

## Caratterizzazione delle vibrazioni indotte presso recettori residenziali durante una manifestazione musicale di massa

Mario Gregorio Piuri\*, Michele Gravelloni, Stefano Ferrari, Davide Pavesi,  
Maria Rosaria Barone, Stefano Zerbo, Maria Teresa Cazzaniga e Giuseppe Sgorbati  
ARPA Lombardia, Dipartimento Provinciale di Milano, via Juvara 22, 20129 Milano,  
\*m.piuri@arpalombardia.it

### RIASSUNTO

*I concerti musicali effettuati durante la stagione estiva in ambienti aperti, che vedono la partecipazione di parecchie migliaia di persone, sono fonte di possibile disturbo acustico per i cittadini residenti.*

*Nel corso degli ultimi anni è stato evidenziato anche un problema connesso a vibrazioni indotte sulle strutture degli edifici più prossimi ad una delle aree utilizzate per queste manifestazioni.*

*Durante uno dei concerti di maggior richiamo dell'estate 2008, sono stati effettuati rilievi accelerometrici presso uno stabile che dista circa 150 metri dalla struttura ospitante l'evento, seguendo le norme di buona tecnica.*

*Dall'esame associato delle misure accelerometriche e delle misurazioni fonometriche, svolte contemporaneamente, si è verificato come non sussista nessuna chiara e specifica correlazione tra i fenomeni vibratorii di maggiore rilevanza e le intensità acustiche prodotte durante il concerto.*

*La possibile causa degli eventi vibratorii più importanti è risultata essere il comportamento degli spettatori, con una differenziazione dei modi vibrazionali indotti in funzione di differenti comportamenti del pubblico. Inoltre, le vibrazioni indotte sono ben definibili in termini di frequenze di oscillazione dominanti.*

### PRINCIPI TEORICI E RIFERIMENTI NORMATIVI

La caratterizzazione dei fenomeni vibratorii si effettua in termini della grandezza fisica "accelerazione ponderata  $a_w$ ", valutata per ciascuno dei tre assi ortogonali nello spazio e per ciascuna delle bande di frequenza di interesse, tipicamente nell'intervallo 1-80 Hz (UNI, 1990). Dopo l'acquisizione dei segnali, viene eseguita la ponderazione "per asse generico", prevista nel caso in cui la postura dei residenti è variabile (UNI, 2003). Infine, si calcola il valore efficace con costante di tempo "slow" (tempo d'integrazione: 1s).

Analogamente a quanto avviene nel campo dell'acustica, si può rappresentare il segnale tramite la scala logaritmica, definendo il "livello di accelerazione ponderata", espresso in decibel, secondo la relazione:

$$L_{a_w} = 10 \cdot \log \left[ \frac{a_w^2}{a_0^2} \right], \text{ nella quale si assume il valore di riferimento dell'accelerazione } a_0, \text{ pari a } 10^{-6} \text{ m/s}^2.$$

E' evidente, nel formalismo matematico utilizzato, il parallelismo con le grandezze acustiche. Tuttavia, non bisogna confondere i valori numerici assunti dai livelli di accelerazione con i valori tipici dei livelli acustici. Infatti, per le vibrazioni la soglia umana di percezione si colloca a 71 dB di accelerazione ponderata (UNI, 1990), ovvero quello che in acustica è lo "zero dB" della scala dei livelli sonori (Farina, 2006). Ciononostante, si può osservare che basta aumentare questa soglia di soli 3 dB per raggiungere il limite di tolleranza suggerito per il periodo notturno dalla norma UNI 9614 (cfr. 74 dB).

A differenza di quanto avviene per l'ambiente di lavoro, la problematica delle vibrazioni negli ambienti di vita non è disciplinata da alcuna legge nazionale. Pertanto, occorre attingere alla più recente normativa tecnica di settore per effettuare valutazioni quantitative su vibrazioni indotte presso recettori residenziali. A questo riguardo, è importante sottolineare che i risultati riportati nel seguito non sono applicabili in altri campi quale, ad esempio, la valutazione delle vibrazioni relativamente agli effetti strutturali indotti sugli edifici.

