

EFFETTI DELLE VIBRAZIONI DI ORIGINE AMBIENTALE SULLE COSTRUZIONI CIVILI

A. L. Materazzi

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Perugia.

SOMMARIO

Viene delineata una metodologia di analisi degli effetti delle vibrazioni sulle costruzioni civili. Il giudizio sulla sicurezza deve essere formulato tanto nei confronti degli stati limite ultimi che di quelli di servizio, con riferimento a specifici parametri di tollerabilità.

A tale scopo vengono richiamate le caratteristiche dei sistemi di misura delle vibrazioni e le prescrizioni di alcune normative tecniche italiane ed internazionali.

ABSTRACT

A methodology for the assessment of civil engineering structures against vibration is outlined. Safety has to be checked both for ultimate limit states and for serviceability limit states, with reference to specific acceptability parameters.

For this purpose the main features of the measurement systems are recalled, along with the regulations of some relevant Italian and international codes.

1. INTRODUZIONE

Nel corso della loro vita di servizio gran parte delle costruzioni civili sono esposte a vibrazioni di origine ambientale. Classici sono i casi delle fondazioni delle macchine vibranti, dei ponti ferroviari ed autostradali e delle ciminiere, per i quali esiste una ben consolidata bibliografia tecnica specifica [1].

Peraltro negli ultimi anni con crescente frequenza vengono segnalati da più parti anche casi di edifici, tanto di cemento armato o di acciaio, che di muratura, disturbati da vibrazioni di origine ambientale. Inoltre la tendenza verso l'impiego di materiali dotati di migliori caratteristiche di resistenza meccanica che, unitamente all'impiego del metodo di calcolo agli stati limite, conduce alla realizzazione di strutture sempre più snelle e deformabili e quindi potenzialmente più predisposte a fenomeni vibratorii, induce a prevedere che nel futuro tale casistica tenderà ad aumentare.

Nella maggior parte dei casi le vibrazioni risultano indesiderabili in quanto pregiudicano l'efficienza funzionale delle costruzioni, in particolare arrecando disturbo alle attività umane, ma esse possono anche ridurre la vita di servizio per effetto della accumulazione irreversibile di danneggiamento meccanico (fatica) o danneggiare elementi di pregio contenuti all'interno delle costruzioni [2, 3].

Si pone quindi il problema di individuare una metodologia di analisi degli effetti delle vibrazioni sulle costruzioni, tanto dal punto di vista degli stati limite ultimi che di quelli di servizio, al fine di giungere alla formulazione di un giudizio sulla sicurezza (accettabilità delle vibrazioni) con riferimento

a specifici parametri di tollerabilità.

Scopo del presente lavoro è appunto quello di delineare tale metodologia, discutendo anche criticamente le prescrizioni di alcune normative tecniche nazionali ed internazionali.

2. CLASSIFICAZIONE DELLE VIBRAZIONI DI ORIGINE AMBIENTALE

Numerosi fenomeni fisici possono essere responsabili delle vibrazioni che interessano le costruzioni, ma in ogni caso è possibile classificare le sorgenti di vibrazioni in due gruppi: quello delle vibrazioni prodotte all'interno degli edifici e quello delle vibrazioni che si originano all'esterno. Il primo gruppo comprende le vibrazioni prodotte dal funzionamento di macchinari che operano all'interno delle costruzioni, come motori elettrici, gruppi elettrogeni, trasformatori elettrici ed in generale gran parte degli impianti tecnologici degli edifici. Inoltre le attività umane, che comprendono anche quelle ricreative, sono possibili fonti di vibrazioni di questo tipo. Il secondo gruppo comprende invece il traffico veicolare, tanto quello stradale che ferroviario, sia in superficie che in sottoterraneo, le attività industriali e le vibrazioni di origine ambientale, quali quelle prodotte dal vento, dai terremoti e dal moto ondoso.

Le vibrazioni del primo gruppo si propagano direttamente nell'ambito delle costruzioni nelle quali sono state prodotte, mentre le seconde si propagano preliminarmente attraverso il terreno, subendo di conseguenza fenomeni di filtraggio, riflessione e rifrazione, e, quindi, attraverso le fondazioni raggiungono la sovrastruttura.

A loro volta le tipologie strutturali esposte a vibrazioni nel corso della loro vita di servizio possono essere classificate sulla base della causa che produce le vibrazioni.

