sono quelle concernenti il calcolo di previsione della componente con l'infrastruttura in esercizio e la progettazione delle opere di mitigazione se si prevede un superamento degli standard fissati.

Come detto nella premessa le normative ISO ed UNI forniscono dei valori di riferimento della grandezza proposta e questi possono essere distinti principalmente in valori limite di accettabilità per il disturbo fisico alle persone e valori limite di accettabilità per il danno alle strutture.

La valutazione delle vibrazioni in riferimento al disturbo è agevolmente effettuata ricorrendo alla norma ISO 2631 calcolando lo spettro delle vibrazioni e confrontando questo con le curve limite. Non esistono indici descrittivi delle vibrazioni indotte dal traffico e non esistono criteri diversi di valutazione per le vibrazioni indotte dal traffico ferroviario, dai cantieri ecc. che non siano quelle previste dalla ISO 2631. Per quanto riguarda la valutazione delle vibrazioni delle strutture edilizie in relazione a possibili danni si ricorda che abbondante è la letteratura specie per le vibrazioni impulsive prodotte da volate di mine.

Tenendo conto delle relazioni algebriche e fisiche che legano lo spostamento, la velocità e l'accelerazione è possibile effettuare l'analisi di una grandezza per poter dedurre lo spettro delle altre. Nella Fig. 2 si confrontano i livelli di accelerazione, in funzione della frequenza, con le curve limite di accettabilità della componente sia in relazione al disturbo arrecato all'uomo sia in relazione al possibile danno agli edifici.

Come è possibile osservare esiste una continuità tra le prime e le seconde per frequenze superiori a 10 Hz ove tutte le curve legano l'effetto ad un unico valore di velocità di vibrazione alle diverse frequenze.



**Fig.2 - Criterio per valutazione degli effetti soggettivi delle vibrazioni e per la valutazione del danno fisico alle strutture.**

I valori relativi agli standard di riferimento per la componente sono meglio precisati nelle norme ISO 2631/1, ISO 2631/2 ed UNI 9614 per gli effetti del disturbo sulle persone; ISO 4866 ed UNI 9916 per gli effetti delle vibrazioni sugli edifici.

In uno studio d'impatto ambientale, descritto lo stato attuale della componente (stato ante operam) si passa allo studio ed alla previsione dei valori della componente in fase di esercizio dell'infrastruttura di trasporto (stato post operam). Questo è possibile solo se si possiedono strumenti idonei di calcolo (in genere modelli) e si dispone di numerosi parametri fisici (dati iniziali di progetto).

I parametri fisici necessari per impostare un calcolo di previsione della componente sono numerosi; quelli più importanti sono i seguenti:

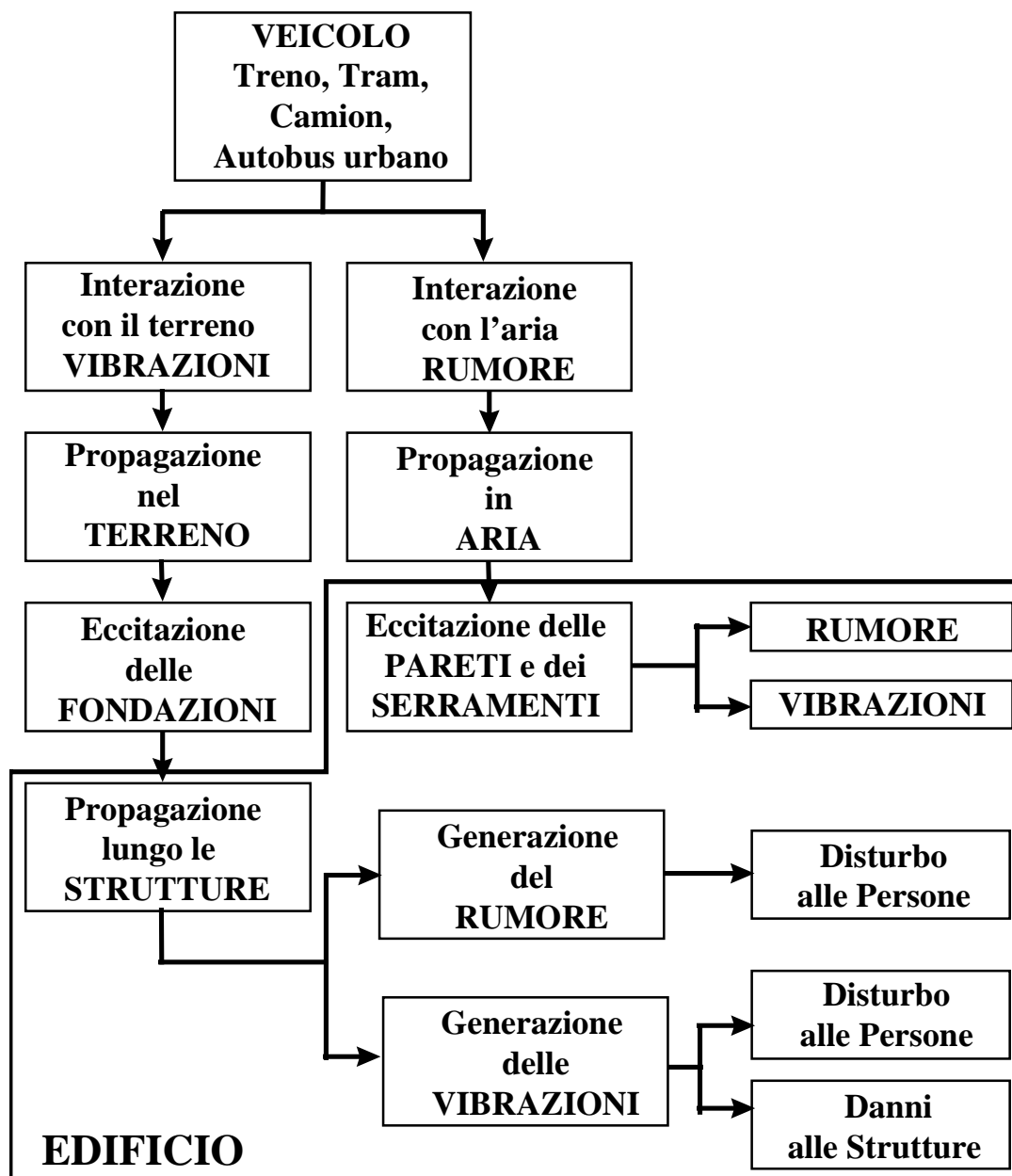
- Caratteristiche dello spettro di emissione della sorgente (treno, tram, autocarro, camion etc.) in funzione del tipo di tracciato (galleria o rilevato).
- Variazione dello spettro di emissione del mezzo in funzione della velocità.
- Variazione del livello di vibrazione in funzione della distanza del ricettore dalla sorgente.

- Variazione del livello di vibrazione in funzione della tipologia delle fondazioni dell'edificio in esame.
- Propagazione delle vibrazioni all'interno dell'edificio.
- Trasformazione della vibrazione strutturale dell'edificio in rumore interno.

Lo studio di previsione delle vibrazioni può essere impostato correttamente se si dispongono dei valori relativi ai parametri sopra descritti tenendo conto che la maggior parte di essi sono di carattere puntuale e dipendono, quindi, dal luogo in cui è prevista l'opera soggetta a studio d'impatto.

- Lo spettro di emissione della sorgente (mezzo su gomma, treno etc.) può essere valutato solo sperimentalmente.
- La variazione dello spettro di emissione della sorgente in funzione della velocità può essere determinata solo sperimentalmente con prove specifiche; in alternativa è possibile elaborare opportunamente i dati ovviamente generali e non specifici, disponibili in letteratura.
- La variazione del livello di vibrazione in funzione della distanza del ricettore dalla sorgente può essere indagata per via sperimentale attraverso prove di trasmissione di sollecitazioni periodiche o impulsive nei terreni circostanti il tracciato della infrastruttura di trasporto. Ancora non è disponibile una vasta casistica sperimentale che consenta di valutare teoricamente l'effetto di questo parametro partendo unicamente dalla caratterizzazione geologica del terreno.
- La variazione del livello in funzione della tipologia delle fondazioni dell'edificio in esame è possibile determinarla o con prove specifiche di risposta a sollecitazioni appositamente impresse al terreno o per via analitica noto il tipo di fondazione, il carico sul terreno e la costituzione del terreno stesso sul quale poggia l'edificio.
- La propagazione delle vibrazioni all'interno dell'edificio può essere prevista utilizzando metodologie consolidate in uso in ingegneria sismica per la valutazione numerica del comportamento dinamico degli edifici civili. Sono possibili sperimentazioni specifiche attraverso il rilievo, in diversi punti dell'edificio, delle accelerazioni indotte da sollecitazioni impulsive artificialmente prodotte o sfruttando quelle del traffico esistente. In realtà, vista la grande varietà delle dimensioni e delle tipologie degli edifici, tali rilevazioni hanno carattere e validità locale e non possono essere generalizzate se non mediando opportunamente i valori ottenuti dalle sperimentazioni.

Il quadro generale che descrive il flusso degli elementi da acquisire per la formulazione di un calcolo di previsione della componente all'interno degli edifici è riportato in Fig. 3. Gli elementi che contraddistinguono l'eccitazione e le vie di propagazione sono approfonditi nei capitoli che seguono.



**Fig. 3 -** Diagramma di flusso per un modello di previsione delle vibrazioni.

### 3. Origine delle vibrazioni

Le vibrazioni, in generale, traggono origine da forze variabili nel tempo in intensità e direzione. Tali forze agiscono in specifici punti del suolo (sia in superficie sia in galleria) immettendo energia meccanica che si propaga nel terreno e che può essere riflessa da strati più profondi prima di giungere al ricettore. Ricordando che il fenomeno vibratorio è connesso strettamente con il tipo di accoppiamento meccanico tra mezzo di trasporto e terreno, la reazione di quest'ultimo sulla sorgente impedisce la definizione in assoluto delle caratteristiche del generatore e che possono essere inserite autonomamente in uno schema di calcolo.

Per i trasporti la prima classificazione da effettuarsi è relativa al mezzo distinguendo i veicoli su gomma da quelli su ferro.

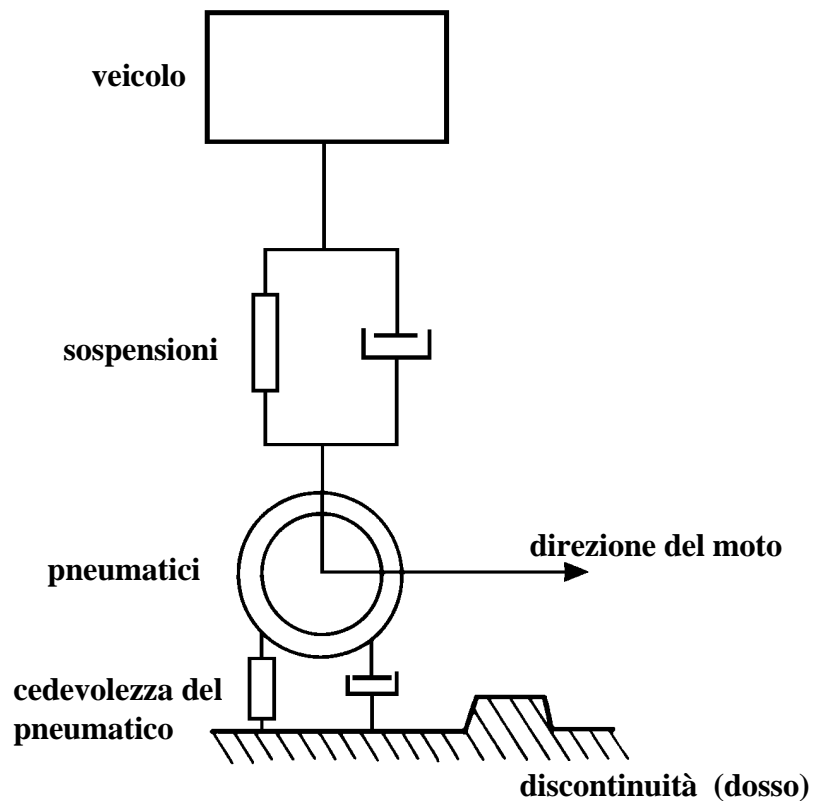
### **3.1 Origine delle vibrazioni dei veicoli su strada: previsione dei carichi e delle risposte**

In linea di principio un veicolo con carico perfettamente bilanciato, con perfetta equilibratura delle ruote, che avanza su una strada perfettamente levigata, non produce vibrazioni. In pratica il manto stradale è tutt'altro che liscio usurandosi con il tempo; le ruote dei veicoli pesanti sono sbilanciate per effetto dell'usura non uniforme del pneumatico; le forze che il corpo del veicolo comunica alle ruote variano in intensità e direzione.

L'interazione ruota-strada può essere schematizzata con il diagramma di Fig.4: il passaggio del veicolo sul dosso produce una forza di tipo impulsivo se il tempo di transito sulla discontinuità è inferiore al periodo di risonanza delle sospensioni. La ruota, così eccitata, oscillerà per alcuni periodi con frequenza pari a quella della sospensione esercitando sulla strada una serie di impulsi che si estendono per alcuni metri. Tale fenomeno produrrà, con il tempo, ulteriori danneggiamenti del manto stradale che si estenderanno su superfici sempre più vaste.

Tenendo conto del numero degli assi e del carico dinamico esercitato dal veicolo in movimento, l'azione delle forze eccitatrici è legata alla velocità ed al peso statico del veicolo stesso. Interessanti studi sono stati condotti sull'entità delle forze dinamiche esercitate sul terreno da veicoli commerciali di peso superiore alle 32 tonnellate. I carichi sono stati misurati con sensori inglobati entro il manto stradale ed i risultati delle misure hanno consentito di individuare le frequenze proprie di risonanza (tra 10 e 16 Hz) ed il rapporto tra carico dinamico sugli assi e carico statico. Tale rapporto, che mediamente è pari a 1.5, può raggiungere il valore massimo di 3.





**Fig.4 - Effetti dinamici di una discontinuità del manto stradale.**

L'ampiezza della forza dinamica sulla superficie di contatto può variare da 10 a 20 t, come è evidenziato nella figura. L'accoppiamento tra veicolo e terreno dipende molto dallo strato sotto l'asfalto, per cui il livello di vibrazioni immesso nel terreno è di difficile modellizzazione.

Una prima semplificazione per un modello di previsione è quella di Rudder attraverso la quale si giunge ad una relazione semplificata per il calcolo del livello di accelerazione ad una determinata distanza dalla strada. Questo approccio è valido per un tipo di asfalto privo di buche e con uniforme rugosità superficiale. Per il caso di una pavimentazione fortemente segnata da buche e piccoli rifacimenti Rudder fornisce una relazione del livello di picco dell'accelerazione con i parametri che caratterizzano le dimensioni delle discontinuità.

– *Rugosità di superficie di tipo casuale:*

Il livello di accelerazione a 2 m di distanza dal ciglio della strada può essere calcolato con la relazione:

$$L_0 = - 4.155 \cdot (PSR) + 17.2 \cdot \text{Log}(V) + 10 \cdot \text{Log}(W_G) + 52 \quad \text{dB re. } 10^{-6} \text{ m/s}^2$$

dove:  $PSR$  è un coefficiente legato alla densità spettrale di potenza della rugosità

$V$  è la velocità in km/h

$W_G$  è il peso lordo del veicolo in tonnellate

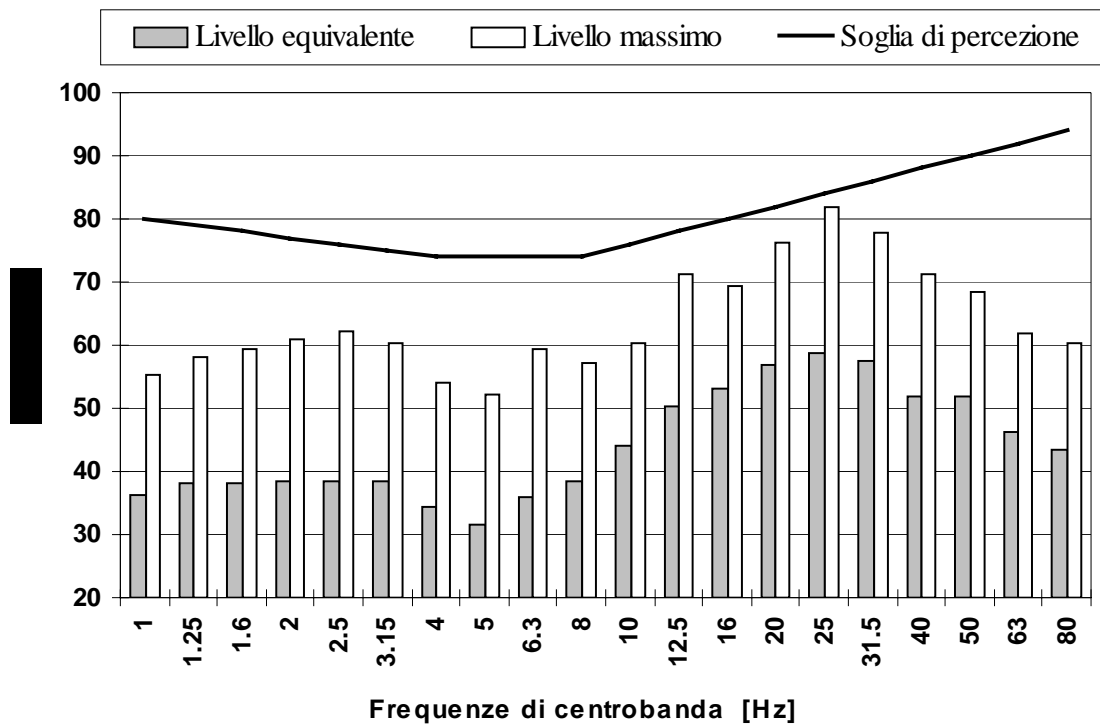
Il valore che si assume per *PSR* può variare da  $\approx 4,5$  per un asfalto nuovo fino a  $\approx 2,0$  per un asfalto usurato. In linea di principio valori accettabili di *PSR* spaziano da 1 a 5 e forniscono variazioni di livello di accelerazione di  $\pm 8$  dB rispetto al valore medio di *PSR* pari a 3.

Il livello di accelerazione impresso al terreno è anche funzione del peso dei veicoli: si calcola che un camion di 20 t a 55 km/h con un fattore  $PRS=3$  produce un livello di accelerazione di 82,8 dB ref.  $1 \mu\text{m/s}^2$ . Valori misurati di vibrazioni prodotte da un camion carico con due assi su diversi tipi di pavimentazione sono compresi 79 a 91 dB (ref.  $1 \mu\text{m/s}^2$ ).

La formula sopra riportata evidenzia un aumento del livello di accelerazione di 3 dB per ogni raddoppio del peso mentre fornisce un incremento di 5.2 dB per ogni raddoppio della velocità.

La distribuzione in frequenza dell'energia vibratoria può essere ottenuta ricorrendo ad uno spettro medio del livello di accelerazione misurato in situazioni analoghe. Nella Fig. 5 si riporta, a titolo di esempio, lo spettro equivalente e massimo della componente verticale dell'accelerazione rilevato a 12 m dal ciglio di una strada statale periurbana a due corsie.

### Accelerazioni per 1/3 di ottava



**Fig. 5** - Livello equivalente e livello massimo di accelerazione per bande di 1/3 di ottava rilevato a 12 m dal ciglio strada su terreno compatto. Durata del rilievo 10 minuti con traffico di 290 auto e 13 camion. Livelli globali pesati UNI 9614  $L_{w,eq} = 55.3$  dB;  $L_{w,max} = 76.0$  dB

– *Discontinuità di superficie con buche e dossi:*

Se la superficie stradale contiene buche o dossi il carico dinamico ed il fattore d'impatto possono essere calcolati conoscendo i parametri dei veicoli e la geometria delle discontinuità. I parametri sono:

- Altezza del dosso ( $h$ ) e lunghezza ( $l$ )
- Velocità del veicolo ( $V$ ), carico statico del pneumatico ( $W_0$ ), cedevolezza del pneumatico ( $k_t$ ) e frequenza propria della sospensione ( $f_n$ ).
- Frequenza naturale del manto d'asfalto ( $f_p$ ) e sua massa ( $\bar{W}$ )

In primo luogo si considera il veicolo come un sistema ad un grado di libertà e se ne calcola la risposta prodotta per spostamento dalla posizione di equilibrio con legge pari a 1/2 ciclo di senoide e di durata pari al tempo necessario per superare la discontinuità. Il massimo valore del carico è dato dalla relazione:  $P_0 = k_t h$  che però dipende dalla durata dell'eccitazione in relazione alla frequenza di risonanza del veicolo. Rudder fornisce le seguenti relazioni per il carico massimo:

$$P_0 = \frac{k_t h}{1 - \nu} \quad 0 \leq \nu \leq 1/3$$

$$P_0 = \frac{k_t h \left( \sin \left[ 2\pi \nu / (1 + \nu) \right] \right)}{1 - \nu} \quad 1/3 \leq \nu \leq 1$$

$$P_0 = \frac{2k_t h \nu \cos(\pi/2\nu)}{\nu^2 - 1} \quad \nu \geq 1$$

dove:  $\nu = V/\bar{V}$ ,  $\bar{V} = 2l f_n$  è la velocità del veicolo alla quale la durata della eccitazione è pari al periodo naturale del sistema di sospensioni.