I fenomeni vibratorii possono essere distinti in tre categorie secondo la loro durata, sulla base dei fenomeni tipici in ambiente industriale: vibrazioni di livello costante, di livello non costante ed impulsive (UNI, 1990). Le vibrazioni sono costanti quando la variazione di livello dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza non supera nel tempo il *range* di 5 dB, altrimenti si parla di fenomeni vibratorii non costanti.

Si ritiene che i tipici fenomeni vibratorii rilevabili durante un concerto musicale siano ragionevolmente classificabili come fenomeni non costanti. Per valutare il disturbo arrecato alle persone da tali vibrazioni, è possibile confrontare i livelli di riferimento già previsti per le vibrazioni di livello costante con i valori del livello equivalente di accelerazione ponderata in frequenza  $L_{w,eq}$  valutato per un intervallo temporale rappresentativo (UNI, 1990). I valori di riferimento per esposizione in edifici residenziali, intesi come livello "max slow" del parametro accelerazione ponderata "per asse generico", sono pari a 77 dB in periodo di riferimento diurno (07-22) e 74 dB in periodo di riferimento notturno (22-07).

### MODALITA' DI MISURA

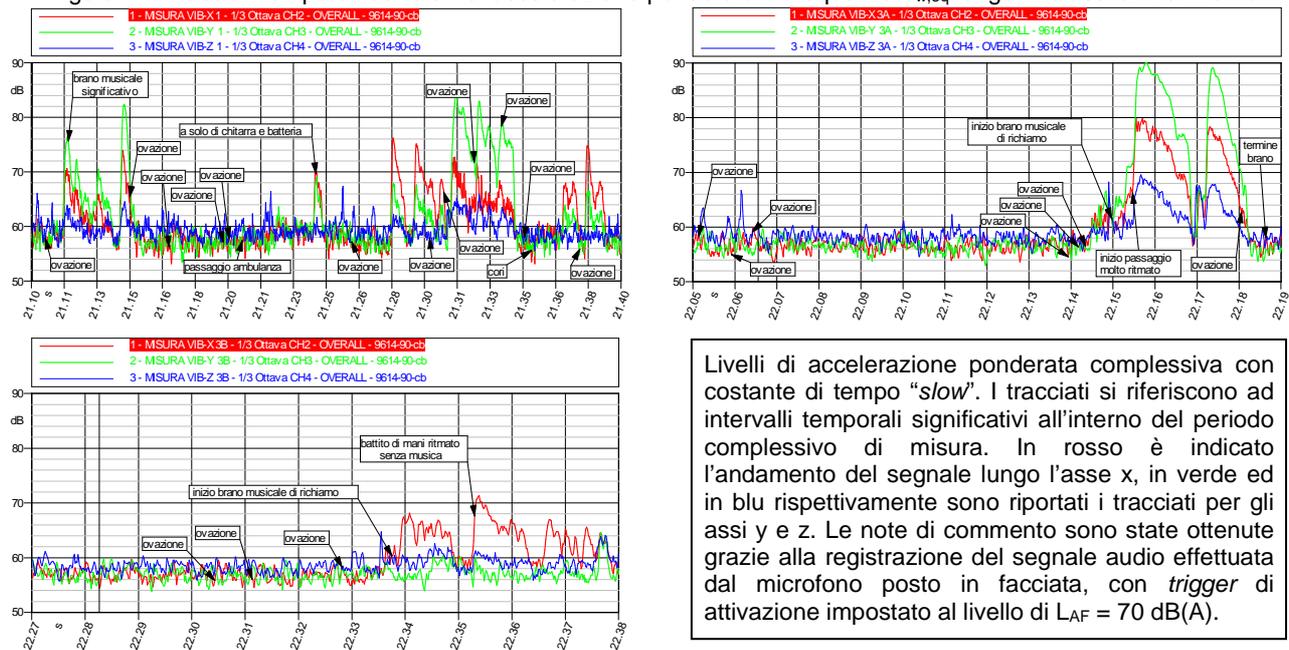
Come sito di misura è stato scelto un appartamento situato al 5° piano di uno stabile che si affaccia su un viale con traffico molto intenso, distante circa 150 metri da un impianto sportivo, all'interno del quale è stata allestita la manifestazione musicale oggetto di studio. Contemporaneamente, sono state registrate misure fonometriche sul ballatoio condominiale in facciata dell'appartamento già citato.