Tra le strutture esposte a vibrazioni prodotte dall'uomo ricordiamo le passerelle pedonali, i solai percorsi da persone che camminano o ballano o sono adibiti ad attività sportive, i trampolini per tuffi, le gradinate degli stadi. Tra le strutture esposte alle vibrazioni prodotte dal funzionamento di macchine ricordiamo gli impianti industriali, le fondazioni di macchine vibranti e le torri campanarie.

Nel caso delle vibrazioni prodotte dal vento, le strutture più sensibili sono quelle maggiormente deformabili, in quanto dotate di frequenze proprie prossime a quelle della eccitazione, che è appunto a bassa frequenza. Ricordiamo in questo gruppo gli edifici alti, le torri per telecomunicazione, le ciminiere – esposte al fenomeno del distacco dei vortici di Von Kármán –, i ponti di grande luce – siano essi sospesi o strallati –, le grandi coperture.

Tra le strutture esposte alle vibrazioni dovute al moto ondoso vi sono le piattaforme offshore per l'estrazione di idrocarburi o per l'ancoraggio di natanti, i pontili di attracco e tutta la vasta gamma delle opere di difesa dei porti.

Inoltre occorre ricordare che nell'occasione di eventi sismici tutte le opere civili sono esposte a vibrazioni. A questo proposito però è bene precisare che le vibrazioni di interesse nel quadro del presente lavoro sono quelle dovute a terremoti di ridotta intensità, tali da non indurre danneggiamento o deformazioni permanenti nelle strutture.

Infine le vibrazioni prodotte dal traffico e dalle attività connesse con la realizzazione di nuove costruzioni interessano i ponti, gli edifici di qualunque tipologia, con particolare riferimento al caso delle grandi città ed i monumenti del patrimonio artistico ed archeologico.

3. STRUMENTAZIONE E TECNICHE PER LA MISURA DELLE VIBRAZIONI

Per la rappresentazione delle vibrazioni è, in linea di principio, irrilevante quale dei tre parametri cinematici (accelerazione, velocità o spostamento) venga utilizzato.

Tuttavia, per ragioni legate alla sensibilità della misura, la rilevazione dello spostamento è più conveniente nel caso di vibrazioni a bassa frequenza, mentre le misure di velocità e di accelerazione sono più convenienti in presenza di componenti armoniche di frequ

Ai fini della esecuzione dell'analisi in frequenza della risposta strutturale, viene normalmente scelto il parametro di velocità o il parametro di accelerazione, in base alle indicazioni della normativa che si applica.

Peraltro negli ultimi anni si è affermato sempre di più, per ragioni di praticità d'impiego ed anche di costo, l'utilizzo degli accelerometri ed in particolare di quelli piezoelettrici. Ove la misura in termini di velocità sia indispensabile, essa viene ricavata indirettamente da quella di accelerazione mediante integrazione numerica, ponendo in atto tutte le opportune cautele allo scopo di ottenere risultati affidabili.

Lo schema di funzionamento di un sistema di misura di vibrazioni è rappresentato in forma schematica in fig. 1. In essa si riconoscono il sensore ed il suo sistema di alimentazione, il dispositivo per la integrazione del segnale, il filtro passa basso ed il sistema di rappresentazione dei risultati.

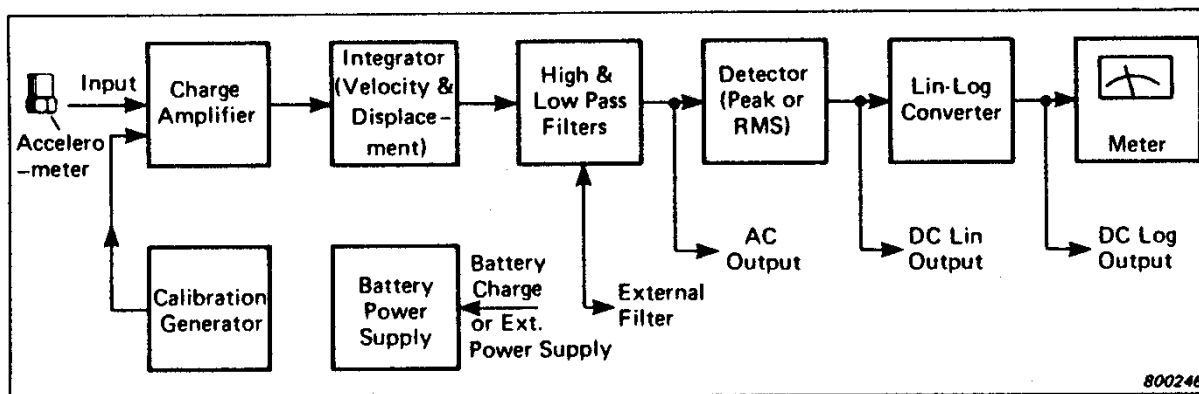


Fig. 1 – Rappresentazione schematica di un sistema di misura delle vibrazioni.