In secondo luogo si considera la risposta della pavimentazione, che è un sistema a più gradi di libertà. La forza impulsiva impressa dal veicolo è assunta rettangolare con ampiezza pari a  $P_0$  e durata pari a  $l/V$ .

Il massimo livello di accelerazione impresso al manto stradale è dato dalla relazione:

$$L_{p_0} = 20 \cdot \text{Log}(P_0) - 20 \cdot \text{Log}(\bar{W}) + 20 \cdot \text{Log} \left[ \left| \sin(\pi/2\vartheta) \right| \right] + 146 \quad \text{dB ref. } 1\mu\text{m/s}^2$$

dove:

$P_0$  è il picco dell'impulso

$\bar{W}$  è la massa del manto d'asfalto

$\vartheta = \frac{V}{\bar{V}}$  è il rapporto tra la velocità del veicolo e la velocità di propagazione della

vibrazione nel manto d'asfalto

$$\bar{V} = 2l f_p$$

La massa del manto d'asfalto è data da:

$$\bar{W} = 5.5 \gamma_f b L h_f (1 + \mu) / 3$$

dove:  $\gamma_f$  = massa volumica del manto d'asfalto

$b$  = larghezza della strada

$E_p, h_p, \nu_p$  e  $E_f, h_f, \nu_f$  sono rispettivamente il modulo di Young, la profondità ed il rapporto di Poisson dello strato di usura e del manto stradale.

$\mu$  = rapporto tra la densità dello strato d'usura e del manto stradale.

Il livello di accelerazione al punto di contatto della ruota sull'asfalto è fornito dalla conoscenza dei parametri coinvolti nella relazione.

Così ad esempio se:

Frequenza naturale delle sospensioni	12	Hz
Cedevolezza dei pneumatici	840 000	N/m
Velocità del veicolo	13.4	m/s
Profondità della cunetta	25	mm
Lunghezza della cunetta nella direzione di marcia	900	mm

si calcola un carico sulla superficie di asfalto il cui valore è pari a  $P_0 = 37 \cdot 700$  N che fornisce un fattore d'impatto pari a 1.6. Per una pavimentazione costituita da una lastra di cemento sul substrato con caratteristiche pari a quelle sopra elencate si calcola:

$$f_p = 33.2 \quad \text{Hz}$$

$$\bar{W} = 350 \cdot 000 \quad \text{N}$$

Sostituendo questi valori nell'equazione sopra esposta si ottiene il livello dell'accelerazione di picco in corrispondenza della discontinuità che risulta pari a

$$L_{p_0} = 123 \quad \text{dB ref. } 1\mu\text{m/s}^2$$

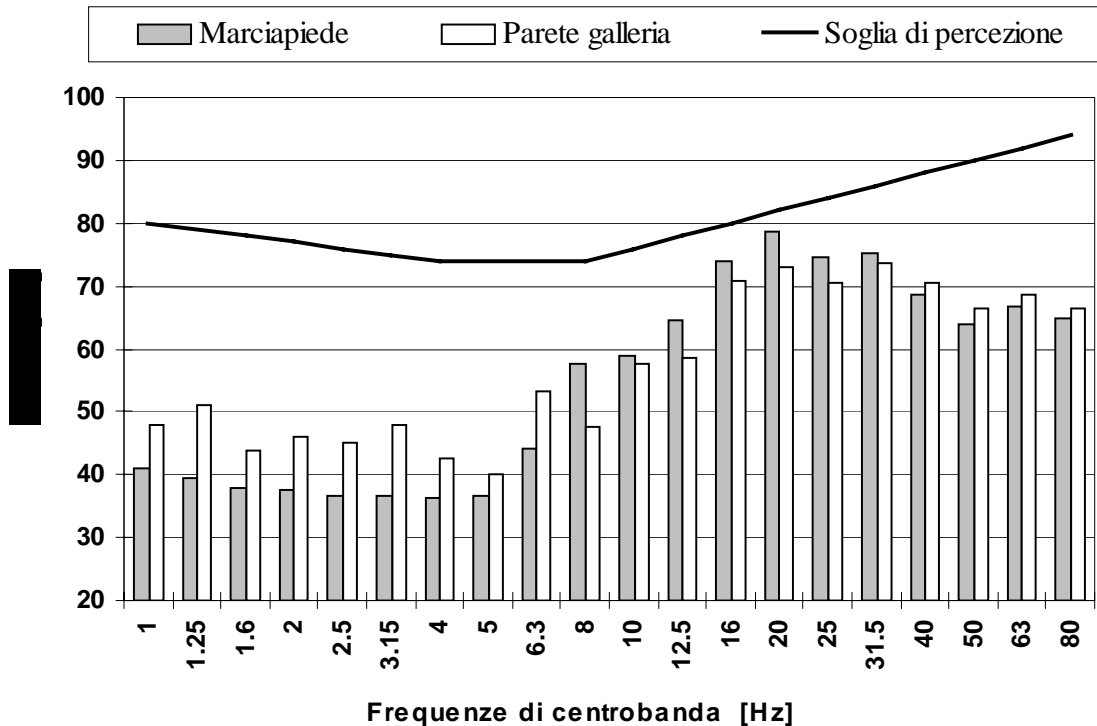
Il livello corrisponde al valore di accelerazione di  $1,6 \text{ m/s}^2$  cioè ad uno spostamento di 0,3 mm a 12 Hz.

### **3.2 Origine delle vibrazioni dei veicoli in galleria: previsione dei carichi e delle risposte**

Complessa e di difficile modellizzazione è la generazione delle vibrazioni per traffico nelle gallerie. Restando inalterato il concetto espresso per la generazione delle forze dinamiche a livello di contatto ruota-asfalto, non deve essere trascurato l'effetto del rumore sul rivestimento della galleria. Un elemento che condiziona l'accoppiamento del terreno con la sorgente di vibrazione è il carico del terreno sull'intera struttura in c.a. della galleria.

Per il calcolo di previsione delle vibrazioni indotte dal traffico nel sottosuolo si preferisce utilizzare degli spettri di vibrazione reali misurati sul rivestimento di gallerie stradali in esercizio. Nella Fig. 6 si riporta lo spettro equivalente dell'accelerazione misurato all'interno di una galleria naturale

### Accelerazioni per 1/3 di ottava

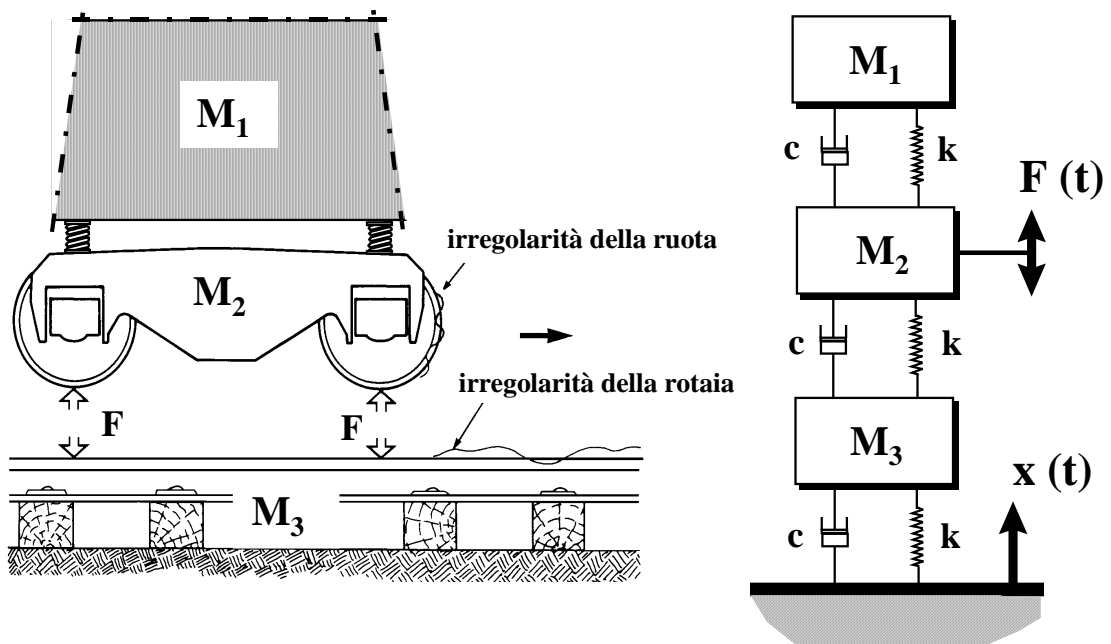


**Fig. 6** - Livello massimo di accelerazione per bande di 1/3 di ottava (pesato UNI 9614) rilevato sul marciapiede e sulle pareti di una galleria durante il transito di un camion  $L_{w,max} = 74.0$  dB; sul marciapiede ed  $L_{w,max} = 70.4$  dB sulla parete

### 3.3 Origine delle vibrazioni generate dai treni in superficie: previsione dei carichi e delle risposte

Per la ferrovia le forze che il transito di un treno esercita sul terreno sono molto diverse da quelle prodotte dal transito di un camion sull'asfalto. L'armamento ferroviario, i binari ecc. costituiscono un diverso sistema di accoppiamento con il suolo per cui lo spettro dell'accelerazione è determinato da numerosi fattori che non si rilevano per il traffico su gomma. Basti pensare all'azione combinata delle forze perpendicolari al terreno e alle forze laterali generate dai vincoli che la rotaia impone alla ruota del treno.

Notevole importanza assumono poi le forze prodotte dal rotolamento della ruota sulla rotaia per effetto delle irregolarità della ruota e della rotaia (marezzatura) come ben evidenziato nella Fig. 7.



**Fig.7 -** *Interazione ruota-rotaia: generazione della sollecitazione e modello equivalente semplificato*

### 3.3.1 Interazione Treno/Armamento

Con riferimento alla Fig. 7 può essere esemplificato un modello di comportamento del sistema. l'effetto delle forze dinamiche  $F$  che da un treno in transito si trasmettono alle rotaie, e da queste al terreno attraverso il sistema traversine-ballast, è prevedibile se è nota la funzione di trasferimento delle vibrazioni, meglio rappresentata dall'andamento dell'impedenza in funzione della frequenza (rapporto tra forza impressa e velocità di vibrazione del terreno).

La risposta in velocità della rotaia  $V_R$  è proporzionale all'impedenza della ruota e della rotaia ed ad un coefficiente legato alla rugosità superficiale secondo la relazione:

$$V_R \propto \frac{Z_W(\omega)}{Z_W(\omega) + Z_R(\omega)} \cdot (\text{azione combinata ruota e rugosità})$$

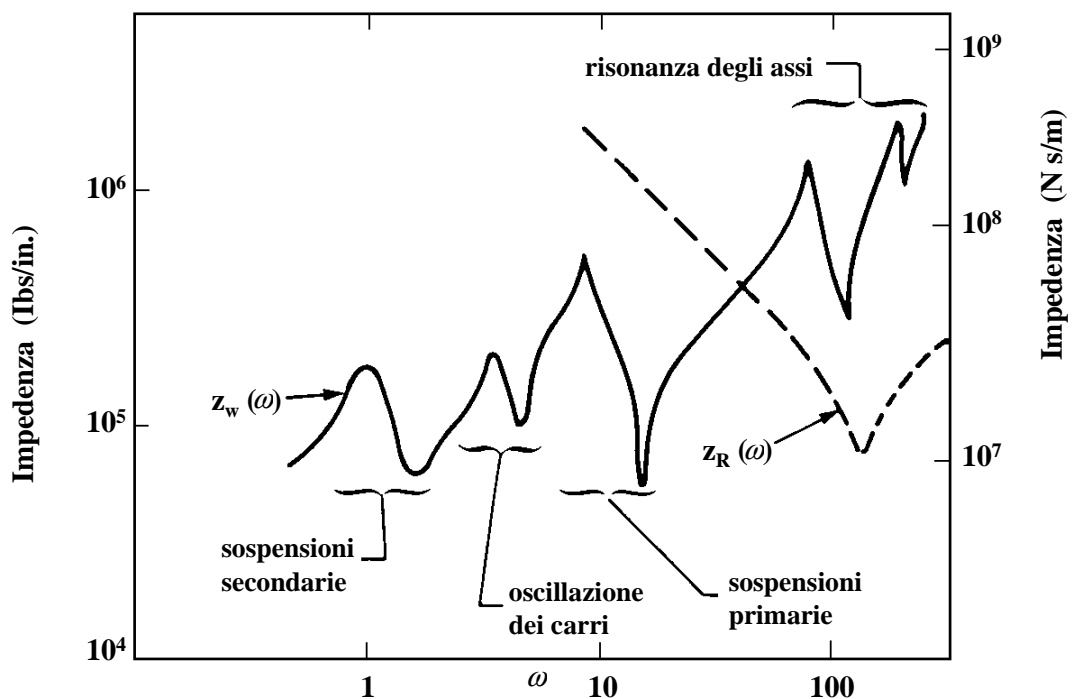
dove  $Z_W$  è l'impedenza della ruota e del sistema sospeso sulla ruota (carrozza con le sue sospensioni elastiche, carrello etc);  $Z_R$  è l'impedenza della rotaia compreso la traversina e l'eventuale sistema elastico di isolamento sotto la rotaia e sotto la traversina. Il sistema schematizzato nella Fig. 9 rappresenta, con parametri concentrati, la massa  $M1$  la costante elastica  $k1$  delle sospensioni e lo smorzamento  $c1$  della carrozza, la massa  $M2$ , la costante elastica  $k2$  e lo smorzamento  $c2$  del sistema costituito dal carrello e la quota parte di rotaia che interagisce dinamicamente con la ruota e che appoggia sulle traversine nonché la massa  $M3$ , la costante elastica  $k3$  e lo smorzamento  $c3$  del sistema di armamento che appoggia sul suolo.

L'equazione che governa il sistema è espressa sotto forma di equazione differenziale matriciale

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = 0$$

dove  $[M]$  è la matrice delle masse,  $[C]$  è la matrice degli smorzamenti e  $[K]$  è la matrice delle rigidità. La Fig. 10 riporta l'andamento delle impedenze  $Z_W$  e  $Z_R$  del sistema oscillante sopra il carrello e delle rotaie viste dal punto di applicazione della forza  $F$ . Negli andamenti delle due impedenze si riconoscono le risonanze dei diversi organi coinvolti nel fenomeno dinamico (sospensioni della carrozza sul carrello da un lato e sistema elastico costituito dall'armamento dall'altro).

Le risonanze alle frequenze inferiori di 10 Hz sono dovute alle sospensioni secondarie (carrozza/carrello e traversine). Alle frequenze inferiori a 5 Hz  $Z_W$  è molto piccola rispetto a  $Z_R$ : la rotaia praticamente non risponde alle sollecitazioni della ruota.

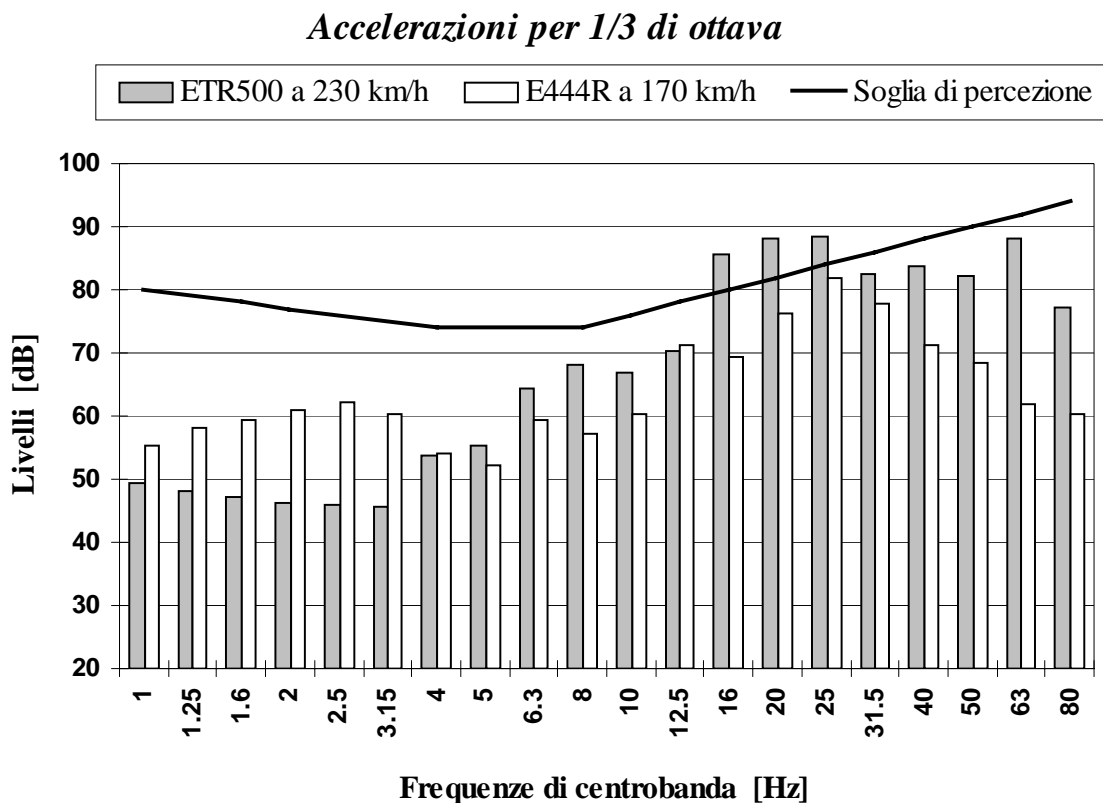


**Fig. 8 - Impedenza meccanica del sistema carrozza ruota  $Z_W$  e dell'armamento  $Z_R$**

Tra 10 e 30 Hz l'impedenza del veicolo è minore dell'impedenza della rotaia per cui si ha un maggior trasferimento di energia nel terreno. Il fenomeno è prodotto dalla cedevolezza del sistema di sospensione delle carrozze che hanno un notevole effetto nella gamma di frequenze indicate.

Il massimo trasferimento di energia nella gamma di frequenze tra 50 e 200 Hz è facilmente spiegabile se si considerano le impedenze meccaniche  $Z_W$  e  $Z_R$  di un sistema massa-molla: l'impedenza della ruota è controllata dalla massa mentre l'impedenza della rotaia è controllata dalla molla, per cui esse hanno segno opposto. Da qui i valori minimi del denominatore della relazione con valori elevati della velocità di vibrazione. Nella figura si individuano le risonanze delle sospensioni secondarie, delle sospensioni primarie, delle oscillazioni delle carrozze e le risonanze degli assi.

L'uso di un modello di previsione di questo tipo è necessario quando si vogliono studiare gli interventi particolari sull'armamento ai fini della riduzione delle vibrazioni trasmesse al terreno. Nel grafico di Fig. 9 si riportano gli spettri dell'accelerazione rilevati a 3 m di distanza dal rilevato ferroviario durante il transito di un treno ad alta velocità ETR500 e di un treno tradizionale E444R. Sono visibili i massimi di trasmissione dell'energia vibratoria alle frequenze di 8, 25 e 63 Hz per il treno ad alta velocità ed i massimi alle frequenze di 6.3, 12.5 e 25 Hz per il treno più lento.



**Fig. 9 -** Spettro di emissione di un treno ad alta velocità ETR500 alla velocità di 230 km/h e di un treno E444R alla velocità di 170 km/h. I livelli globali pesati UNI a 3 m di distanza dal rilevato ferroviario sono:  $L_{w,eq} = 85.0$  dB per l'ETR500 ed  $L_{w,eq} = 76.0$  dB per il treno E444R.