La catena di misura delle vibrazioni, soddisfacente le specifiche richieste dalle norme IEC 184, IEC 222, IEC 225, è costituita da un'unità di acquisizione dati multicanale e da un trasduttore accelerometrico triassiale. Il trasduttore è stato posizionato al centro della stanza sede di misure, avvitato alla relativa base d'appoggio, resa a sua volta solidale con il pavimento stesso tramite cera d'api.

Come riferimento convenzionale, si è scelto di orientare l'asse x parallelamente alla facciata dell'edificio, l'asse y in direzione dell'impianto sportivo e l'asse z in direzione verticale. Durante i rilievi registrati si è provveduto ad evitare la produzione di altre vibrazioni estranee al fenomeno indagato (es. camminamento).

La registrazione dei livelli vibrazionali è stata condotta senza soluzione di continuità per tutta la durata della manifestazione musicale, parallelamente al monitoraggio acustico. In fase di elaborazione dei dati sono stati poi isolati i periodi di registrazione più significativi.

Figura 1 – Tracciati temporali dei livelli di accelerazione ponderata in frequenza  $L_{w,eq}$  lungo i tre assi di riferimento



## PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

Gli estratti dei profili temporali dei livelli di accelerazione ponderata complessiva riportati in fig. 1 consentono una prima analisi qualitativa dei fenomeni osservati. I fenomeni vibratorii degni di rilievo si sono osservati lungo gli assi x ed y, mentre lungo z i livelli di accelerazione ponderata si sono mantenuti costantemente al di sotto della soglia di percezione umana, che per l'asse z è pari a  $5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$  (74 dB).

La maggior parte del tempo di osservazione è stato caratterizzato da quello che impropriamente può essere definito "rumore di fondo". Da questo "fondo vibrazionale" emergono gli eventi vibrazionali significativi, ovvero quelli che raggiungono almeno il livello di 71 dB, pari alla soglia di percezione umana lungo gli assi x e y, e che hanno avuto un riscontro sensibile da parte delle persone presenti alle misurazioni.

L'esame visivo dei tracciati temporali evidenzia due diverse modalità vibratorie. Trascurando la traccia relativa all'asse z per i motivi sopra esposti, si osserva che in alcuni eventi vibratorii l'accelerazione ponderata assume valori maggiori lungo l'asse x (parallelo alla facciata del recettore), mentre in altri casi, il valore maggiore è assunto dall'accelerazione lungo l'asse y (perpendicolare alla facciata del recettore ed in direzione della sorgente). Per semplicità di esposizione, indicheremo la prima modalità di vibrazione osservata come "modalità x" e la seconda come "modalità y".

## IL LIVELLO EQUIVALENTE DI ACCELERAZIONE

Le vibrazioni di livello non costante possono essere misurate registrando, in un intervallo di tempo rappresentativo, il livello equivalente di accelerazione  $L_{w,eq}^1$  e confrontando tale livello con i valori di

<sup>1</sup> la definizione matematica di  $L_{w,eq}$  ricalca quella del più noto livello acustico equivalente  $L_{eq}$ , ovvero consiste in una integrazione nel tempo del valore ponderato di accelerazione, espressa in termini di livello logaritmico:

$$L_{w,eq} = 10 \log \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \frac{a_w(t)^2}{a_0^2} dt \right], \text{ dove } a_w(t) \text{ è l'accelerazione complessiva ponderata in frequenza espressa in } \text{m/s}^2,$$

T è la durata del rilievo espressa in secondi e  $a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$  è l'accelerazione di riferimento.

riferimento proposti, coincidenti con quelli relativi alle vibrazioni costanti (UNI, 1990). La scelta di “un intervallo di tempo rappresentativo” prevede ampi margini di arbitrarietà, in quanto nella norma non sono previste specifiche indicazioni quantitative a riguardo.