Tale configurazione viene normalmente arricchita disponendo, a valle del sensore e del dispositivo di alimentazione dello stesso, un convertitore analogico-digitale, che fornisce una rappresentazione digitale del segnale a passo temporale prefissato e costante. Solitamente il convertitore è caratterizzato da una risoluzione non inferiore a 12 bit, che consente di rappresentare il segnale mediante $2^{12} = 4096$ livelli diversi di intensità.

E' inoltre importante che il convertitore analogico digitale sia preceduto da un filtro passa basso hardware, allo scopo di prevenire il fenomeno dello *aliasing*, altrimenti inevitabile.

Il convertitore analogico-digitale è direttamente pilotato da un elaboratore elettronico dedicato, governato a sua volta da un apposito programma di gestione, che provvede anche alle eventuali elaborazioni in linea del segnale ed alla memorizzazione permanente dei dati su supporto magnetico per le successive elaborazioni.

4. LA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI ATTRAVERSO IL TERRENO E LE STRUTTURE

Nella sua impostazione più semplice il problema della propagazione delle vibrazioni attraverso il terreno viene affrontato considerando il terreno stesso come un continuo elastico, lineare ed omogeneo [5].

Per un materiale siffatto la condizione di equilibrio in campo dinamico di un elemento infinitesimo di volume è espressa da:

$$\mathbf{s}_{ij,i} + \mathbf{r}f_j = \mathbf{r}\ddot{u}_j \quad (1)$$

in cui

σ_{ij} = tensore delle tensioni;

u_i = vettore spostamento;

ρ = densità del materiale;

f_i = forza di volume per unità di massa.

Le incognite del problema sono nove: le sei componenti di σ_{ij} e le tre componenti di u_i . Poiché le equazioni di equilibrio disponibili sono le tre espresse dalle equazioni (1), il problema è iperstatico. La soluzione può essere ottenuta utilizzando le relazioni che esprimono il legame elastico lineare

$$\mathbf{s}_{ij} = c_{ijkl} \mathbf{e}_{kl} \quad (2)$$

unitamente alle condizioni di congruenza

$$\mathbf{e}_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3)$$

Si perviene pertanto alle:

$$c_{ijkl} u_{k,il} + \mathbf{r}f_j = \mathbf{r}\ddot{u}_j \quad (4)$$

che sono le equazioni del moto in termini di spostamento per il corpo elastico omogeneo.

Supponendo il materiale anche isotropo, le costanti c_{ijkl} si riducono a due soltanto e le equazioni (4) divengono:

$$(\mathbf{I} + \mathbf{m}) u_{i,ij} + \mathbf{m} u_{j,ii} + \mathbf{r}f_j = \mathbf{r}\ddot{u}_j \quad (5)$$

o, in forma compatta:

$$(\mathbf{I} + \mathbf{m}) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} + \mathbf{m} \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{r}f = \mathbf{r}\ddot{\mathbf{u}} \quad (6)$$

La formulazione matematica del problema dinamico è completata dalla specificazione delle condizioni al contorno, che sono in questo caso di due tipi:

a) assegnazione degli spostamenti e delle velocità iniziali su tutto il solido;

b) assegnazione in ogni punto della frontiera del solido di una qualsiasi delle otto combinazioni che si ottengono scegliendo un membro da ciascuno dei tre prodotti:

$$\mathbf{S}_{nn}u_n, \mathbf{S}_{ns}u_s, \mathbf{S}_{nt}u_t, \quad (7)$$

in cui n, s, t sono tre direzioni mutuamente perpendicolari, con n la normale alla superficie esterna del solido.

In assenza di forze di volume le equazioni del moto si semplificano in:

$$(\mathbf{I} + \mathbf{m})\nabla\nabla \cdot \mathbf{u} + \mathbf{m}\nabla^2\mathbf{u} = \mathbf{r}\ddot{\mathbf{u}} \quad (8)$$

Applicando il teorema di Helmholtz, in base al quale ogni campo vettoriale può essere espresso come somma del gradiente di un campo scalare φ e del rotore di un campo vettoriale \mathbf{Y} , si ottiene:

$$\mathbf{u} = \nabla\mathbf{j} + \nabla \times \mathbf{\Theta}, \quad \nabla \cdot \mathbf{\Theta} = 0 \quad (9)$$