### **3.3.2 Le vibrazioni prodotte dal transito di tram in aree urbane**

Nell'ambito urbano il tram, sul proprio armamento, si comporta come un treno a velocità ridottissima e che subisce in continuazione accelerazioni e rallentamenti. D'altro canto c'è da segnalare la disomogeneità del terreno sotto l'armamento per lo più occupato dalla rete dei sottoservizi di altri enti (acqua, gas, fognature, cavi elettrici, telefonici etc) che rendono assolutamente vario ed imprevedibile il sottosuolo. Si aggiungono a queste variabili anche il comportamento dinamico della pavimentazione stradale che copre l'armamento tranviario per consentire l'uso promiscuo della sede ad autobus, mezzi pubblici e mezzi privati. Un calcolo di previsione mediante modelli diventa estremamente difficoltoso e troppo puntuale per poter essere esteso a tutta la linea almeno in prossimità dei ricettori sensibili. Non resta che utilizzare i numerosi dati che possono essere rilevati in diverse sezioni stradali urbane ove sono presenti numerose tipologie di armamento e di tracciato e situazioni tipiche imposte dalla strada (presenza di viali, binari in aderenza ai marciapiedi, incroci, scambi )

I dati di misura, raccolti lungo i tre assi di riferimento e, possibilmente, in due punti distinti della sezione viaria uno in prossimità dei binari e l'altro sulla fonazioni dell'edificio più vicino, consentono il calcolo di previsione del livello all'interno delle abitazioni.

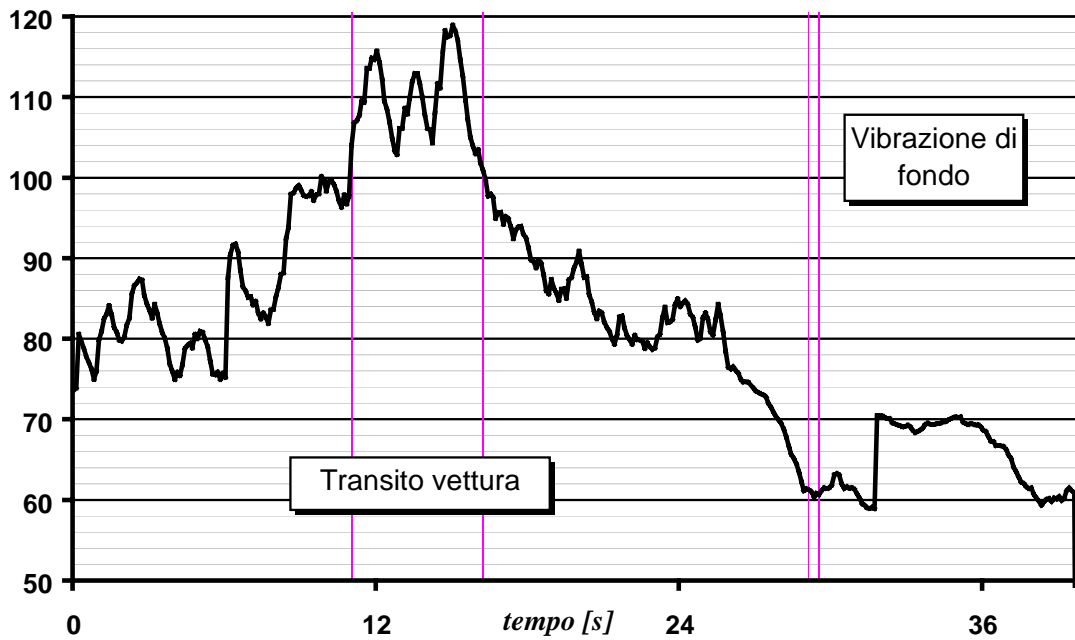
Nella Fig.10 si riporta il tracciato grafico del livello di accelerazione nella gamma di frequenze da 1 a 80 Hz rilevato sulla strada a 90 cm dal binario e sulle fondazioni di un edificio posto a 980 cm dal binario durante il transito di un tram.

**Tracciato storico del livello di accelerazione [dB]**

**(1-80 Hz)**

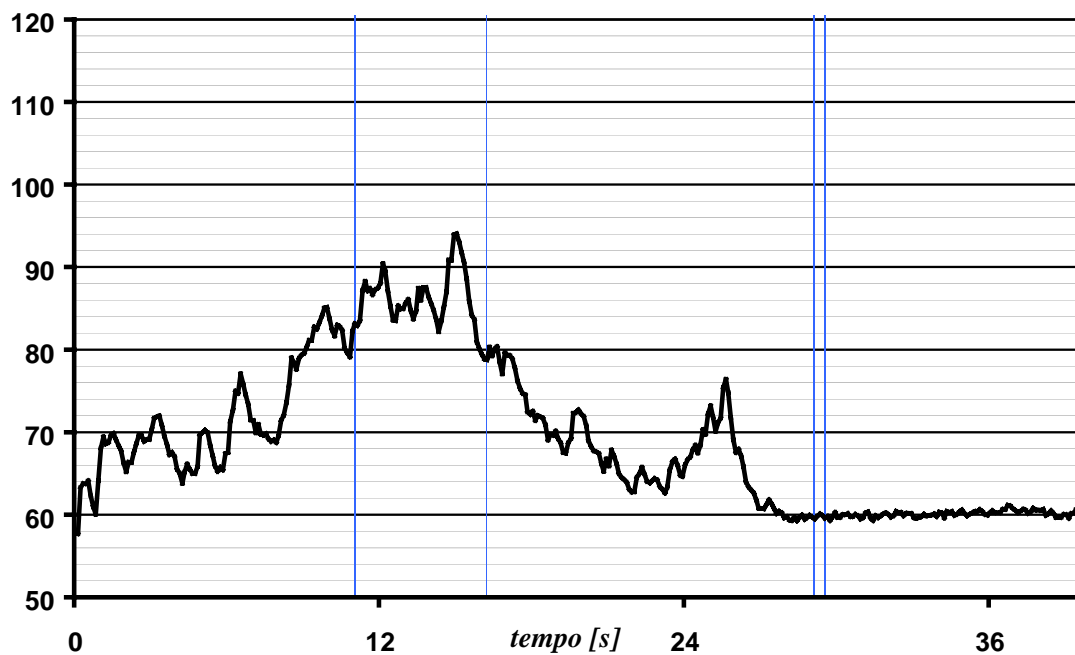
**Canale 1** Sul terreno a 90 cm dall'armamento

**Verticale**



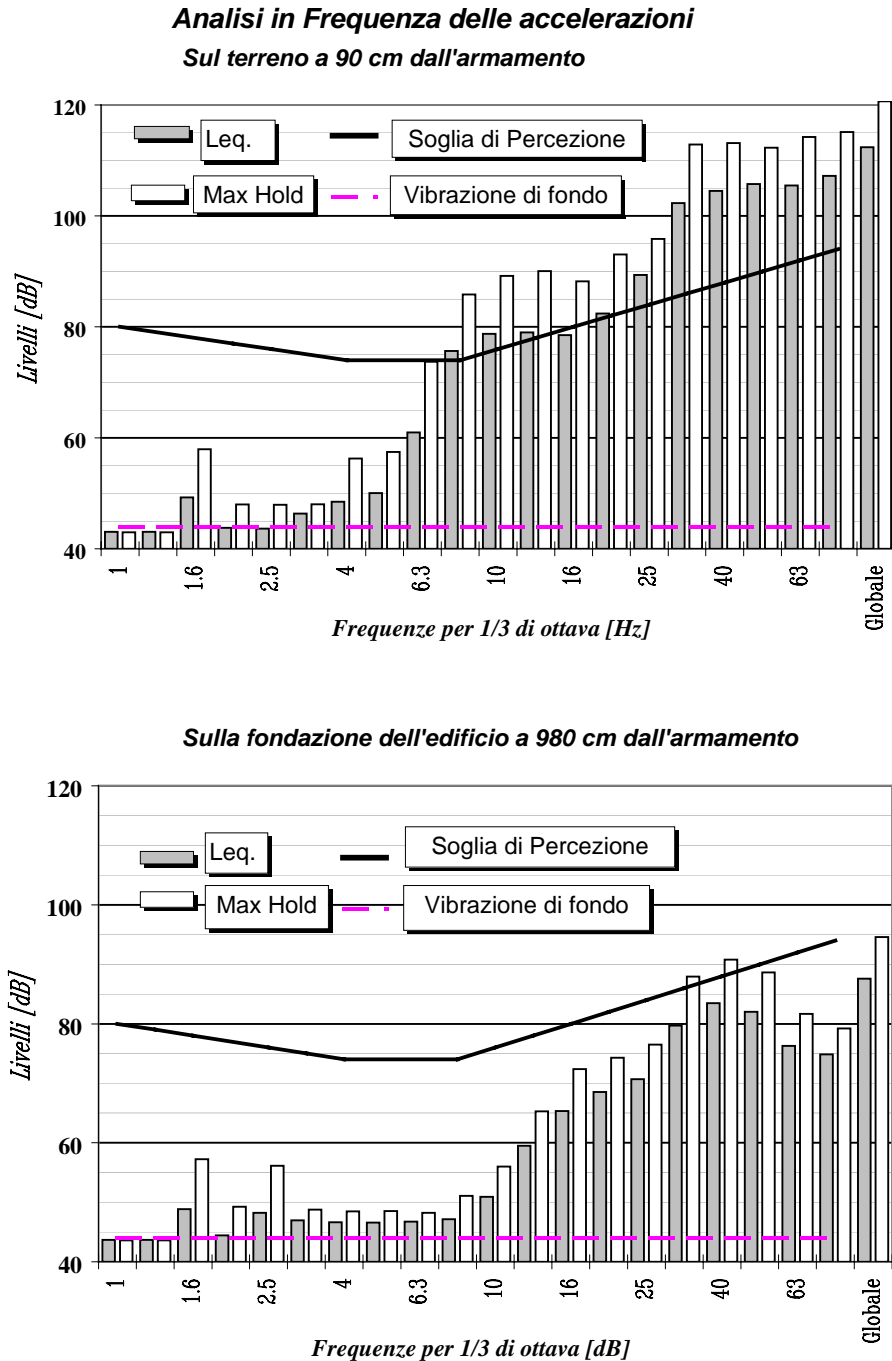
**Canale 2** Sulla fondazione dell'edificio a 980 cm dall'armamento

**Verticale**



**Fig.10** - Andamento del livello di accelerazione (componente verticale) durante il passaggio di un tram. Confronto tra il livello a 90 cm dal binario e quello sulla fondazione dell'edificio a 980 cm dal binario.

In corrispondenza del solo passaggio del tram indicato nella precedente figura si ricava lo spettro della componente verticale dell'accelerazione nei due punti di misura che si riportano nella Fig.11.



**Fig.11** - Livelli equivalenti dell'accelerazione per bande di terzi di ottava rilevati a 90 cm di distanza dal binario  $L_{w,eq} = 96.5$  dB e sulla fondazioni di un edificio distante 980 cm dal binario  $L_{w,eq} = 73.7$  dB durante il transito di un tram.

Si osserva che il transito del tram manifesta, nella gamma di frequenze da 1 a 80 Hz, un massimo di energia alla frequenza di 40 Hz. Utilizzando i livelli per bande di terzi di ottava dell'accelerazione misurata in prossimità della sede tranviaria e quelli rilevati sulle fondazioni dell'edificio si ricava il modulo della funzione di trasferimento delle vibrazioni in un tessuto urbano ad alta concentrazione edilizia.

### 3.4 Origine delle vibrazioni generate dai treni in galleria: previsione dei carichi e delle risposte

Il problema della emissione delle vibrazioni dalle gallerie ferroviarie è di primaria importanza specialmente per gli attraversamenti delle città in sotterraneo e per le metropolitane. Si ricorda che in questo caso gli effetti più importanti sono il disturbo della vibrazione dei solai delle abitazioni ed il disturbo da rumore trasmesso per via solida.

Per la impostazione di un calcolo di previsione occorre determinare il livello di vibrazione del rivestimento della galleria e considerare il tipo di struttura da realizzarsi con particolare riferimento agli infilaggi ed ai pali di consolidamento del suolo. Il modello analitico è molto complesso e dipende sempre dalle soluzioni progettate localmente per superare le difficoltà di realizzazione incontrate durante lo scavo.

Studi approfonditi sulle caratteristiche di emissione di vibrazioni dei tunnel per metropolitane sono stati condotti da Ungar e Bender i quali hanno messo a punto un metodo semi-empirico per la previsione del livello di vibrazione basato su numerose misure sperimentali. Gli autori forniscono lo spettro di vibrazione standard ricavato attraverso numerose misure condotte sui rivestimenti delle metropolitane di Parigi, di New York e di Toronto. Lo spettro si riferisce ad una velocità media di transito pari a 56 km/h con rotaie attaccate rigidamente alle traversine.

Gli autori, poi, propongono di correggere lo spettro di emissione con l'aiuto di un secondo grafico per ottenere i livelli ad altre velocità di transito. I livelli riportati nel grafico si applicano a tutte le bande di frequenza dello spettro originario.

Il livello di accelerazione trasmesso alle pareti di un tunnel è funzione del tipo di ancoraggio della rotaia alla traversina. Se si usano supporti resilienti per ridurre la trasmissione delle vibrazioni con cedevolezza  $K$  inferiore a  $1.4 \times 10^8$  N/m<sup>2</sup> allora occorre apportare allo spettro la seguente correzione  $\Gamma$

$$\Gamma = 5 \cdot \text{Log} \frac{K}{1.4 \cdot 10^8} \quad \text{dB}$$

valida per le basse frequenze e che diventa pari a

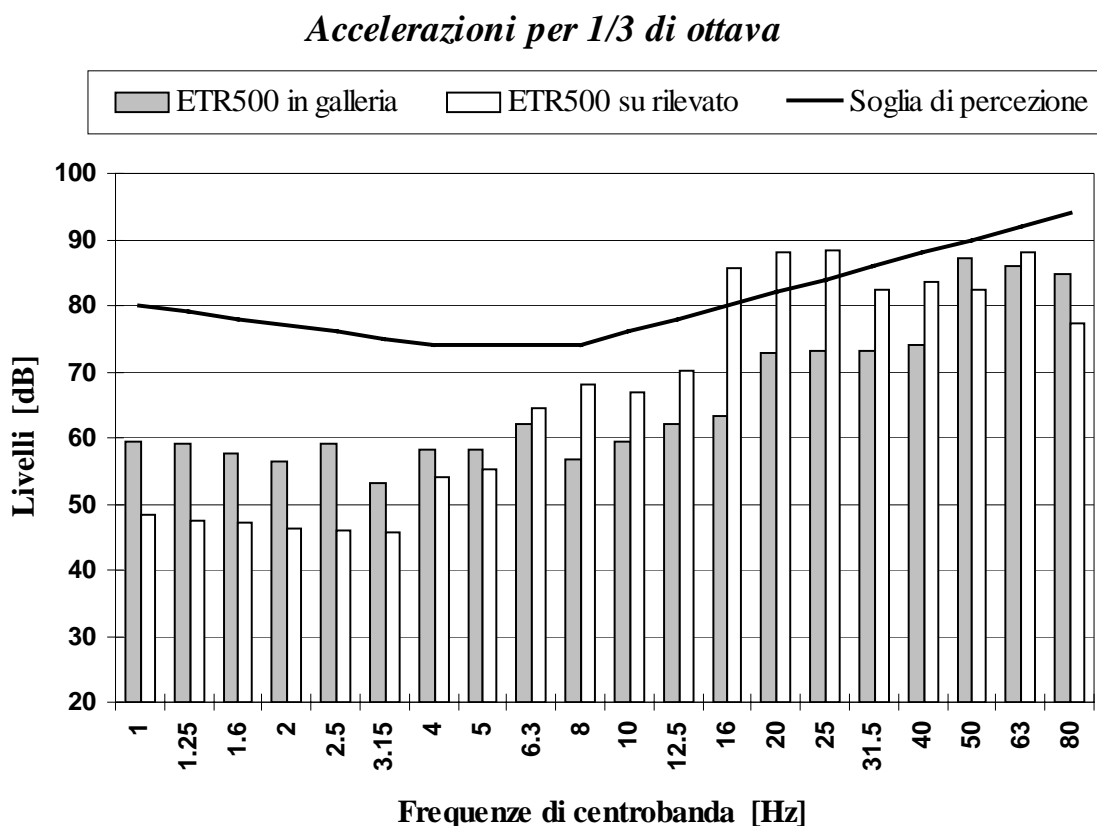
$$\Gamma = 20 \cdot \text{Log} \frac{K}{1.4 \cdot 10^8} \quad \text{dB}$$

per le frequenze nel campo dell'udibile (utile per la valutazione e per la riduzione del rumore indotto nelle abitazioni per effetto delle vibrazioni).

Noto il livello di vibrazione su tutto il rivestimento della galleria (trattasi di una superficie di contatto con il terreno molto estesa rispetto a quella dell'armamento in rilevato) si considera la sorgente di tipo lineare e si calcola la potenza irradiata. Nella maggior parte delle situazioni che si rilevano in pratica la sorgente non può essere considerata lineare in quanto la distanza dei ricettori dal rivestimento della galleria può

essere paragonabile allo sviluppo dell'arco della galleria stessa. In pratica occorre considerare anche la lunghezza e le superficie dei pali di consolidamento che sono solidali con il rivestimento del tunnel. In certe situazioni urbane non è escluso che l'infilaggio di alcuni pali in senso obliquo possa realizzare delle situazioni di contatto del rivestimento della galleria con le fondazioni dell'edificio realizzando, in questo modo, ponti meccanici che risultano essere facile via di trasmissioni dell'energia vibratoria.

Nella Fig. 12 si riporta lo spettro delle vibrazioni rilevate sul rivestimento di una galleria durante il passaggio del treno ETR500 alla velocità di 230 km/h e si confronta questo con il livello misurato a 3 m sul rilevato ferroviario dello stesso treno alla stessa velocità.



**Fig.12** - confronto tra livello di accelerazione misurato sul rivestimento di una galleria durante il transito del treno A.V.  $L_{w,eq} = 75.7$  dB per il treno in galleria.  $L_{w,eq} = 85$  dB per il treno su rilevato.

Si osserva che su rilevato i livelli sono più elevati con massimo alla frequenza di 20-25 Hz; in galleria alle basse frequenze i livelli sono più contenuti mentre raggiungono valori più elevati alle alte frequenze (superiori a 50 Hz). La rigidità della galleria attenua l'energia alle basse frequenze mentre la esalta alle alte frequenze. Questo fenomeno, segnalato in letteratura nella quale non sono descritte le tipologie dell'armamento e la sezione della galleria, crea apprensione per la trasmissione del rumore per via solida. In pratica i risultati possono essere capovolti per velocità diverse del treno e per tipologie diverse dell'armamento.

## 4. Propagazione delle vibrazioni nel terreno

Per calcolare l'attenuazione delle vibrazioni in funzione della distanza dalla sorgente è di fondamentale importanza la conoscenza delle caratteristiche fisiche del terreno e dell'accoppiamento tra sorgente e terreno.

La sorgente infatti immette energia meccanica nel suolo la quale si propaga in diversi *modi* che possono essere eccitati direttamente dalla sorgente oppure trasformati durante il percorso di propagazione dell'energia.

Si ricorda che l'onda elastica, prodotta dall'azione di una forza variabile nel tempo, può essere generata sia sulla superficie di discontinuità solido-aria (macchinari ancorati al terreno, traffico su strada, su ferrovia, rumore che investe la facciata di un edificio ecc.), sia all'interno del terreno (terremoti, metropolitane, attività di scavo delle gallerie, traffico in galleria, rumore in galleria ecc.). In pratica il mezzo solido entro il quale si propaga un'onda elastica non è omogeneo ma presenta delle variazioni continue o brusche delle costanti elastiche (si pensi alla stratificazione del terreno, alla presenza di falde freatiche ecc.), per cui si manifestano fenomeni di attenuazione, di rifrazione e di riflessione dell'onda elastica con possibili trasformazioni del *modo* di propagazione.

### 4.1 I modi di propagazione

In un mezzo omogeneo solido ed infinito all'interno del quale agisce una sorgente di vibrazioni, la perturbazione elastica prodotta può propagarsi con *modo* longitudinale e/o con *modo* trasversale.

- *Modo longitudinale*: (possibile nei solidi, liquidi ed aeriformi) è la propagazione dell'energia meccanica con moto delle particelle nella direzione di propagazione dell'onda. Nella direzione di propagazione sono presenti zone di compressione e di rarefazione; le loro distanze definiscono mezza lunghezza d'onda  $\lambda$ .
- *Modo trasversale*: (possibile solo nei solidi) è la propagazione dell'energia meccanica nella direzione di propagazione con moto delle particelle nella direzione perpendicolare a quella della propagazione dell'onda. Tale modo di propagazione è possibile nei solidi poichè solo essi reagiscono allo sforzo di taglio: caratteristica di tali onde è l'assenza di zone di rarefazione e di compressione (non ci sono, cioè fluttuazioni localizzate della densità del mezzo come nel *modo* di propagazione longitudinale). Anche in questo caso si definisce una lunghezza d'onda  $\lambda$ .