Innanzitutto, un'opzione conservativa suggerirebbe di individuare un intervallo d'integrazione esattamente pari all'intervallo di tempo in cui sono evidenti dai tracciati grafici gli eventi vibratorii emergenti dal “rumore di fondo”, pur non necessariamente eccedenti le soglie di percezione delle vibrazioni. Tuttavia, considerando che i fenomeni vibratorii emergenti dal “rumore di fondo” si realizzano in un tempo complessivo che è notevolmente inferiore alla durata della manifestazione, questa scelta appare eccessiva, come del resto appare eccessiva, pur in senso opposto, l'ipotesi di scegliere come intervallo di riferimento l'intera manifestazione musicale. Infatti, ciò significherebbe “diluire” il contributo di ogni evento vibratorio su un tempo molto ampio, ottenendo dei valori di  $L_{w,eq}$  paragonabili ai livelli di fondo istantanei.

Un compromesso, pur senza alcuna pretesa di validità generale, potrebbe essere rappresentato dal criterio seguente: “per ogni evento o successione ravvicinata di eventi vibratorii che determinano il superamento nei valori istantanei dei livelli di cui all'allegato A - prospetto III - UNI 9614, viene scelto un tempo di integrazione per il calcolo del parametro  $L_{w,eq}$  pari al doppio dell'intervallo temporale in cui si realizza l'evento e/o successione ravvicinata di eventi”.

Nella tabella 1 si riportano i livelli equivalenti di accelerazione ponderata  $L_{w,eq}$  (insieme ai corrispondenti valori di accelerazione ponderata  $a_{w,eq}$ ) per ciascuno degli assi vibratorii significativi (x ed y) calcolati secondo quest'ultimo criterio per gli eventi vibratorii più importanti evidenziati nei grafici precedenti (fig.1). La validità di questo criterio è confermata dal fatto che applicando la prima ipotesi conservativa nella scelta del tempo d'integrazione si ottengono analoghe indicazioni circa l'eventuale superamento dei livelli di riferimento.

Tabella 1 – Livelli equivalenti di accelerazione ponderata lungo gli assi orizzontali (x e y)

Evento n°	Durata	$L_{w,eq}$ – asse x [dB]	$L_{w,eq}$ – asse y [dB]	Livello di riferimento ex UNI 9614 [dB]
1	da 21:10 a 21:18 (8 min)	62.7	68.7	77
2	da 21:21 a 21:35 (14 min)	65.0	71.9	77
3	da 21:35 a 21:40 (5 min)	60.2	64.4	77
<b>4</b>	da 22:11 a 22:19 (8 min)	70.0	<b>79.7</b>	<b>74</b>
5	da 22:29 a 22:38 (9 min)	62.1	57.4	74

## ANALISI SPETTRALE

Ulteriori informazioni circa la dinamica dei fenomeni osservati emergono dall'esame della composizione in frequenza dei dati raccolti (fig. 2). Si può tralasciare dall'analisi l'asse z, in quanto i fenomeni vibratorii lungo tale asse non sono rilevanti, essendo sempre sotto la soglia di percezione umana.

Se si considerano gli spettri in frequenza alla luce delle due distinte modalità di vibrazione precedentemente introdotte (“modalità x” e “modalità y”), si osserva che dove è prevalente la “modalità y” si ha una preponderanza della componente vibratoria a 2 Hz e 2,5 Hz, lungo l'asse y appunto. Anche le vibrazioni lungo l'asse x che accompagnano questi eventi mostrano le stesse frequenze prevalenti, sebbene a livelli assoluti inferiori.