Sostituendo la (9) nella (8) si perviene alla:

$$\nabla[(\mathbf{I} + \mathbf{m})\nabla^2\mathbf{j} - \mathbf{r}\mathbf{j}] + \nabla \times [\mathbf{m}\nabla^2\mathbf{\Theta} - \mathbf{r}\mathbf{\Theta}] = 0 \quad (10)$$

che ammette, come soluzioni:

$$\begin{aligned} c_p^2 \nabla^2 \mathbf{j} &= \mathbf{j}, & c_p^2 &= (\mathbf{I} + 2\mathbf{m}) / \mathbf{r} \\ c_s^2 \nabla^2 \mathbf{\Theta} &= \ddot{\mathbf{\Theta}}, & c_s^2 &= \mathbf{m} \mathbf{r} \end{aligned} \quad (11)$$

Si osserva che tanto φ che \mathbf{Y} soddisfano un'equazione d'onda, rispettivamente scalare e vettoriale. Da ciò si deduce che in un solido elastico possono propagarsi solo due tipi di onde: il primo, associato a φ , si propaga con velocità c_p (onde primarie o di compressione), il secondo, associato a \mathbf{Y} , si propaga con velocità c_s (onde secondarie o di taglio).

Poiché λ e μ sono sempre maggiori di zero, la (11) assicura che la velocità di propagazione delle onde primarie è sempre maggiore di quella delle onde secondarie.

La soluzione del problema dinamico solo in rari casi può essere ottenuta per via analitica. Per di nei casi reali si incontrano solidi non omogenei ed anisotropi, quali il terreno e la struttura, caratterizzati quasi sempre da geometrie complesse. Inoltre si presenta talvolta la ulteriore complicazione che, il terreno non possa neanche essere considerato elastico lineare.

E' pertanto indispensabile fare ricorso a soluzioni approssimate, ottenute mediante tecniche di discretizzazione del continuo tridimensionale e del tempo.

Tra le varie alternative disponibili quella oggi applicata più di frequente è la tecnica degli elementi finiti, che presenta indubbi vantaggi sia dal punto di vista teorico, sia dal punto di vista pratico per la facilità di essere impiegata con l'ausilio di elaboratori elettronici.

Contropartita di questi vantaggi è la necessità di disporre di informazioni più approfondite sui terreni interessati al fenomeno di propagazione ondosa, informazioni che debbono essere acquisite mediante specifiche campagne di prospezione geognostica.

5. METODOLOGIA DI ANALISI DELLA SICUREZZA DELLE STRUTTURE ESPOSTE A VIBRAZIONI

Come già anticipato nella Introduzione, le vibrazioni possono condurre le strutture ad esse esposte al raggiungimento tanto di stati limite di servizio che di stati limite ultimi.

5.1 Stati limite ultimi

Per quanto riguarda gli stati limite ultimi, le vibrazioni ambientali possono indurre fatica quando i cicli di tensione che esse producono sono ripetuti un grande numero di volte, tipicamente molti milioni.

La procedura di analisi della sicurezza è, in tal caso, ben nota ed inizia con la decomposizione della storia temporale delle tensioni in cicli elementari, dei quali viene valutato il numero e l'ampiezza mediante note tecniche di conteggio, quale, ad esempio il metodo *rainflow*. Tecniche di riordino statistico vengono talvolta utilmente impiegate qualora non sia indispensabile conservare memoria della successione temporale dei singoli cicli. Si perviene pertanto a rappresentazioni sintetiche dell'insieme dei cicli di tensione sotto forma di *collettivi delle tensioni*, quale quello rappresentato, a titolo esemplificativo, in fig. 2.

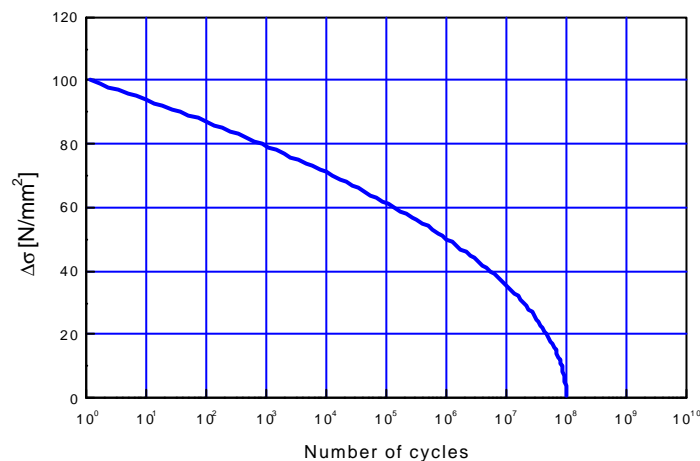


Fig. 2 – Esempio di un collettivo delle tensioni.