Sulla superficie di discontinuità solido-fluido di un semispazio solido (es. il terreno) sono possibili due modi di propagazione della perturbazione elastica:

- *Onde di Rayleigh*: sono onde superficiali caratterizzate da un moto delle particelle ellittico con componente verticale ed orizzontale. L'ampiezza del moto decresce esponenzialmente all'aumentare della profondità dalla superficie. Ad una distanza di una lunghezza d'onda dalla superficie l'ampiezza della vibrazione è minore del 10% di quella sulla superficie. Considerando la frequenza di 20 Hz e la velocità trasversale nel terreno pari a 150 m/s, alla profondità di 7.5 m l'ampiezza dell'onda di RAYLEIGH è già ridotta del 10%.
- *Onde di Love*: sono onde superficiali che si manifestano su uno strato con caratteristiche diverse da quello sottostante.

L'interesse pratico dei *modi di propagazione* delle onde sopra elencate è evidente nei casi in cui la sorgente di vibrazioni è situata all'esterno di edifici, sia in superficie che in profondità. Ricordando che la propagazione delle onde di vibrazione può avvenire con modo longitudinale o con modo trasversale e che le onde superficiali di Rayleigh si attenuano molto meno delle onde di compressione o di taglio, appare chiara l'importanza di conoscere quale "modo", diverso per sorgente in superficie o in galleria, si propaga nel terreno.

Concentrando l'attenzione sull'attenuazione per dissipazione (non considerando, cioè, quella per divergenza del fascio), il decadimento delle ampiezze con la distanza è dato dalla relazione:

$$A(r) = A_0 e^{-\frac{\omega \zeta}{2c} r}$$

dove:  $\omega = 2\pi f$  radianti / s  
 $\zeta$  è il fattore di perdita del terreno  
 $r$  è la distanza dalla sorgente  
 $c$  è la velocità del particolare modo di propagazione

Le onde di compressione (onde longitudinali) viaggiano a velocità di 2,5 - 4 volte superiori alla velocità delle onde trasversali e di quelle di Rayleigh. Conseguentemente se il fattore di perdita è dell'ordine del 10%, ci si aspetta che, a poche lunghezze d'onda dalla sorgente, le onde longitudinali predominino sulle altre (il fattore di perdita è lo stesso per tutti i modi di propagazione).

Una distanza pari a poche lunghezze d'onda dalla sorgente è rilevante per un'onda longitudinale: se  $c=1500$  m/s, una distanza di tre lunghezze d'onda a 50 Hz corrisponde alla distanza dalla sorgente  $r = 90$ m.

#### 4.2 Propagazione nel terreno per sorgenti sotterranee

Un'espressione analitica per il calcolo delle vibrazioni ad una certa distanza dalle gallerie può fornire valori errati per la natura non omogenea del suolo e per il fatto che le stratificazioni geologiche sono a volte di dimensioni inferiori o paragonabili ad una lunghezza d'onda del modo che si propaga.

Ungar e Bender propongono il calcolo dell'attenuazione in funzione della distanza dalle pareti del tunnel utilizzando una relazione del tipo:

$$A_r = A_s + A_d + A_i \quad \text{dB}$$

dove:

$$A_s = 10 \cdot \text{Log} \frac{R+x}{R}$$

$$A_d = 4.34 \frac{\omega \eta x}{c}$$

$$A_i = 20 \cdot \text{Log} \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\rho_c c_c}{\rho_a c_a} \right)$$

con R si indica il raggio della galleria ed x è la distanza dalla galleria.

Le attenuazioni sopra riportate si riferiscono alla divergenza geometrica per sorgente lineare  $A_s$ , all'attenuazione prodotta per dissipazione interna  $A_d$  ed all'attenuazione dovuta alla variazione delle caratteristiche del terreno che l'onda incontra nel tragitto di propagazione.

Gli autori suppongono che il modo unico di propagazione sia quello per onde longitudinali e, per esso, forniscono i seguenti valori:

**TAB I**  
*Caratteristiche meccaniche dei diversi terreni*

Tipo di terreno	Velocità di propagazione per onda longitudinale m/s	Fattore di perdita $\eta$	Massa volumica $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
Roccia	3500	0.01	2.65
Sabbia	600	0.10	1.60
Argilla	1500	0.50	1.70

La propagazione delle vibrazioni sul terreno è di difficile modellizzazione per le numerose riflessioni, rifrazioni e diffrazioni che l'onda meccanica incontra per effetto della disomogeneità del sottosuolo.

Considerando la tipologia di strada più semplice si osserva che il "modo" di propagazione più frequente è quello di un'onda di superficie di Rayleigh che decade con legge inversa alla radice quadrata della distanza per la sola divergenza geometrica del fascio. Ci sono poi altri meccanismi dissipativi che riducono ulteriormente l'energia meccanica che si propaga.

Rudder considera le due componenti dell'attenuazione: divergenza geometrica e attenuazione del terreno. Il livello di accelerazione alla distanza r dalla sorgente è dato da:

$$L(r) = L_0 + 10 \cdot \text{Log} \frac{d_0}{r} - 8.69\alpha(r - d_0) \quad \text{dB}$$

dove:  $L_0$  è il livello di riferimento

$d_0$  è la distanza di riferimento per  $L_0$

$r$  è la distanza dalla sorgente

$\alpha$  è la costante di attenuazione del terreno

Il termine relativo all'attenuazione per dissipazione dell'energia meccanica è ottenuto dalla relazione  $e^{-\alpha(r-d_0)}$ .

I valori di  $\alpha$  forniti da Rudder sono i seguenti:

**TAB. II**



*Valori della costante di attenuazione  $\alpha$  per diversi tipi di terreno e per la frequenza di 15 Hz*

Tipo di terreno	velocità dell'onda trasversale m/s	$\alpha$ per m
argilla umida	152	0,025 - 0,25
deposito alluvionale di argilla	152	0,019 - 0,43
argilla bagnata	152	0,31 - 0,50
Depositi ad umidità ambientale	259	0,04 - 0,13
Sabbia asciutta	152 - 396	0,007 - 0,07
Sabbia compatta con ghiaia	250	0,015 - 0,045
Ghiaia e sabbia di deposito	250	0,023 - 0,053
Sabbia granulosa satura d'acqua	110	0,09 - 0,3
Sabbia granulosa satura d'acqua ghiacciata	110	0,05 - 0,17

I valori sopra riportati sono stati ottenuti per la frequenza  $f=15$  Hz e per  $\alpha = \frac{2\pi f \zeta}{c}$  dove  $\zeta$  è il fattore di perdita del terreno e  $c$  è la velocità di propagazione per modo di propagazione trasversale.

L'equazione sopra riportata si riferisce ad una sorgente puntiforme. Nel caso di veicoli in moto sulla strada la distanza  $r$  dipende dal tempo. Il livello equivalente energetico si ottiene per integrazione sul tempo di transito. Considerando  $N$  veicoli il livello equivalente di accelerazione relativo ad una sorgente lineare è dato da:

$$L_e = L_0 + 10 \cdot \text{Log} \frac{d_0}{Vt} - 5 \cdot \text{Log}(\alpha d) - 8.69 \alpha (d - d_0) + 10 \cdot \text{Log}(N) + 2.5 \quad \text{dB}$$

dove:  $t$  è il tempo di transito  
 $V$  è la velocità dei veicoli (m/s)  
 $d$  è la distanza del ricevitore dalla strada (m)

Il valore massimo del livello di accelerazione lo si raggiunge per  $r = d$ .

Per quanto riguarda il contenuto spettrale della forza eccitatrice, questo risulta inferiore per eccitazioni impulsive prodotte da dossi o buche rispetto a quello prodotto per rugosità del manto stradale. Rudder suggerisce di utilizzare per questo secondo caso valori di  $\alpha$  ridotti di 1/3. Con riferimento all'esempio di calcolo per eccitazione impulsiva prodotta dalle buche sull'asfalto, l'equazione relativa alla sorgente puntiforme fornisce il livello di accelerazione ad una determinata distanza. Alla distanza di 10 m, ad esempio, supponendo un livello massimo (di picco) pari a 124 dB ref.  $1\mu\text{m/s}^2$  e considerando  $\alpha=0,15\text{m}$  l'equazione fornisce i seguenti valori del livello e della accelerazione a 10 m di distanza:

$$L_{(10\text{m})} = 110 \text{ dB (ref. } 1\mu\text{m/s}^2)$$

$$a_{(10m)} = 0,32 \text{ m/s}^2$$

I contributi all'attenuazione sono pari a 10 dB per la divergenza dell'onda ed a 4 dB per la dissipazione nel terreno.

A distanze più elevate l'effetto della dissipazione di energia è più consistente. Si calcola che a 30 m dalla discontinuità sull'asfalto l'attenuazione per divergenza dell'onda sia pari a 15 dB; quella per dissipazione sia pari a 13 dB. Per l'esempio di calcolo impostato si ottiene:

$$L_{(30m)} = 81 \quad \text{dB ref. } 1\mu\text{m/s}^2$$

$$a_{(30m)} = 0,011 \quad \text{m/s}^2$$

I valori sopra calcolati sono in buon accordo con quelli misurati sul territorio.

## 5. Risposta degli edifici alle vibrazioni indotte dal traffico stradale

Le strutture di un edificio sono eccitate a vibrare dall'energia sonora a bassa frequenza che investe le facciate e dall'energia meccanica che si trasmette attraverso le fondazioni.

### 5.1 Eccitazione per via aerea

Per quanto riguarda l'eccitazione per via aerea (rumore) è possibile prevedere con il calcolo il livello sonoro alle basse frequenze che investe la facciata dell'edificio e il conseguente livello sonoro all'interno dell'abitazione. In questo caso si verifica un'esaltazione del livello di vibrazione alle basse frequenze per effetto della risonanza del volume delle camere. Il livello di pressione sonora produce una forza sulle pareti divisorie di ampiezza non trascurabile. Basti pensare che un livello di 94 dB (comune nelle strade urbane alla frequenza di 16 Hz) esercita una pressione di 1 N/m<sup>2</sup>. Un primo elemento edilizio soggetto a vibrazioni indotte dal rumore di traffico stradale è il serramento di facciata. Sono stati misurati livelli di accelerazione delle lastre di vetro di 116 dB, ref. 1 $\mu$ m/s<sup>2</sup> per livelli di pressione sonora sulla facciata pari a 100 dB alla frequenza di 50 Hz.

Un secondo componente edilizio è costituito dal pavimento e dai divisori interni. Tenendo presente che in una stanza di dimensioni normali il modo fondamentale di risonanza per il rumore è di 40 Hz, si osserva un incremento di energia sonora a tale frequenza ed un corrispondente picco di accelerazione del pavimento. E' interessante confrontare il livello di vibrazione del pavimento con il livello di rumore all'interno di una stanza generati dal transito di un camion da 32t. Si osserva, infatti, una trasformazione dello spettro di rumore per il filtraggio meccanico prodotto dal pavimento attraverso la funzione di trasferimento rumore/vibrazione.

## 5.2 Eccitazione per via solida

La trasmissione per via solida delle vibrazioni avviene attraverso le fondazioni. La massa di un edificio che carica il terreno crea una discontinuità nel mezzo di propagazione (suolo  $\Rightarrow$  edificio) con conseguente riflessione dell'energia meccanica. Malgrado questo disadattamento di impedenza meccanica il livello delle vibrazioni delle strutture dell'edificio può subire un'esaltazione, per effetto della risonanza, se confrontato con il valore misurato sul terreno.

In molti casi pratici si è riscontrato un aumento della velocità di vibrazione delle strutture di un fattore compreso tra 0,5 e 5,0 e con frequenze nella gamma tra 25 e 30 Hz. L'esaltazione dell'ampiezza di vibrazione è dovuta all'eccitazione del modo fondamentale di risonanza delle strutture. Le frequenze tipiche fondamentali, che dipendono dalle dimensioni fisiche e dai parametri meccanici degli elementi strutturali, sono:

**TAB. III**

*Frequenze di risonanza di alcuni elementi di un edificio*

<b>Elemento strutturale</b>	<b>frequenze di risonanza</b>
Travi	5 - 50 Hz
Pavimenti e tramezzi	10 - 30 Hz
Finestre	10 - 100 Hz
Soffitti in gesso	10 - 20 Hz

Questi valori di frequenze trovano riscontro con le frequenze alle quali si concentra la massima energia di vibrazione prodotta dal traffico stradale pesante. Il livello di picco dell'accelerazione di 109 dB ref.  $1\mu\text{m/s}^2$  calcolato sul terreno a 10 m dalla sorgente per effetto della discontinuità ipotizzata (assumendo un incremento di 5 dB per risonanza delle strutture) produce un livello di accelerazione pari a 114 dB ref.  $1\mu\text{m/s}^2$  che è in grado di causare sensibili danni alle strutture.

## 6. Modelli di calcolo di previsione

I modelli di calcolo in senso globale non sono disponibili sotto il profilo commerciale. Il professionista può costruire specifici modelli a seconda delle diverse esigenze e del particolare tipo di infrastruttura di trasporto che sta analizzando. Qui di seguito si riporta un esempio di calcolo dei livelli di vibrazione sulle strutture di un edificio noto lo spettro di eccitazione sul terreno.

In primo luogo per la valutazione degli effetti di propagazione delle vibrazioni negli edifici si deve tenere conto dei seguenti fattori:

- attenuazione dovuta alla perdita di energia vibrazionale dovuta all'accoppiamento terreno - fondazioni;
- amplificazione dovuta alla presenza di eventuali fenomeni di risonanza con le frequenze proprie della struttura dell'edificio;
- variazione del livello dovuta alla propagazione, dal basso verso l'alto, passando dai piani bassi verso quelli alti;
- trasformazione delle vibrazioni di pareti e solaio in rumore.

## 6.1 Accoppiamento suolo fondazioni

Per quanto riguarda il primo fattore, in base agli studi sperimentali effettuati e reperibili in letteratura, è possibile distinguere le diverse situazioni esposte nella tabella in cui sono riportati i valori delle attenuazioni in funzione della bande di frequenza ed in funzione della tipologia di edificio.

Tipo di edificio	4 Hz	8 Hz	16 Hz	31.5 Hz	63 Hz	125 Hz
in muratura su pali	5	5	6	7	10	13
in muratura su platea	10	10	12	14	13	13
villino	(4°)	(4°)	4	5	5	4
in muratura a 2-4 piani	4	5	10	12	12	11
commerciali 1-2 piani	(7°)	(7°)	7	8	8	7

Considerando per ciascun tipo di edificio il valore della attenuazione ed applicandolo a ciascuna banda di frequenze della eccitazione si ottengono i livelli sulla fondazione.

## 6.2 Amplificazione dovuta alla presenza di risonanze

Il secondo parametro che ha influenza sulla propagazione delle vibrazioni negli edifici dipende invece dalla eventuale coincidenza di uno o più componenti vibratorii con le risonanze della struttura. E' evidente che per poter tenere conto di questo fenomeno si devono valutare i valori delle frequenze proprie della struttura.

In prima approssimazione e senza entrare nel dettaglio è possibile stimare le frequenze proprie con calcoli semplificati.

Per le frequenze orizzontali la norma DIN 4150 suggerisce di calcolare le frequenze proprie ai vari piani con la formula

$$f_0 = 10/n$$

dove n è il numero del piano.

Per le frequenze connesse a modi verticali si può scrivere per la frequenza fondamentale:

$$f(v1) = k^2 h / (2 \pi L^2) \sqrt{E / (12 \cdot \delta)}$$

dove:

k è un fattore dipendente dalle condizioni di vincolo

h è lo spessore del solaio

L è la luce libera di inflessione

E è il modulo di Young

δ è la densità del materiale costituente il solaio

Per quanto riguarda k si possono assumere i seguenti valori:

solaio appoggiato  $k = \pi$

solaio incastrato  $k = 4.73$

Considerando una condizione intermedia si ottiene:

$$k^2 = 16.12$$

Oltre alla prima frequenza di risonanza verticale è considerare anche la seconda frequenza. Essa si calcola assumendo  $k^2$  pari al valore fornito dalla relazione:

$$k^2 = (4 \cdot 4 \cdot \pi^2 + 7.853^2) / 2 = 50.57$$

A seconda del rapporto tra frequenza di eccitazione  $f$  e frequenza propria ( $f_0$ ) varia il fattore di trasferimento  $H(f)$  che dipende anche dallo smorzamento  $\xi$ . Questo per strutture in cemento armato sollecitate lontano dal limite elastico può essere assunto pari ad un valore compreso tra 0.04 e 0.07. Nei calcoli di simulazione si può assumere il valore di  $\xi = 0.05$

Conosciuta la funzione di trasferimento per eseguire correttamente l'analisi strutturale sotto un'eccitazione di tipo casuale si deve determinare la funzione di densità spettrale dell'eccitazione al piede della struttura e quindi risalire alla funzione di densità spettrale della vibrazione dell'edificio stesso.

Da quest'ultima poi è possibile valutare lo spettro delle accelerazioni nell'edificio.

La funzione densità spettrale può essere posta, in via del tutto approssimata come pari a

$$S(f) = L(f) / \Delta f$$

dove  $L(f)$  è il livello di vibrazione, espresso come valore quadratico medio, in corrispondenza ad una certa banda individuata dal valore centrale  $f$  e larghezza di banda  $\Delta f$ .