L'analisi della “modalità x” mostra invece un fenomeno diverso: negli spettri associati la frequenza dominante è pari a 3,15 Hz (fig. 2, terzo grafico relativo all'asse x). Inoltre, dall'analisi della registrazione audio in corrispondenza di tale evento, si ricava evidenza del fatto che durante i fenomeni in oggetto avveniva un battito di mani ritmato da parte di tutto il pubblico.

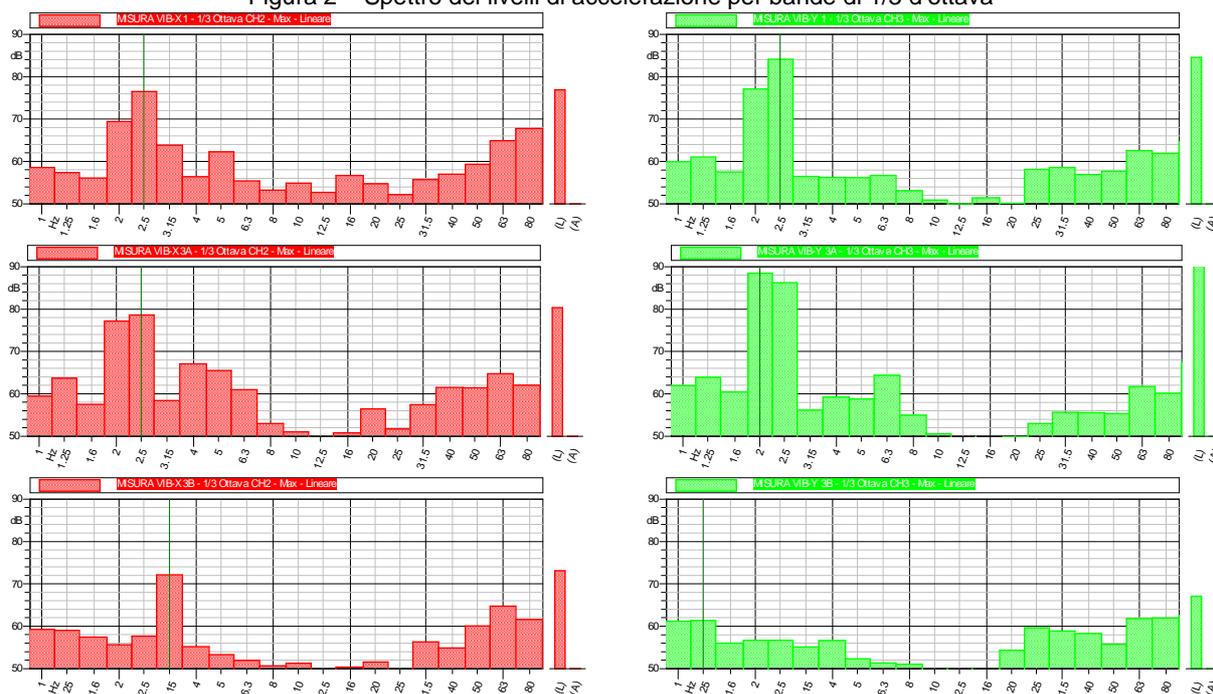
Pertanto, in termini del tutto qualitativi, si può ipotizzare un'associazione tra il salto ritmato del pubblico e le vibrazioni lungo la direttrice edificio recettore-sorgente (modalità y) prevalentemente a 2-2,5 Hz, mentre il battito di mani ritmato appare associato alle vibrazioni lungo la direttrice parallela alla facciata dell'edificio recettore (modalità x) con frequenza dominante di 3,15 Hz.

## CONCLUSIONI

Dall'esame associato delle misure accelerometriche e delle misurazioni fonometriche, svolte contemporaneamente, si desume che non sussiste alcuna chiara e specifica correlazione tra fenomeni vibratorii maggiori ed intensità acustiche prodotte alla sorgente. In alcuni casi le vibrazioni si sono manifestate durante brani musicali particolarmente ritmati e con livelli acustici elevati, in altri casi durante ovazioni e/o battiti di mani.