La propagazione all'interno dell'edificio dà luogo ad una funzione di densità spettrale modificata rispetto a quella del piede; tale funzione  $S'(f)$  è calcolabile con la relazione:

$$S'(f) = |H(f)|^2 \cdot S(f)$$

Se successivamente si opera l'operazione inversa rispetto a quella precedentemente eseguita, si può calcolare dalla nuova funzione di densità spettrale la nuova distribuzione dei livelli di vibrazione. In questo caso la relazione è:

$$L(f) = S'(f) \cdot \Delta f$$

Il valore di  $|H(f)|^2$  può essere calcolato, in prima approssimazione, considerando la struttura come la sovrapposizione di tre oscillatori indipendenti caratterizzati dalle frequenze  $f_0$ ,  $f_1$  e  $f_2$  e considerando che l'eccitazione di ingresso è dovuta ad uno spettro di accelerazioni provenienti dalle fondazioni. In tali condizioni si ha:

$$|H(f)|^2 = D1 / D2 + D3 / D4 + D5 / D6$$

dove

$$D1 = \sqrt{1 + 4 \cdot x^2 \cdot (f / f_0)^2}$$

$$D2 = \sqrt{\left[1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]^2 + 4 \cdot x^2 \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}$$

$$D3 = \sqrt{1 + 4 \cdot x^2 \cdot \left(\frac{f}{f_{v1}}\right)^2}$$

$$D4 = \sqrt{\left[1 - \left(\frac{f}{f_{v1}}\right)^2\right]^2 + 4 \cdot x^2 \cdot \left(\frac{f}{f_{v1}}\right)^2}$$

$$D5 = \sqrt{1 + 4 \cdot x^2 \cdot \left(\frac{f}{f_{v2}}\right)^2}$$

$$D6 = \sqrt{\left[1 - \left(\frac{f}{f_{v2}}\right)^2\right]^2 + 4 \cdot x^2 \cdot \left(\frac{f}{f_{v2}}\right)^2}$$

A titolo di esempio nella figura seguente sono riportati i valori di  $H(f)^2$  per il primo piano di una costruzione utilizzando i seguenti dati:

$h = 24 \text{ cm}$

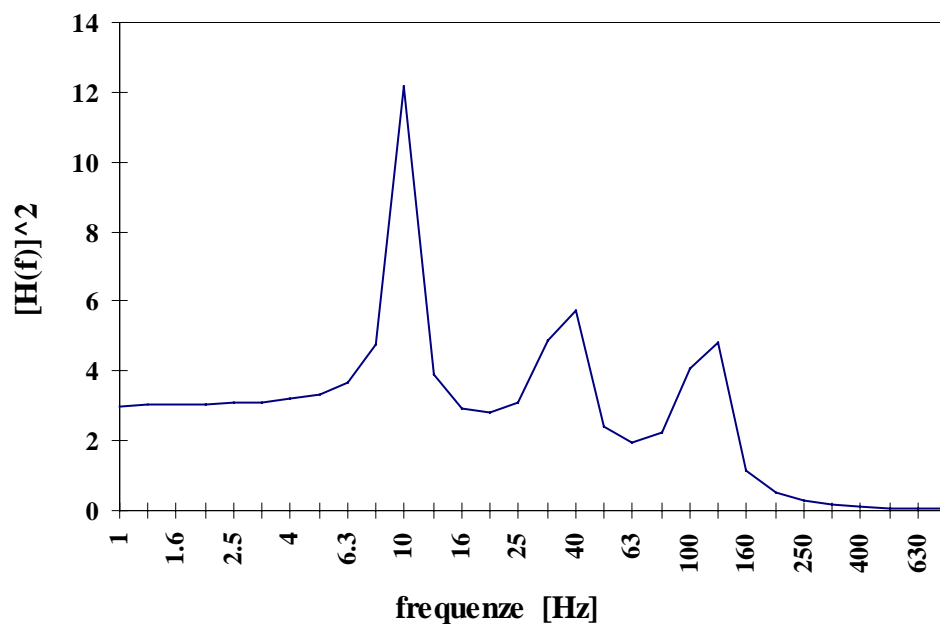
$L = 4 \text{ m}$

$E = 2 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$

$\delta = 2000 \text{ kg/m}^3$

$x = 0.05$

### Funzione di trasferimento



**Fig. 13** - Funzione di trasferimento per un edificio a due piani sono evidenti i picchi di risonanza alle frequenze di  $f_0 = 10 \text{ Hz}$ ,  $F1 = 36,6 \text{ Hz}$  ed  $F2 = 114,8 \text{ Hz}$

A titolo di esempio si riporta, nella Fig. 14, l'andamento del livello di vibrazioni lungo l'asse verticale in funzione del tempo rilevato sulla struttura di un edificio durante il transito di un tram. Il segnale si riferisce al livello di accelerazione, filtrato con banda

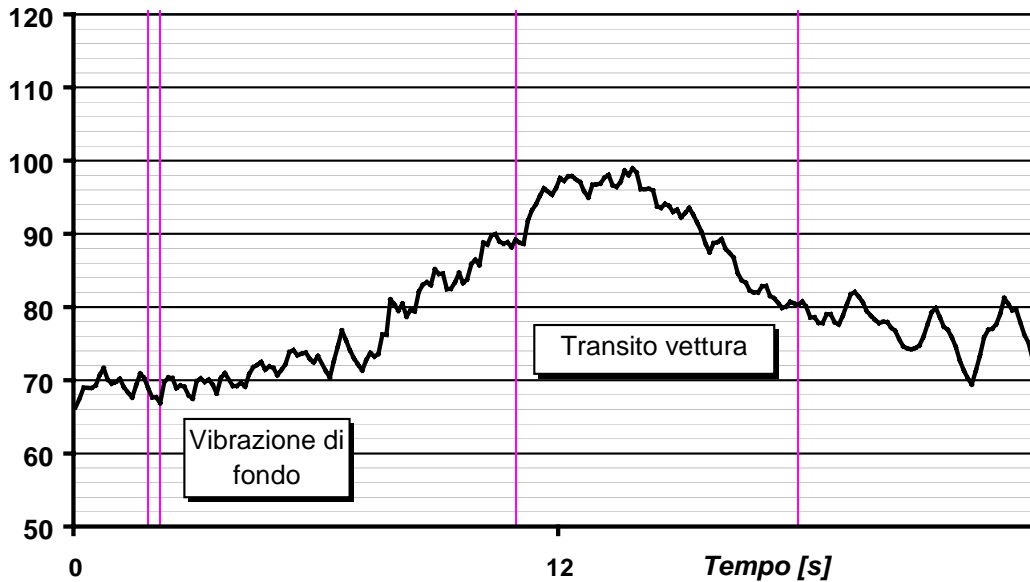
da 1 a 80 Hz, rilevato al piede dell'edificio ed al centro del solaio di una camera al primo piano.

**Tracciato storico del livello di accelerazione [dB]**

**(1-80 Hz)**

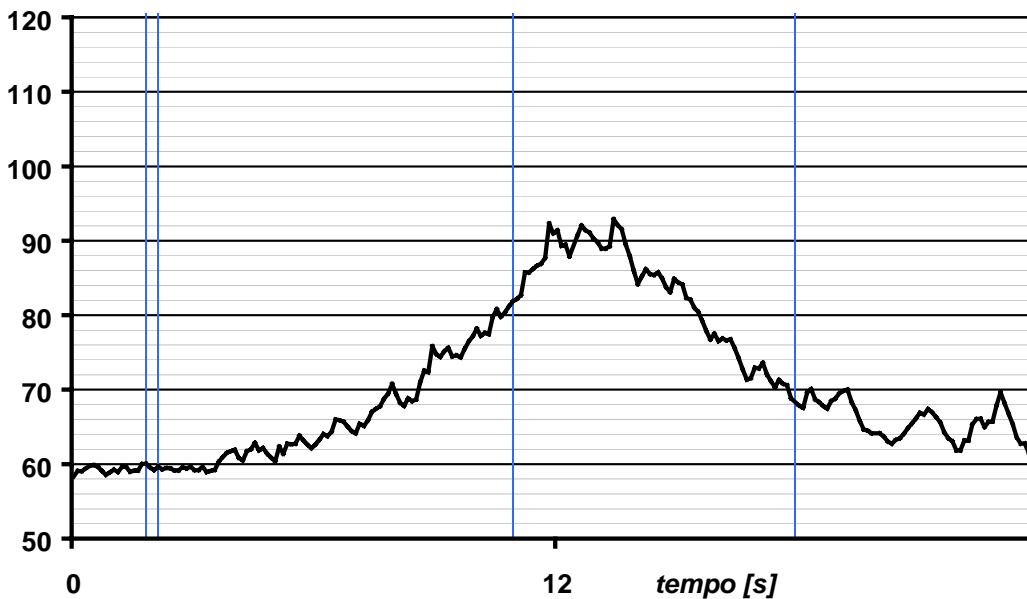
**Canale 1 Pavimento al 1° piano**

**Verticale**



**Canale 2 Alla base dell'edificio (12,10 m dal binario)**

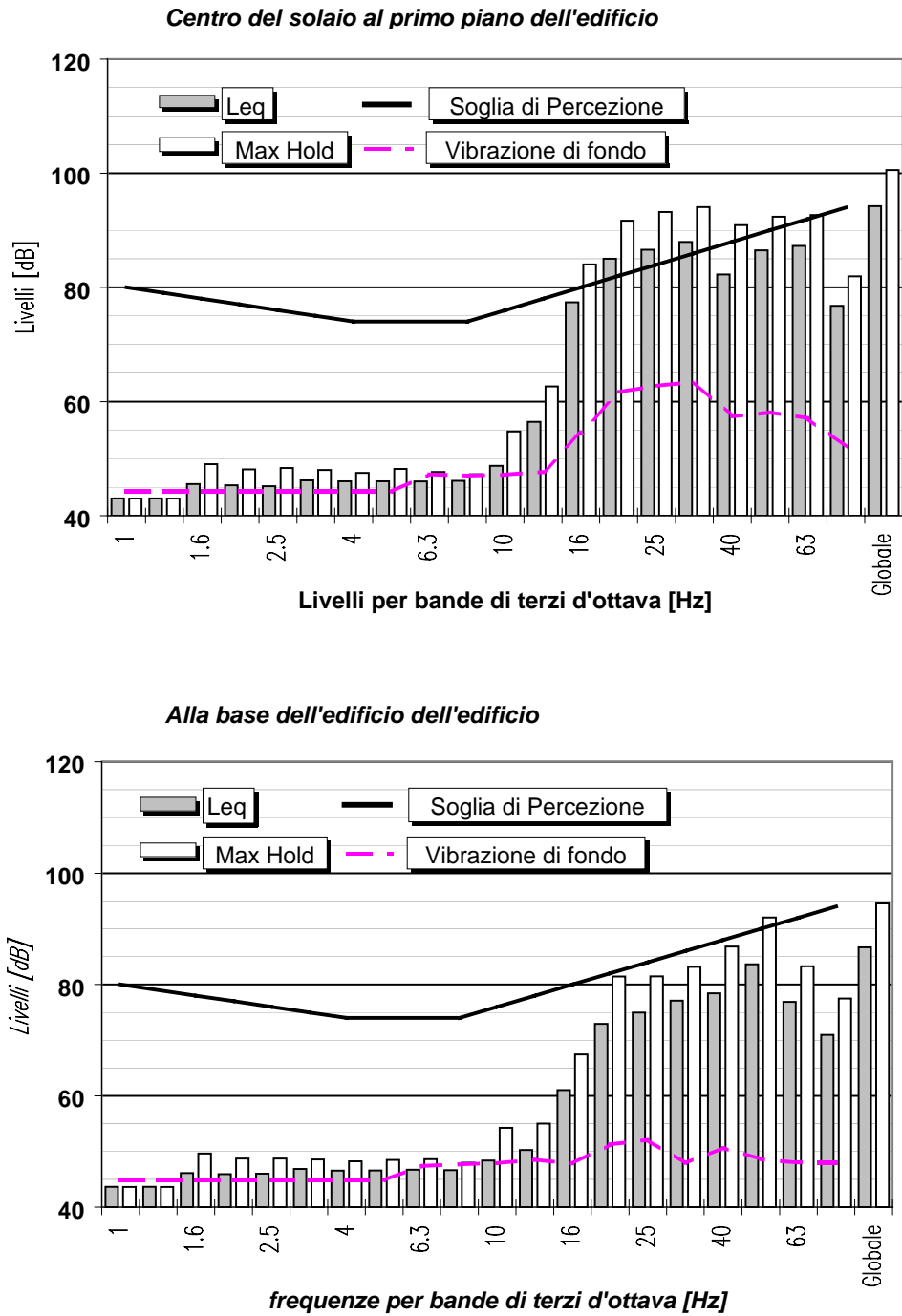
**Verticale**



**Fig.14** - Andamento del livello di accelerazione (componente verticale) durante il passaggio di un tram. Confronto tra il livello rilevato sul piede dell'edificio e quello misurato al centro di un solaio al primo piano

Lo stesso segnale relativo al segmento indicato nella figura precedente è stato oggetto, poi, di analisi in frequenza per bande di 1/3 di ottava. Nella Fig. 15 si riportano

gli spettri della eccitazione dell'edificio (al piede del fabbricato sulla parete di facciata) e della risposta del solaio.



**Fig.15** - Spettri dell'accelerazione per bande di terzi di ottava rilevati sul piede dell'edificio  $L_{w,eq} = 72.8$  dB ed al centro del pavimento al primo piano  $L_{w,eq} = 82.5$  dB durante il transito del tram.



Come è possibile rilevare dal confronto delle misure effettuate ai piedi ed al centro del solaio dell'edificio si ha una esaltazione del livello di vibrazioni al primo piano ( $L_{w,eq} = 82.5$  dB pesato secondo la UNI 9614) rispetto al livello misurato ai piedi dell'edificio sulla muratura di tamponamento ( $L_{w,eq} = 72.8$  dB). Questo è spiegabile in base al rapporto delle masse in gioco.

## 7. Trasformazione delle vibrazioni in rumore

Le vibrazioni della struttura di un edificio causano un incremento di rumore che dipende, oltre che dalle caratteristiche geometriche degli ambienti e dal coefficiente di assorbimento delle pareti, anche e soprattutto dalle caratteristiche della vibrazione entrante.

Il calcolo del rumore così generato potrebbe essere eseguito considerando il classico problema della parete vibrante. Numerose sperimentazioni hanno però messo in evidenza che il livello di pressione sonora può essere valutato utilizzando il livello di accelerazione rilevabile ovvero prevedibile sulle pareti della stanza, sul soffitto e sul pavimento. Il calcolo dovrebbe prevedere anche l'efficienza di radiazione dei divisori; in prima approssimazione questa può essere assunta pari ad uno per cui il livello di rumore  $L_p$  può essere determinato con la formula approssimata:

$$L_p = L_a - 20 \cdot \log(f) + 17.2 \text{ dB}$$

dove:

$L_a$  è il livello di accelerazione medio su tutte le pareti che delimitano la stanza

$f$  è la frequenza in esame.

Ovviamente per ottenere un livello equivalente pesato "A" occorre considerare lo spettro dell'accelerazione fino alla frequenza di 1600 Hz ed effettuare la pesatura fonometrica.

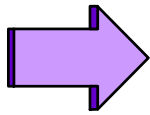
## **Bibliografia**

- *Norma internazionale ISO 2631/1* Stima dell'esposizione degli individui a vibrazioni globali del corpo - Parte 1: Specifiche generali
- *Norma internazionale ISO 2631/2* Stima dell'esposizione degli individui a vibrazioni globali del corpo -Parte 2: Vibrazioni continue ed impulsive negli edifici (da 1 a 80 Hz)
- *Norma italiana UNI 9670* Risposta degli individui alle vibrazioni - Apparecchiatura di misura
- *Norma italiana UNI 9614* Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo
- *Norma internazionale ISO 4866* (prima edizione 1990) Vibrazioni meccaniche ed impulsi - Vibrazioni degli edifici - Guida per la misura delle vibrazioni e valutazione dei loro effetti sugli edifici.
- *Norma italiana UNI 9916* (edizione 1991) Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici.
- *Nordtest Method - NT ACOU 033* - Prove di laboratorio per la determinazione dell'efficienza di radiazione sonora.
- *Transportation Noise* - Paul Nelson ed. Butterworths
- *Gianfranco Capponi* - La progettazione degli armamenti ferroviari urbani : Quarri & Construction, Gennaio 1996

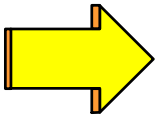
# **ORIGINE, PROPAGAZIONE E MODELLI PREVISIONALI DELLE VIBRAZIONI DEI MEZZI DI TRASPORTO**



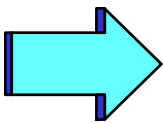
*La componente vibrazione negli studi d'impatto viene trascurata anche per:*



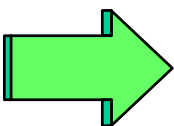
**la complessità della misurazione per definire lo stato ante operam**



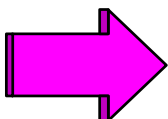
**la dipendenza dei risultati dal punto di misura**



**la scarsa conoscenza della emissione**



**la varietà dei modi di propagazione**



**la difficoltà di determinare le funzioni di trasferimento suolo - edifici**

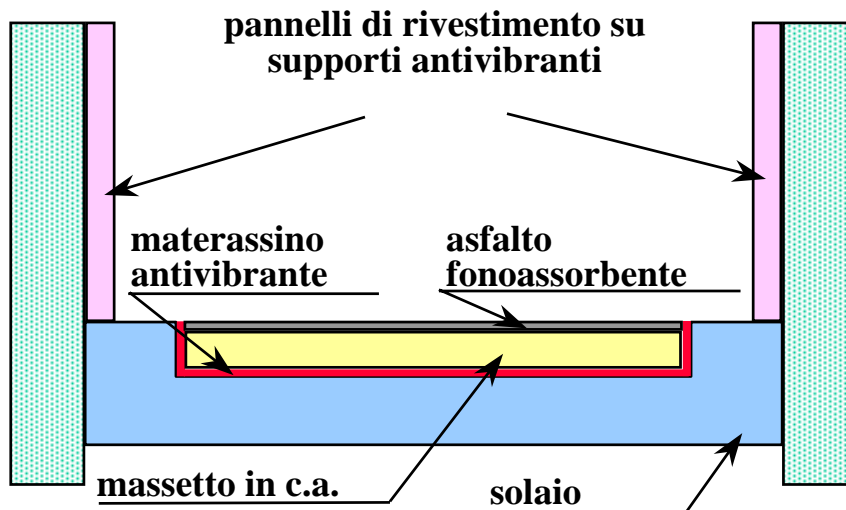


2

**la mancanza di leggi che fissino i limiti di ammissibilità**

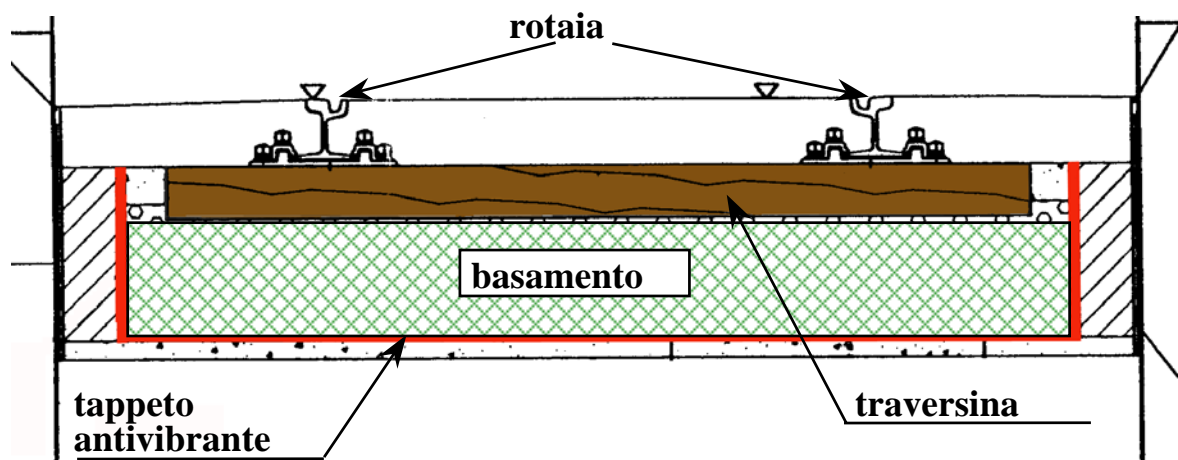
*Esempi di opere realizzate in Italia per ridurre le immissioni di vibrazioni dei mezzi di trasporto*

## LECCO - Attraversamento in sotterranea ANAS

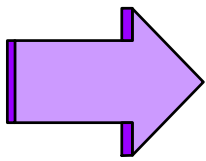


## TORINO - Sede tranviaria ATM

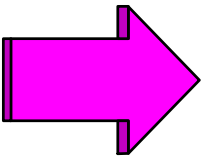
*Armamento studiato per l'attraversamento  
dei centri storici*



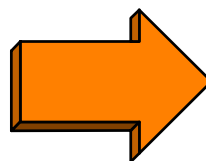
*Un completo studio della componente  
vibrazione deve tenere conto degli  
effetti:*



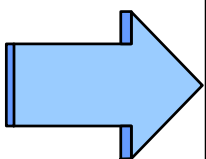
**le vibrazioni creano disturbo  
alle persone**



**le vibrazioni possono  
arrecare danni alle  
strutture**



**le vibrazioni possono  
indurre un rumore  
indesiderato**

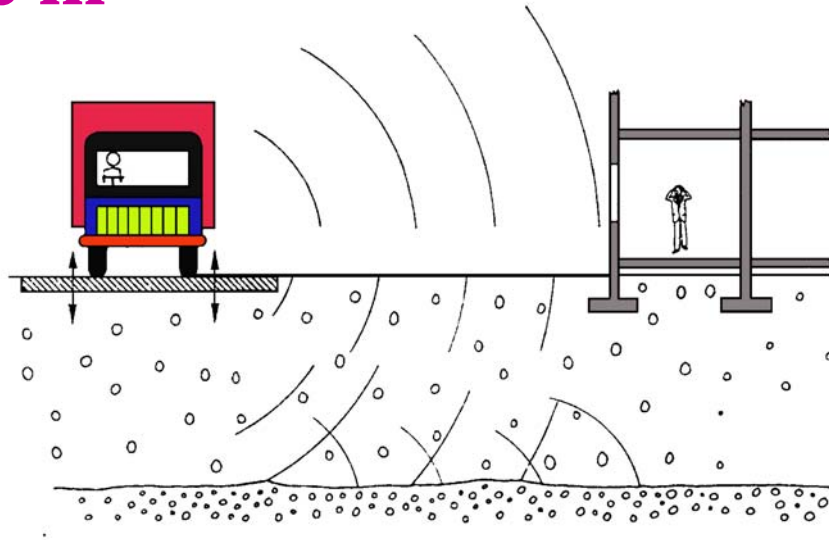


**le vibrazioni possono indurre  
rumori secondari (tintinnio dei  
vetri, suppellettili etc..)**

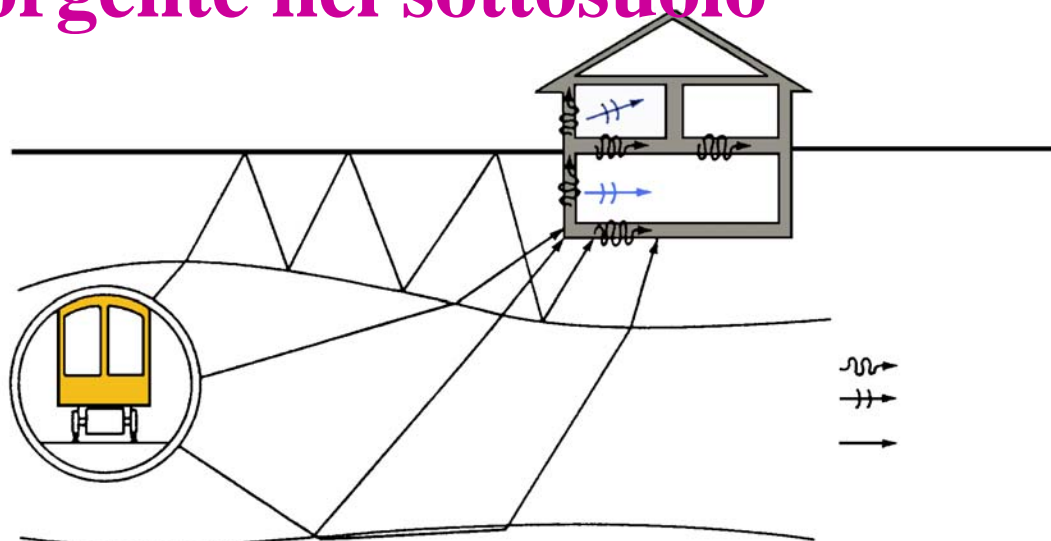
## VIBRAZIONI IMMESSE IN UN EDIFICIO

*Le vibrazioni nell'edificio sono eccitate  
dal rumore e dalle vibrazioni che si  
propagano sul terreno per:*