L'assenza di correlazione tra le intensità del segnale acustico e dell'evento vibratorio trova conferma nel riscontro soggettivo delle persone presenti alle misure: chi ha eseguito le rilevazioni non è mai stato in grado di avvertire con certezza un imminente fenomeno vibratorio interpretando l'andamento contestuale del livello acustico.

Figura 2 – Spettro dei livelli di accelerazione per bande di 1/3 d'ottava



Gli spettri si riferiscono all'intervallo di frequenze tra 1 Hz e 100 Hz. Sulla sinistra (in rosso) sono riportati gli spettri relativi all'asse x, mentre sulla destra (in verde) gli spettri relativi all'asse y. Ogni coppia di spettri corrisponde alla rispettiva rilevazione accelerometrica riportata in fig.1. Il valore rappresentato per ogni frequenza è il livello massimo di accelerazione lineare (non ponderata) registrato nel corso dell'intervallo di misura.

L'evento vibratorio più importante è stato registrato in corrispondenza dell'esecuzione di un brano musicale notoriamente molto coinvolgente (fig. 1, secondo grafico). In tale circostanza il pubblico saltellava sul posto seguendo il ritmo musicale. Questo evento è stato in grado di innescare vibrazioni trasversali (asse y) significative ed è stato l'unico per cui il livello equivalente di accelerazione  $L_{w,eq}$  è risultato superiore ai valori di riferimento proposti dalla norma UNI 9614 nelle approssimazioni qui adottate.

Per quanto riguarda poi l'asse e le frequenze principali di vibrazione, gli eventi di maggiore entità si manifestano lungo l'asse trasversale y (ovvero quello perpendicolare all'edificio recettore) con frequenze di vibrazioni intorno a 2-2,5 Hz. Altri eventi si manifestano invece con una componente dominante lungo l'asse x e con frequenza dominante pari a 3,15 Hz. Le diverse modalità vibratorie osservate non necessariamente implicano all'origine onde vibrazionali che oscillano lungo direttrici diverse. Infatti, considerando le frequenze fondamentali riscontrate negli eventi vibratorii (che risultano essere molto basse) e posto l'elemento geometrico, per cui il fronte d'onda proveniente dalla sorgente impatta la facciata dell'edificio recettore con un angolo di circa 20° rispetto alla perpendicolare, si intuisce che la sfasatura dovuta all'intervallo di tempo intercorrente tra l'"impatto" di un'ipotetica onda longitudinale sul lato destro dello stabile rispetto all'impatto sul lato sinistro possa innescare eventi ondulatorii trasversali direttamente associabili a quelli longitudinali.

E' interessante, infine, notare come in termini di composizione in frequenza si riscontrino differenze negli spettri in corrispondenza di comportamenti differenti del pubblico (rispettivamente salto ritmato o battito di mani). Proprio quest'ultimo aspetto appare meritevole di un approfondimento di studio in circostanze analoghe, ad esempio con rilevazioni accelerometriche condotte contemporaneamente in più posizioni, tra cui risultano senza dubbio significative il piano terra dell'edificio recettore, un'altra posizione lungo la sua facciata ed una posizione nelle immediate vicinanze dell'area sede della manifestazione musicale.

## Bibliografia

- UNI, 9614 *Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo*, 1990
- UNI, 11048 *Vibrazioni meccaniche ed urti – Metodo di misura delle vibrazioni negli edifici al fine della valutazione del disturbo*, 2003
- ISO, 2631-1 *Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – part 1*, 1997
- ISO, 2631-2 *Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – part 2*, 2000
- Farina Angelo, *Valutazione dei livelli di vibrazioni in edifici residenziali – Normativa, tecniche di misura e di calcolo*, 2006, neo-EUBIOS n°16 - ANIT