**a) Sorgente in  
superficie**



**b) Sorgente nel sottosuolo**





## CRITERI DI VALUTAZIONE

**ISO 2631**

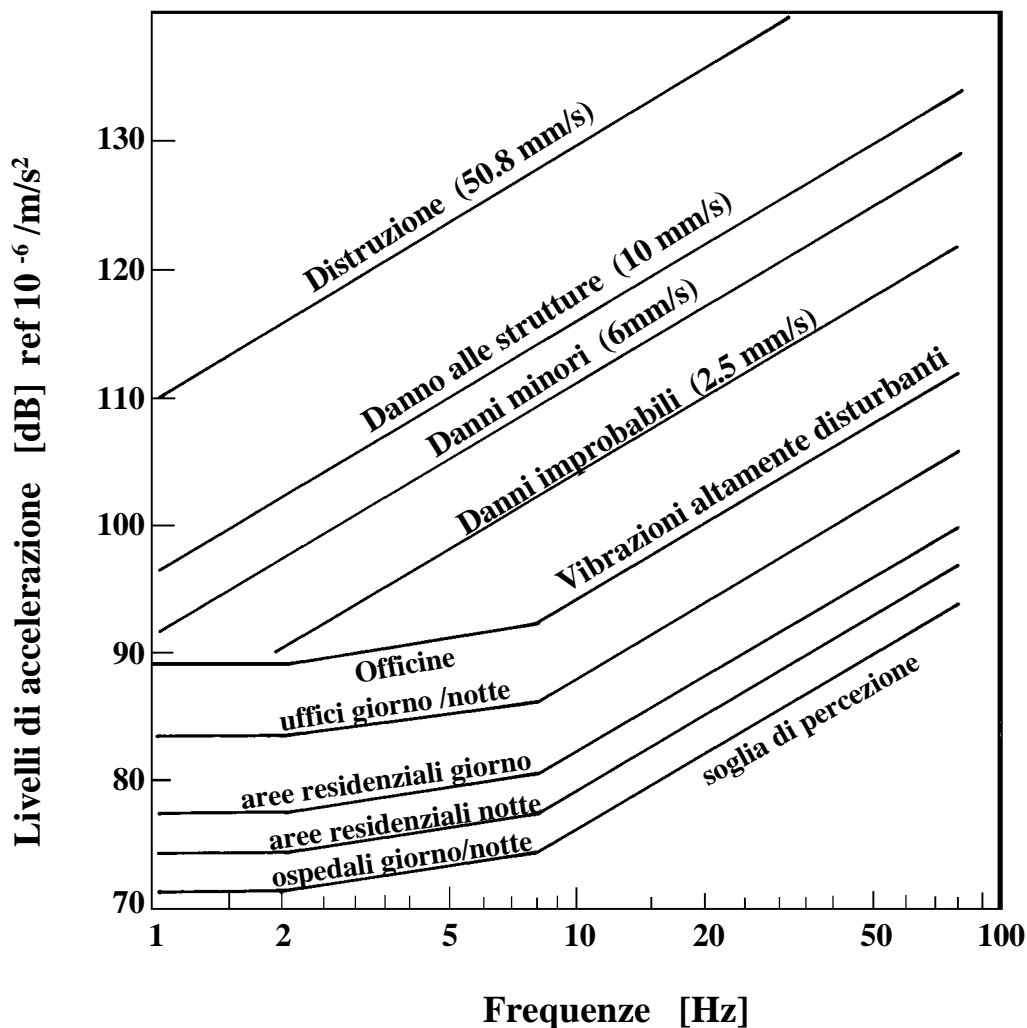
**UNI 9614**

*effetti di disturbo alle persone*

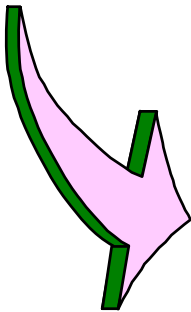
**ISO 4866**

**UNI 9916**

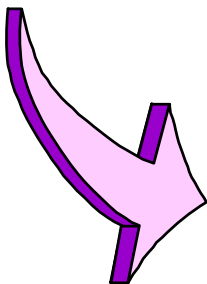
*effetti di danno agli edifici*



## 1) Descrizione dello stato attuale (ante operam)



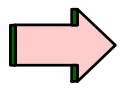
**rilievi della  
componente sul  
territorio**



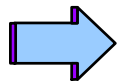
**definizione della  
qualità attuale**

### 2) Previsione della componente con l'opera in esercizio (post operam).

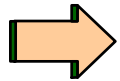
*Si esegue attraverso il calcolo o l'uso di modelli. Si richiede:*



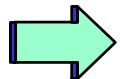
**spettro di emissione (treno, tram, camion etc...)**



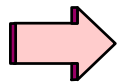
**variazione dello spettro con la velocità del mezzo**



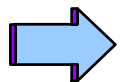
**variazione del livello con la distanza della sorgente**



**variazione del livello/spettro in funzione della tipologia delle fondazioni**

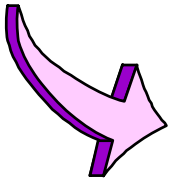


**propagazione all'interno dell'edificio**

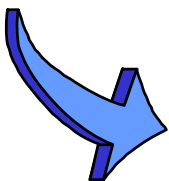


**trasformazione delle vibrazioni in rumore all'interno**

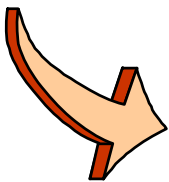
### 3) Previsione in fase di costruzione dell'opera (cantieri)



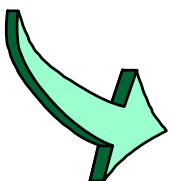
**organizzazione del  
cantiere e macchine  
utilizzate**



**spettro e livello della  
sorgente**

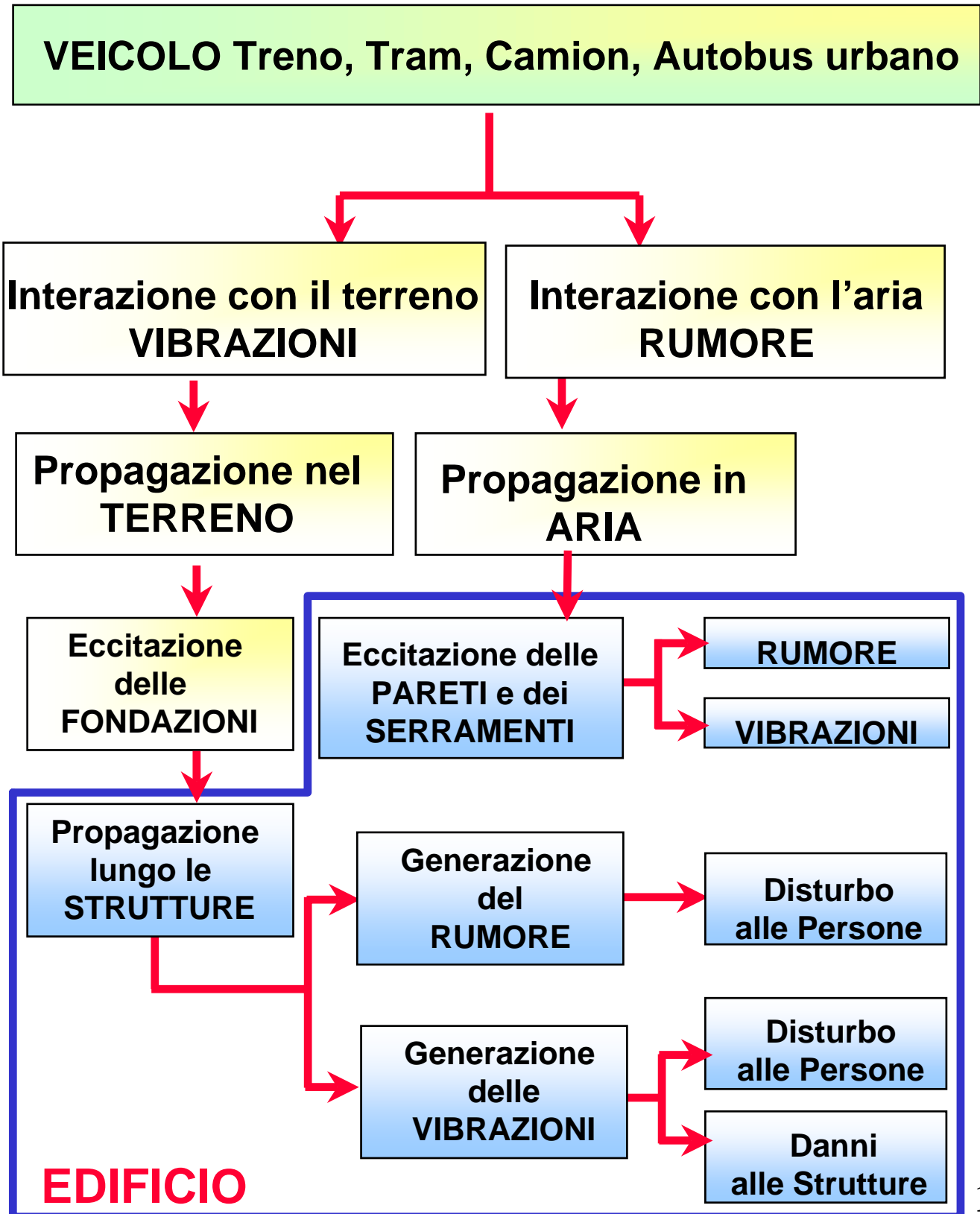


**spettro e livello emesso  
dai mezzi di trasporto  
(autocarri)**

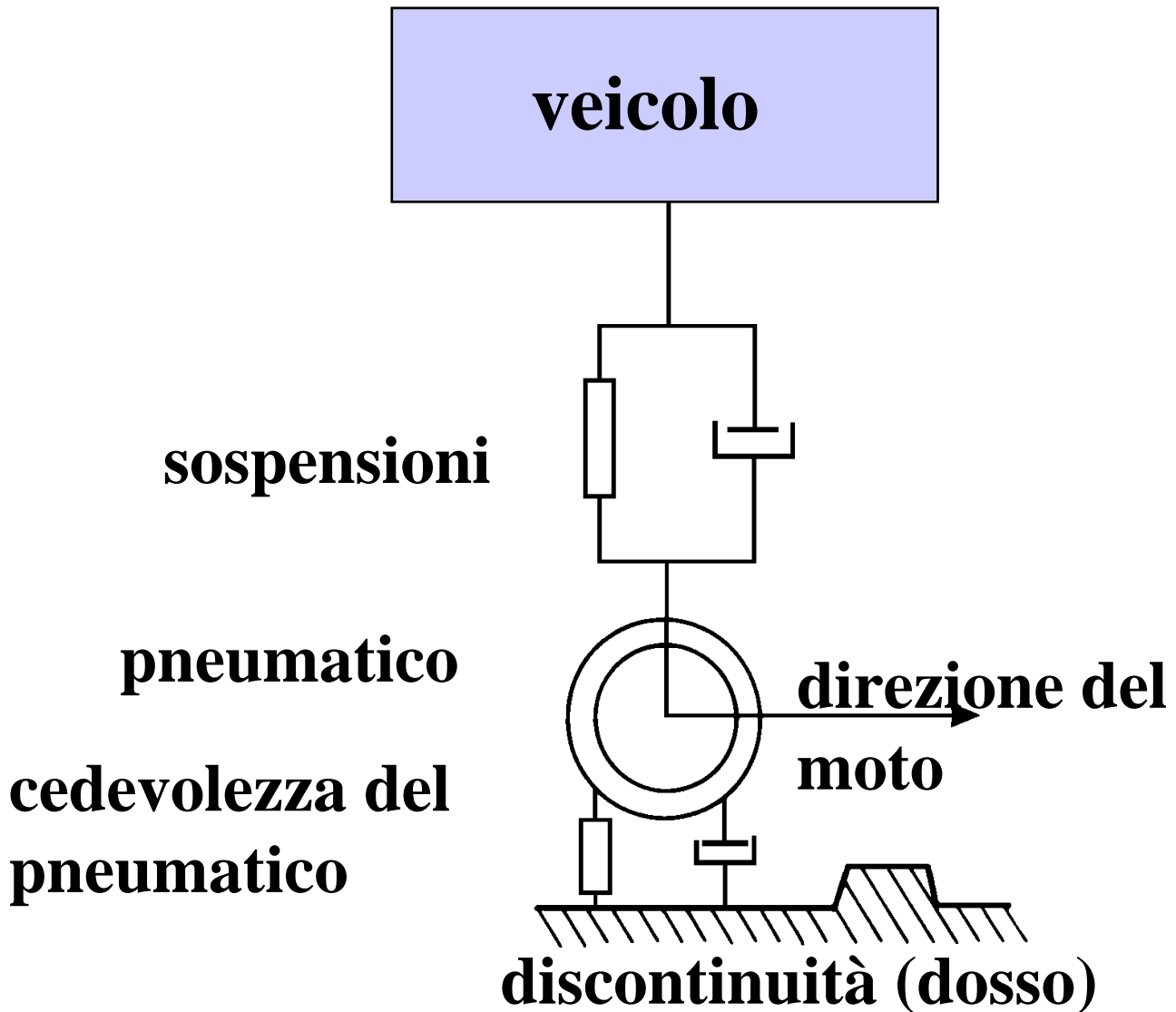


**leggi di propagazione  
verso i ricettori sensibili**

## DIAGRAMMA DI FLUSSO PER UN MODELLO DI PREVISIONE DELLE VIBRAZIONI



## *Interazione ruota strada*



### Rugosità di tipo casuale: livello a 2 m

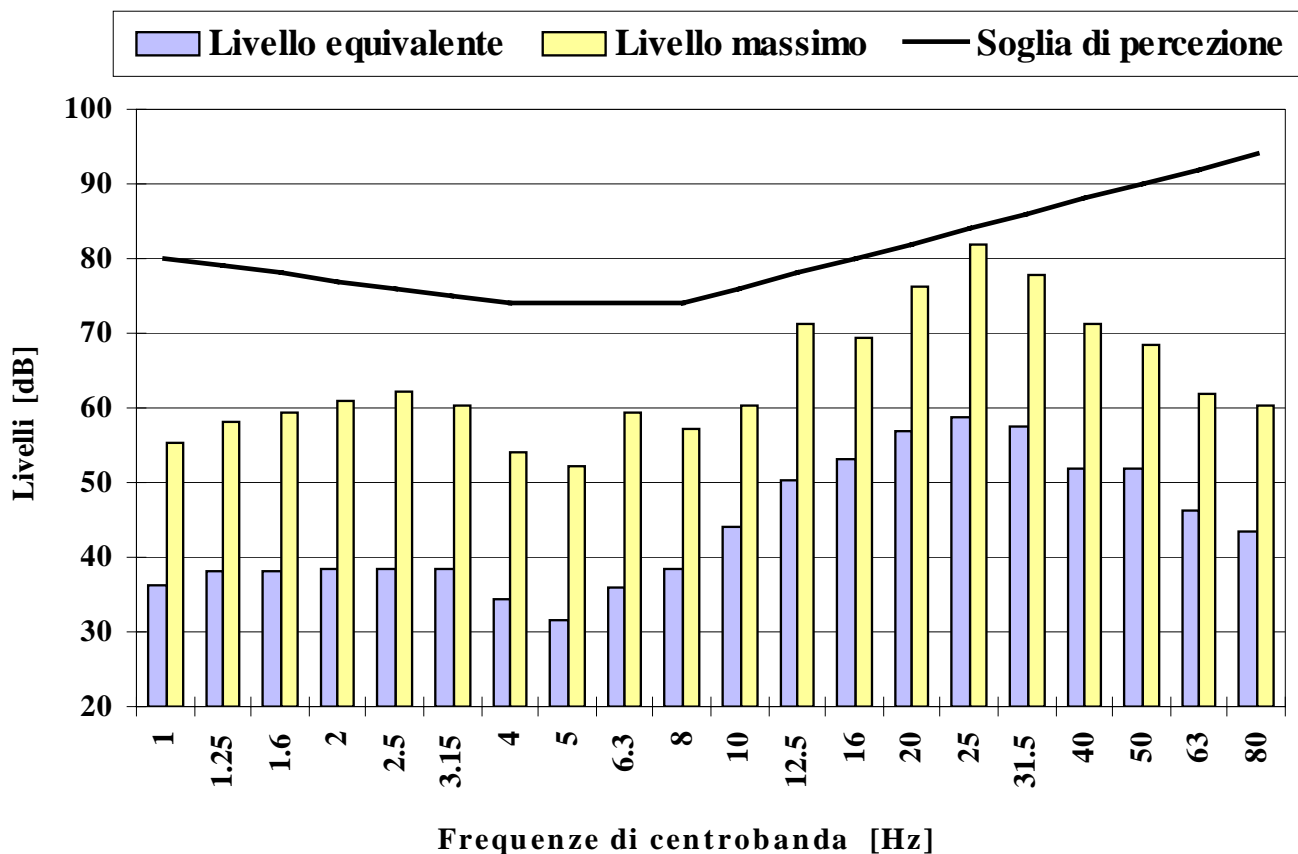
$$L_0 = - 4.155 \cdot (PSR) + 17.2 \cdot \text{Log}(V) + 10 \cdot \text{Log}(W_G) + 52 \quad \text{dB re. } 10^{-6} \text{ m/s}^2$$

usurato:  $2 < PRS < 4.5 = \text{nuovo}$

## SPETTRO DELL'ACCELERAZIONE PER TRAFFICO SU STRADA

**Spettro di accelerazione rilevato a 12 m dal ciglio strada su terreno compatto. Durata del rilievo 10 minuti con traffico di 290 auto e 13 camion**

*Accelerazioni per 1/3 di ottava*



### Livelli globali pesati UNI 9614

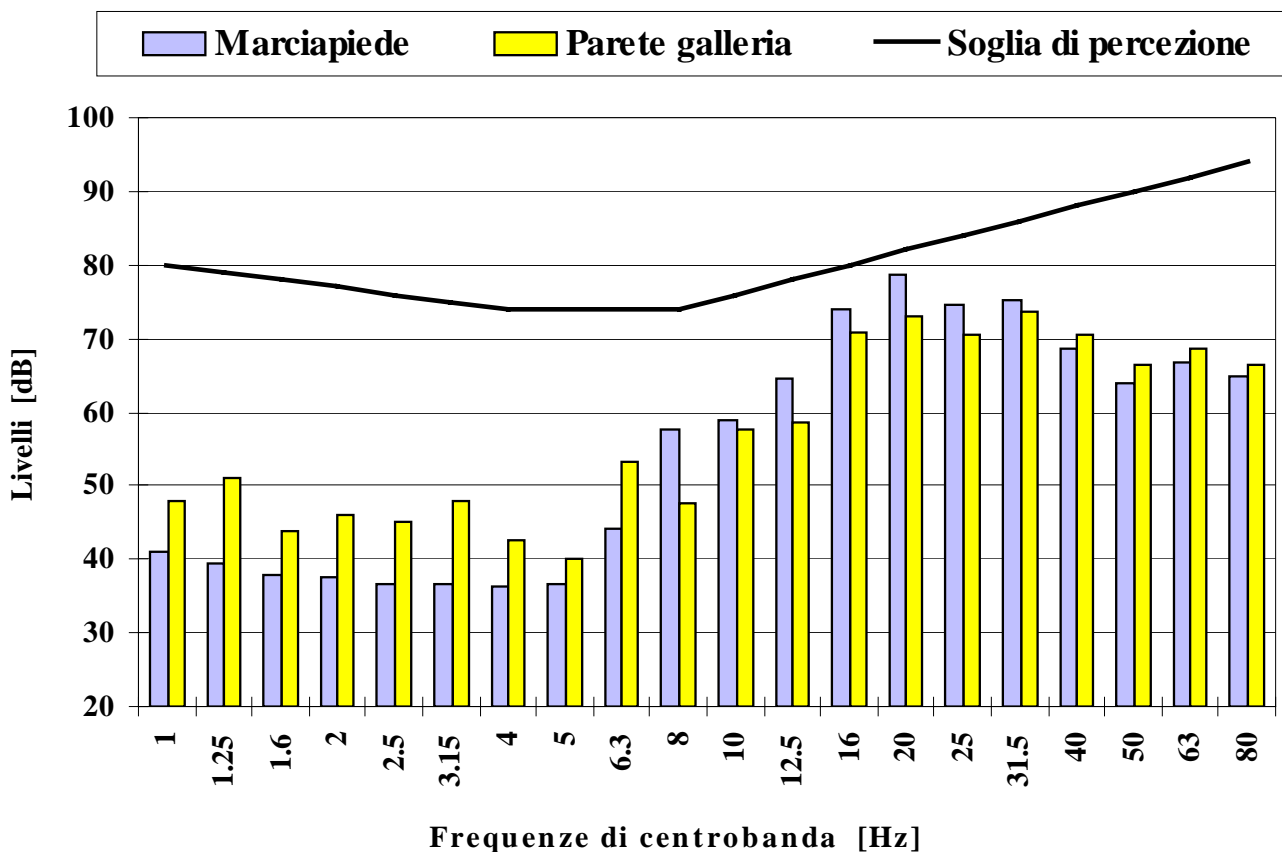
$$LW_{eq} = 55.3 \text{ dB}$$

$$LW_{max} = 76.0 \text{ dB}$$

## ORIGINE DELLE VIBRAZIONI DEI VEICOLI IN GALLERIA: PREVISIONE DEI CARICHI E DELLE RISPOSTE

### Spettro per bande di 1/3 di ottava rilevato sul marciapiede e sulle pareti di una galleria durante il transito di un camion

*Accelerazioni per 1/3 di ottava*



### Livelli globali pesati UNI 9614

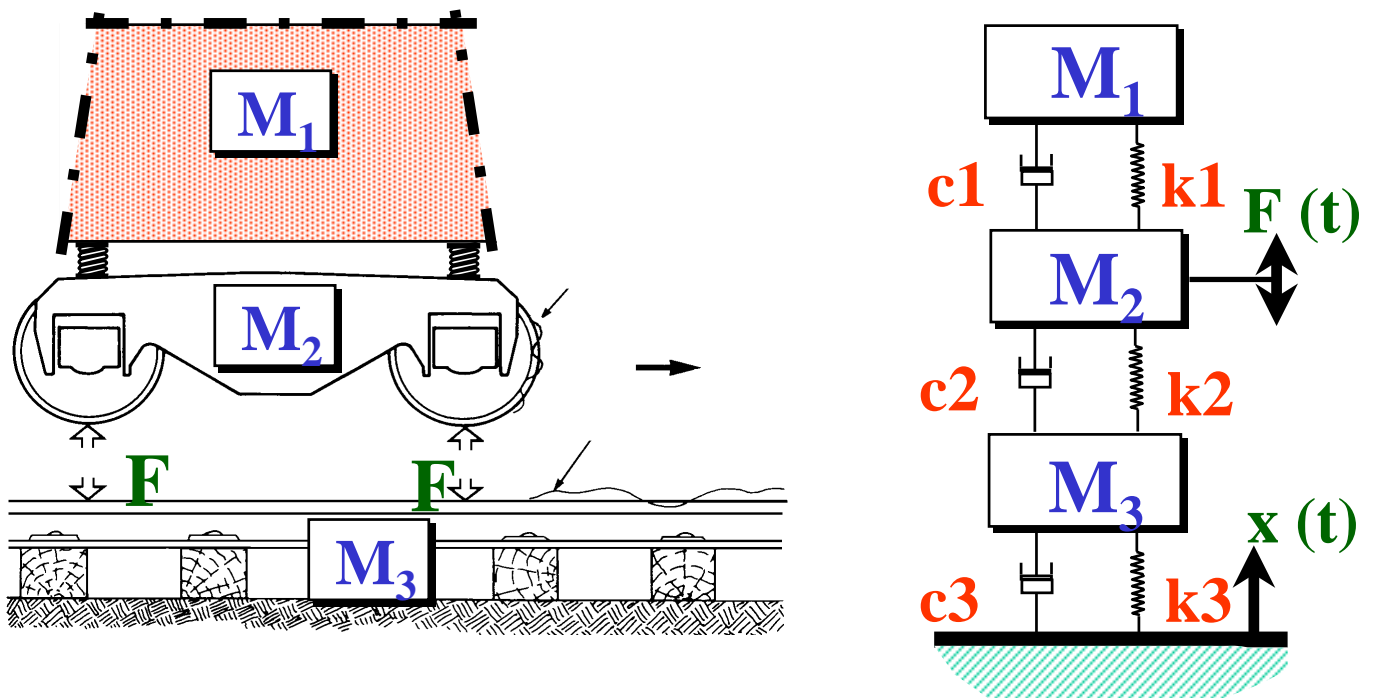
sul marciapiede  $L_{w,max} = 74.0 \text{ dB}$

sulla parete  $L_{w,max} = 70.4 \text{ dB}$



## ORIGINE DELLE VIBRAZIONI GENERATE DAI TRENI IN SUPERFICIE: PREVISIONE DEI CARICHI E DELLE RISPOSTE

### Interazione ruota - rotaia: generazione delle sollecitazioni e modello equivalente semplificato



$$[M]\ddot{\chi} + [C]\dot{\chi} + [K]\chi = 0$$

$[M]$  matrice delle masse

$[C]$  matrice degli smorzamenti

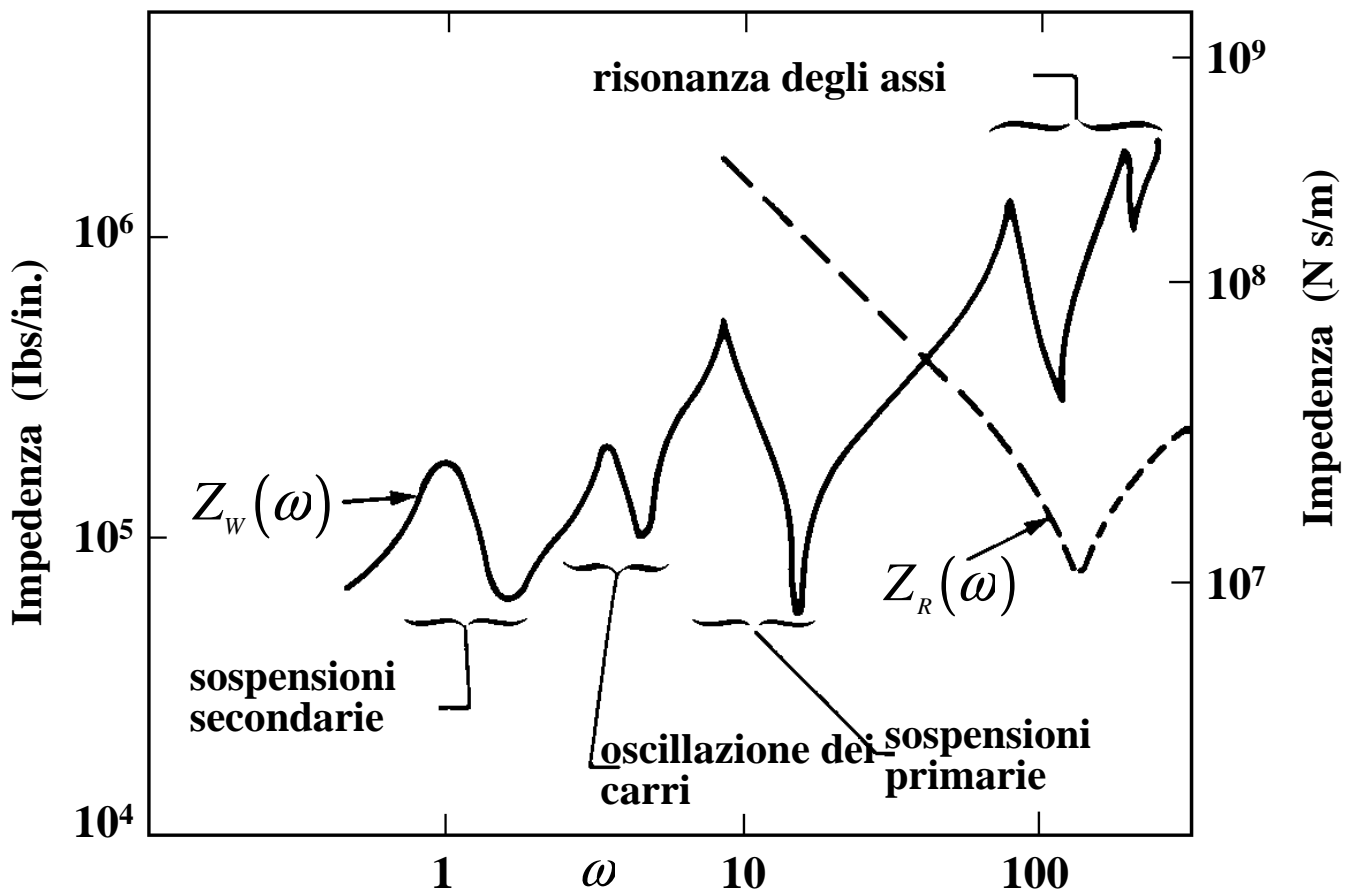
$[K]$  matrice delle rigidzze

## Impedenza meccanica del sistema

$$V_R \propto \frac{Z_W(\omega)}{Z_W(\omega) + Z_R(\omega)} \cdot \left( \text{azione combinata ruota e rugosità} \right)$$

$Z_W$  è l'impedenza delle ruote

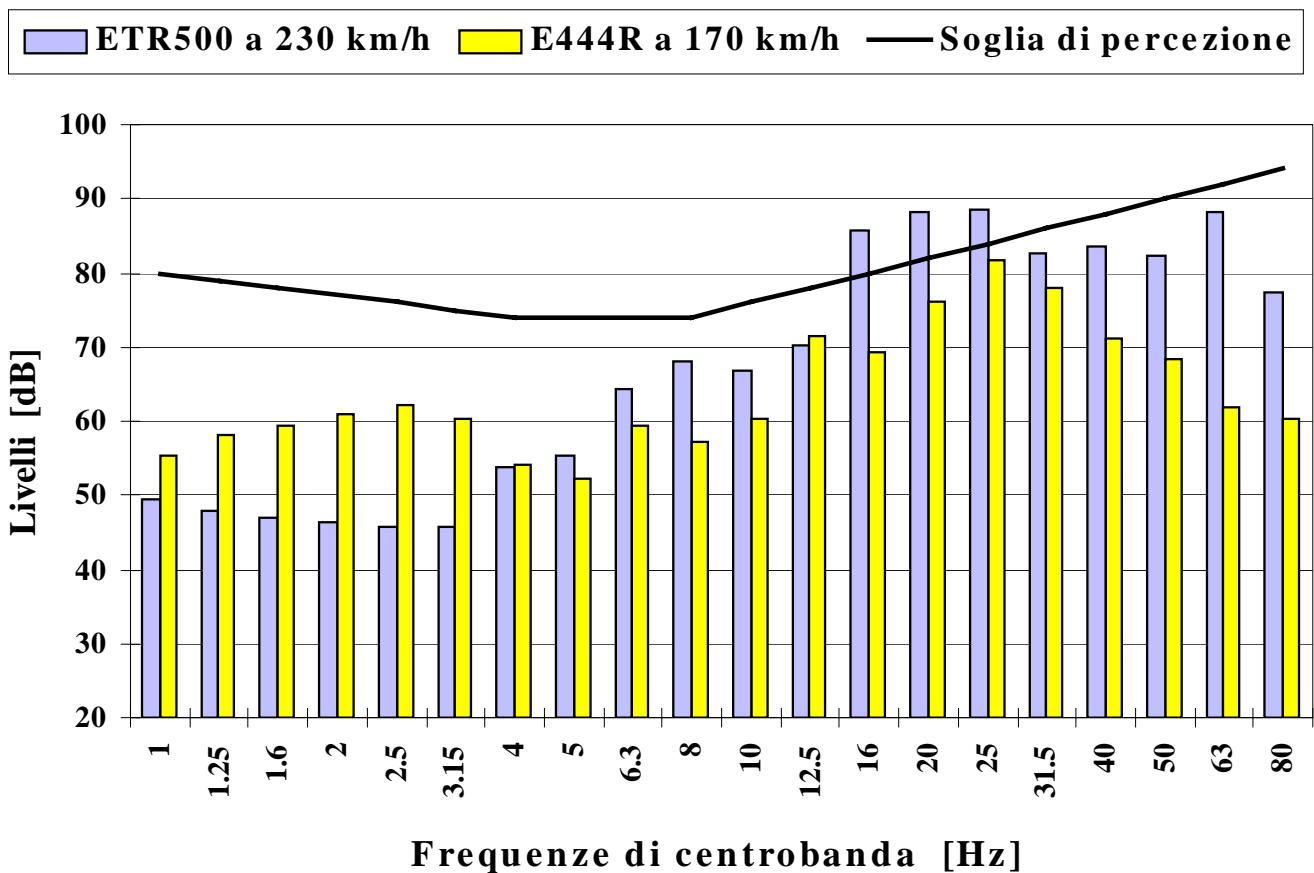
$Z_R$  è l'impedenza delle rotaie



## SPETTRI DI EMISSIONE DI TRENI

**ETR500** alla velocità di 230 km/h  
**E444R** alla velocità di 170 km/h

*Accelerazioni per 1/3 di ottava*



**Livelli globali pesati UNI 9614 a 3 m di  
distanza**

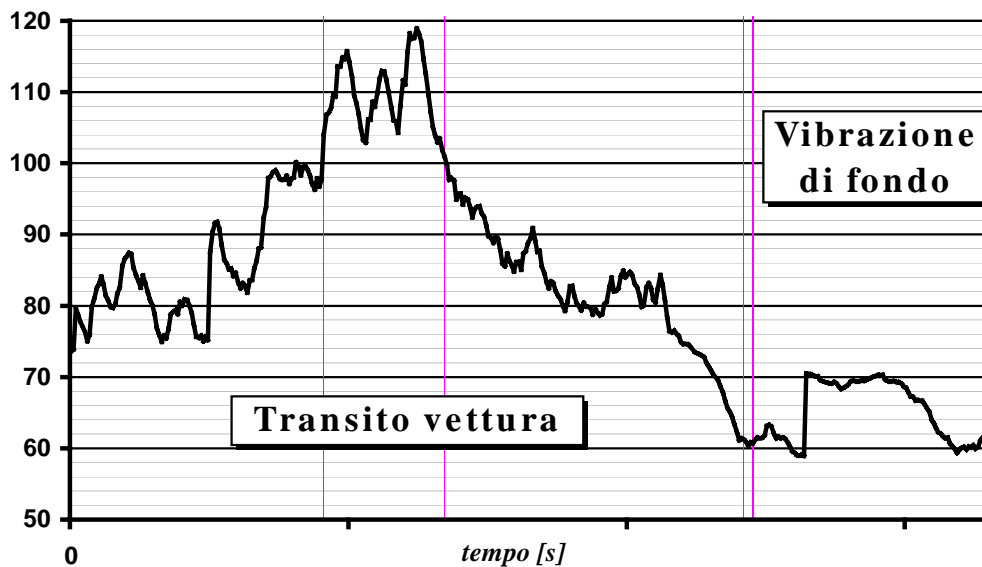
**ETR500**  $L_{w,eq} = 85.0$  dB

**E444R**  $L_{w,eq} = 76.0$  dB

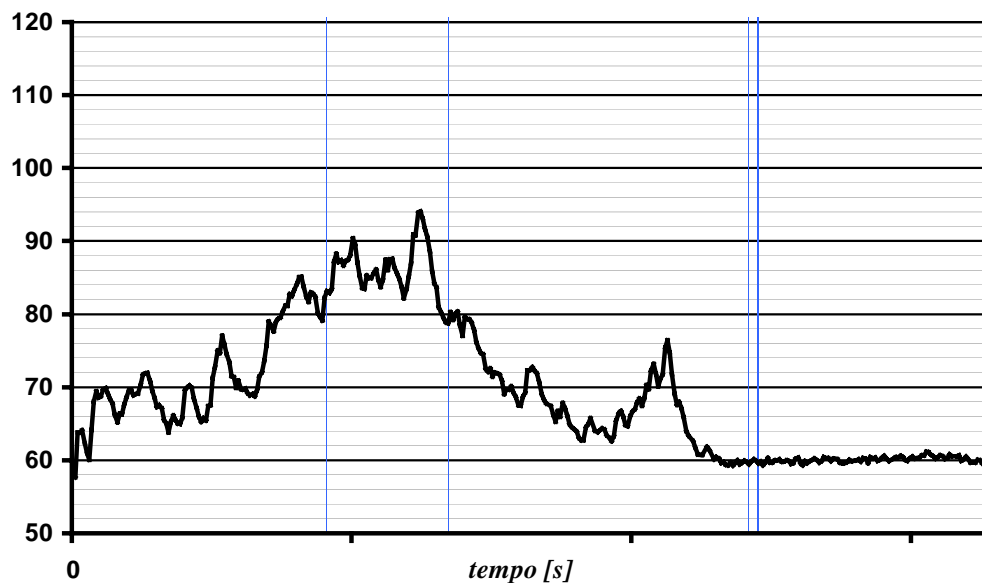
# LE VIBRAZIONI PRODOTTE DAL TRANSITO DI TRAM IN AREE URBANE

## Tracciato del livello di accelerazione (verticale) a 0.9 m ed a 9.8 m di distanza dal binario (base edificio)

Tracciato storico del livello di accelerazione [dB] (1-80 Hz)  
**Canale 1** Sul terreno a 90 cm dall'armamento

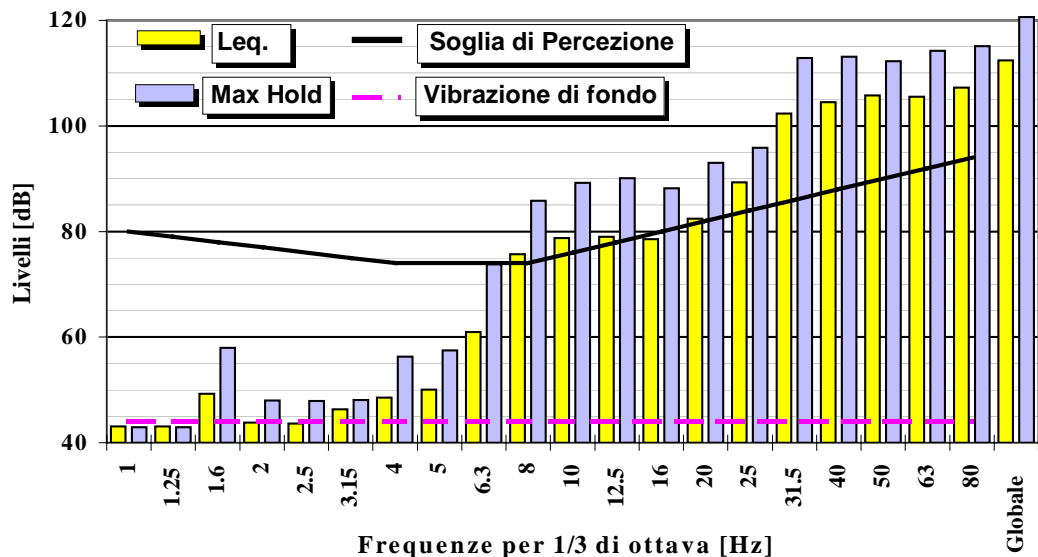


**Canale 2** Fondazione dell'edificio a 980 cm dall'armamento

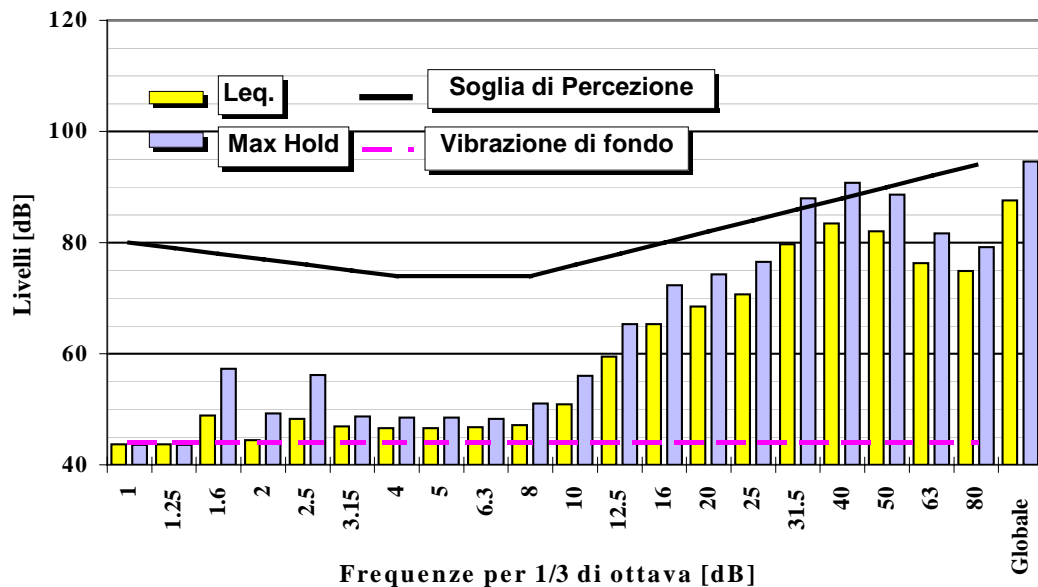


**Spettro a 0.9 m dal binario**  
**Spettro a 9.8 m dal binario (base edificio)**

A 90 cm dall'armamento



Alla base dell'edificio a 980 cm dall'armamento



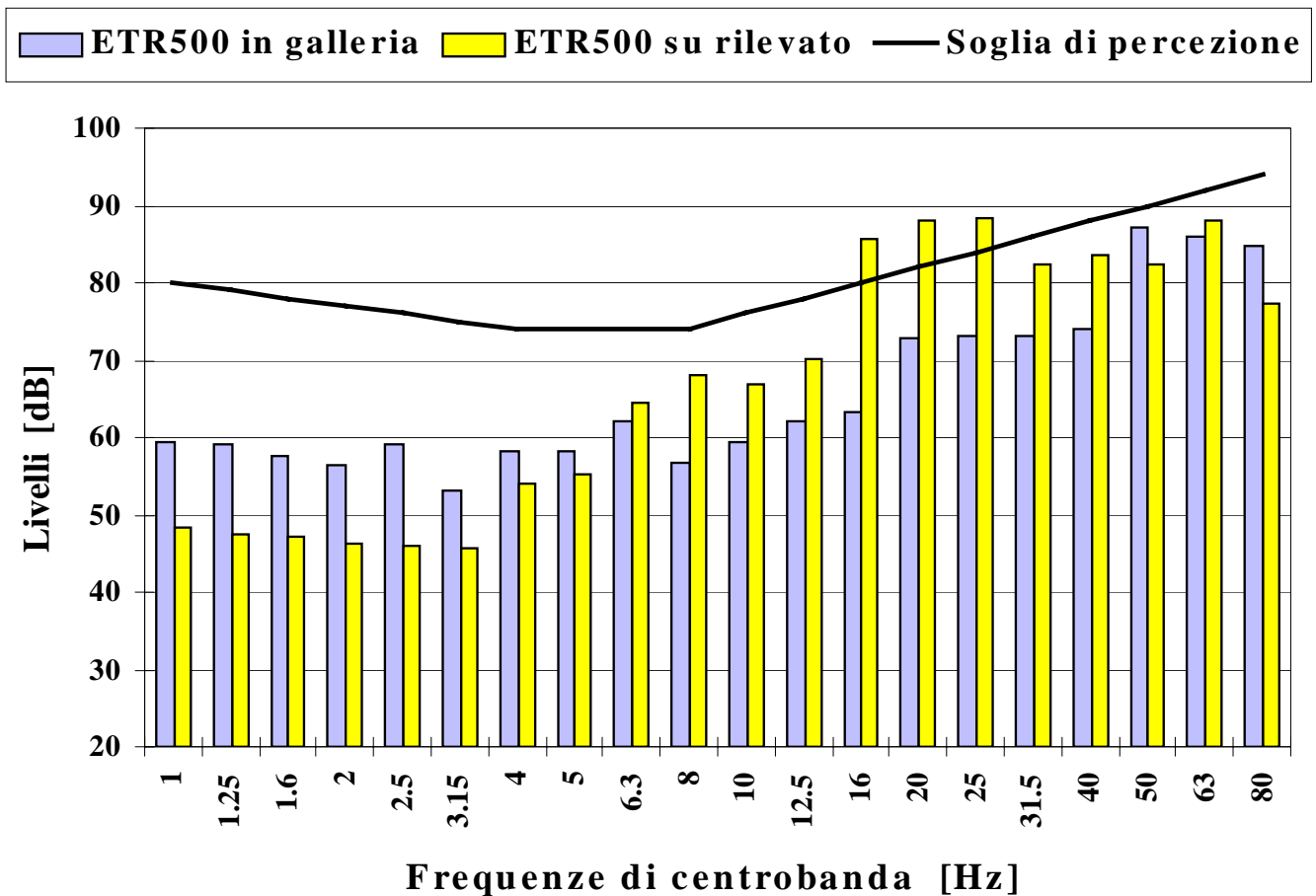
**Livelli globali pesati UNI 9614**

**$L_{w,eq} = 96.5 \text{ dB}$  a 0.9 m**

**$L_{w,eq} = 73.7 \text{ dB}$  a 9.8 m**

## Spettro della emissione di un treno ETR500 in galleria e confronto con lo spettro in rilevato

*Accelerazioni per 1/3 di ottava*



### Livelli di accelerazione pesati UNI 9614

**ETR500 in galleria  $L_{w,eq} = 75.7$  dB**

**ETR500 su rilevato  $L_{w,eq} = 85.0$  dB**

## **MODI DI PROPAGAZIONE**

**Le diverse sorgenti considerate eccitano  
diversi modi di propagazione**

### **Nel corpo solido**

- *modo Longitudinale*
- *modo Trasversale*

### **In superficie**

- *onde di Rayleigh*
- *onde di Love*

**Le onde superficiali di Rayleigh si  
attenuano molto meno in distanza delle  
onde Longitudinali e Trasversali**

**Ungar e Bender propongono il calcolo dell'attenuazione in funzione della distanza dalle pareti del tunnel utilizzando una relazione del tipo:**

$$A_T = A_s + A_d + A_i \quad \text{dB}$$

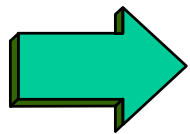
**dove:**

$A_s = 10 \cdot \text{Log} \frac{R+x}{R}$	<b>attenuazione per divergenza</b>
$A_d = 4.34 \frac{\omega \eta x}{c}$	<b>attenuazione per dissipazione interna</b>
$A_i = 20 \cdot \text{Log} \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\rho_c c_c}{\rho_a c_a} \right)$	<b>variazione delle caratteristiche del terreno</b>

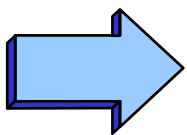


## **CALCOLO DI PREVISIONE**

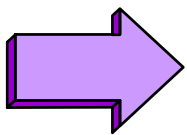
**Si deve tener conto dei seguenti fattori:**



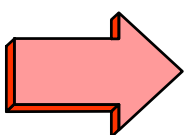
**attenuazione dovuta alla perdita di energia vibrazionale nell'accoppiamento terreno-fondazioni**



**amplificazione dovuta alla presenza di eventuali fenomeni di risonanza con le frequenze proprie della struttura dell'edificio**



**variazione del livello dovuta alla propagazione verso i piani più alti**



**trasformazione delle vibrazioni di pareti e solaio in rumore**

## **Funzione di trasferimento di un edificio**

$$|H(f)|^2 = D1 / D2 + D3 / D4 + D5 / D6$$

**dove:**

$$D1 = \sqrt{1 + 4 \cdot x^2 \cdot (f / fo)^2}$$

$$D2 = \sqrt{\left[1 - (f / fo)^2\right]^2 + 4 \cdot x^2 \cdot (f / fo)^2}$$

$$D3 = \sqrt{1 + 4 \cdot x^2 \cdot (f / fv1)^2}$$

$$D4 = \sqrt{\left[1 - (f / fv1)^2\right]^2 + 4 \cdot x^2 \cdot (f / fv1)^2}$$

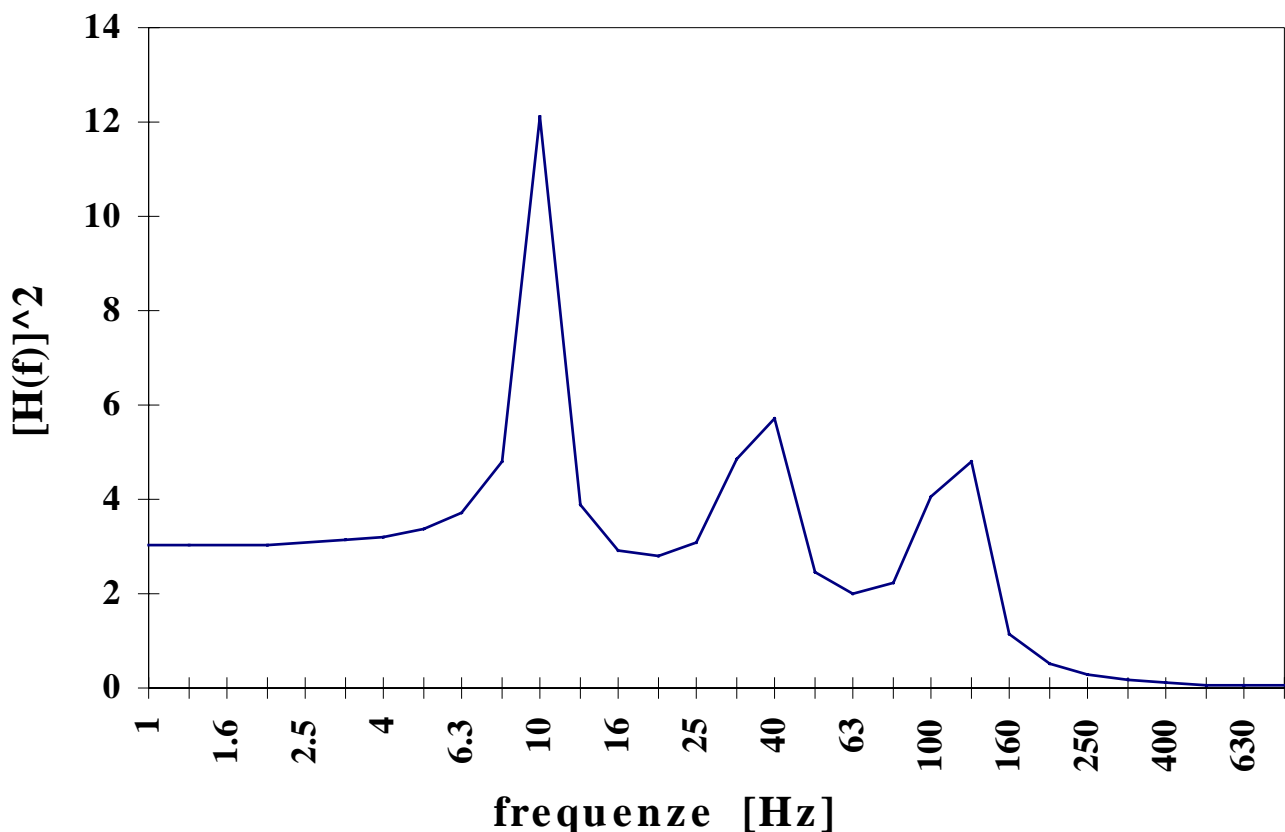
$$D5 = \sqrt{1 + 4 \cdot x^2 \cdot (f / fv2)^2}$$

$$D6 = \sqrt{\left[1 - (f / fv2)^2\right]^2 + 4 \cdot x^2 \cdot (f / fv2)^2}$$

### Edificio a 2 piani

### *Funzione di trasferimento per il primo piano di una costruzione*

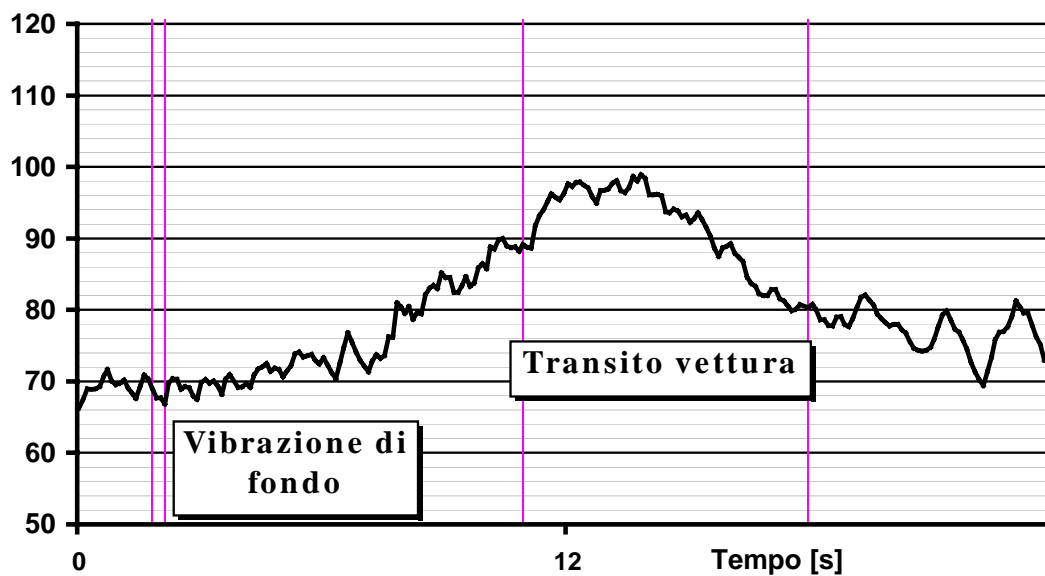
*Funzione di trasferimento*



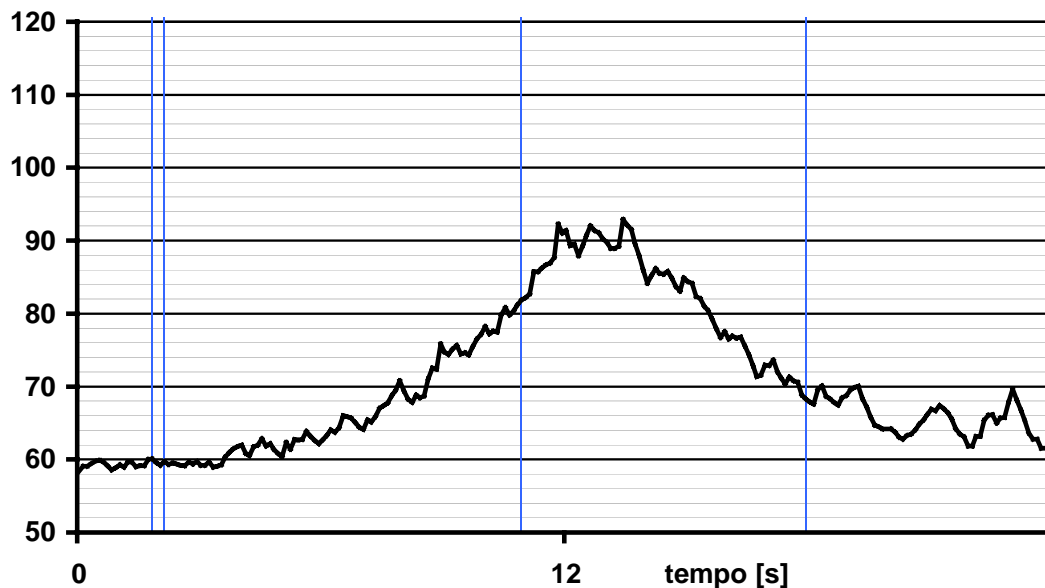
*Sono evidenti i picchi di risonanza alle frequenze di  $f_0=10$  Hz,  $f_1= 36.6$  Hz ed  $f_2= 114.8$  Hz*

# Andamento del livello di accelerazione (componente verticale): confronto tra il livello rilevato alla base dell'edificio e quello al centro del solaio al 1° piano

**Canale 1** Pavimento al 1° piano

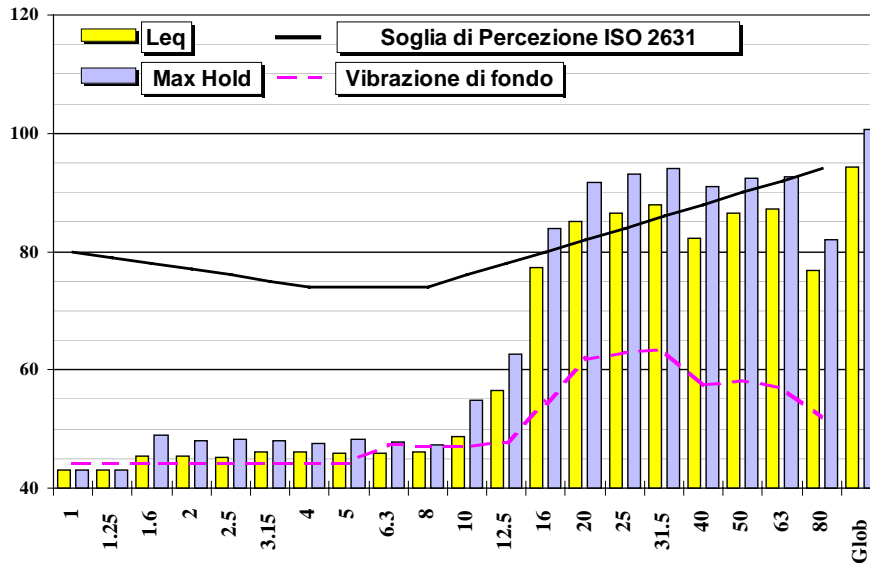


**Canale 2** Alla base dell'edificio (12,10 m dal binario)

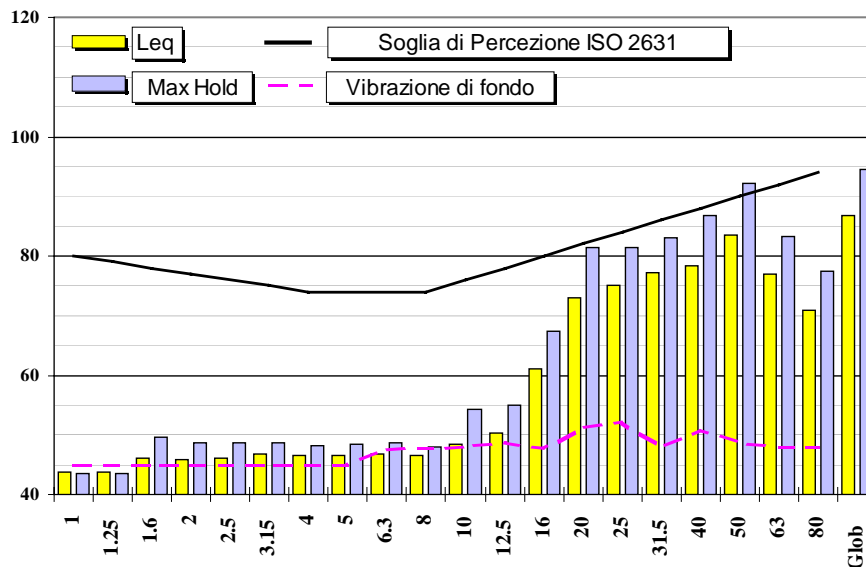


# Spettri dell'accelerazione: confronto tra il livello rilevato alla base dell'edificio e quello al centro del solaio al 1° piano

### CENTRO SOLAIO AL 1° PIANO



### BASE DELL'EDIFICIO



### Livelli globali pesati UNI 9614

$L_{w,eq} = 72.8 \text{ dB}$  alla base dell'edificio

$L_{w,eq} = 82.5 \text{ dB}$  al centro del solaio 1° piano