Vengono quindi utilizzati i risultati di prove di fatica condotte in laboratorio mediante storie di tensioni sinusoidali ad ampiezza costante ed espresse dalle curve S-N o di Wöhler.

Successivamente viene determinato il danneggiamento D prodotto dalla storia di tensioni reale, utilizzando un opportuno criterio di danneggiamento cumulativo. Molto diffuso e, tutto sommato affidabile tenuto conto nelle incertezze in gioco, è quello di Palmgren-Miner, espresso dalla relazione:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (12)$$

che presenta la caratteristica di essere privo di memoria e quindi consente di non tener conto della effettiva successione dei cicli di tensione.

Il giudizio sulla sicurezza consiste nel controllare che il danno sia inferiore ad un opportuno valore ammissibile, non troppo diverso dall'unità.

5.2 Stati limite di servizio

Gli stati limite di servizio sono essenzialmente tre: il danneggiamento di componenti strutturali portati non pregiudizievole per la sicurezza, ma solo per l'estetica e per questo talvolta definito come *danneggiamento cosmetico*, il disturbo alle attività produttive, ed il disturbo agli occupanti delle costruzioni.

Sono disponibili più metodologie di analisi della sicurezza, ma tutte basate sul confronto tra parametri sintetici, rappresentativi degli effetti delle vibrazioni ed opportuni valori di riferimento. La differenza fra le varie metodologie consiste nel tipo di parametro utilizzato per rappresentare la severità delle vibrazioni.

Tra i parametri comunemente impiegati ricordiamo l'ampiezza massima della accelerazione o della valore R.M.S. dell'accelerazione o della velocità.

Nel secondo caso è necessaria la esecuzione dell'analisi spettrale del segnale rilevato. Preferibilmente vengono impiegate a tale scopo tecniche ad ampiezza di banda prefissata, quali le analisi spettrali in banda di 1/3 di ottava. Eventuali coefficienti di pesatura delle ordinate spettrali, che tengano conto della sensibilità spettrale dell'uomo, vengono talvolta impiegati nel caso di stati limite che consistano nel disturbo agli occupanti delle costruzioni.

6. LE NORMATIVE ITALIANE ED INTERNAZIONALI

6.1 Stati limite ultimi

La normativa italiana si occupa della sicurezza a fatica nel DM 9/1/1996 "Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche".

Per quanto riguarda le strutture di c.a., c.a.p., c.a.p.p., la procedura prescritta consiste nel controllare che le tensioni in esercizio agenti sulle barre di acciaio o sulle armature di precompressione rientrino nella limitazione:

$$s_{\min} < \frac{2}{3} s_{\max} \quad (13)$$

e quindi nel ridurre il valore delle tensioni ammissibili secondo l'espressione:

$$\bar{s}_s = 0,75 s_s \left(1 + 0,5 \frac{s_{\min}}{s_{\max}} \right) \quad (14)$$

dove σ_s è la tensione limite dell'armatura in esercizio.

Si osserva che la procedura prescinde dal conteggio del numero dei cicli e non tiene conto del pericolo della fatica del calcestruzzo e del legame di aderenza tra acciaio e calcestruzzo.

Nel caso delle strutture di acciaio la normativa rimanda alle Istruzioni CNR 10011/86 "Costruzioni di acciaio. Istruzioni per il calcolo, l'esecuzione, il collaudo e la manutenzione", che prescrivono l'impiego della tecnica basata sul conteggio dei cicli di tensione e sull'applicazione del criterio di danneggiamento cumulativo di Palmgren-Miner.

Le normative internazionali più aggiornate adottano quest'ultima impostazione tanto per le strutture metalliche che per quelle di cemento armato e di cemento armato precompresso.

6.2 Stati limite di servizio

Complesso ed articolato è il quadro della normativa internazionale per rapporto agli stati limite di servizio associati alle vibrazioni. In Italia non esiste una normativa cogente specifica, ma si può far riferimento a documenti dell'UNI.

In particolare la UNI 9916 si occupa degli stati limite di danneggiamento, indicando il campo di frequenza di interesse per diversi tipi di eccitazione e fornendo gli strumenti per la classificazione degli edifici secondo la resistenza meccanica alle vibrazioni.

La UNI 9614 si occupa dei livelli di tollerabilità nei confronti del disturbo agli occupanti. Le vibrazioni sono espresse mediante il livello L in dB del valore efficace o r.m.s. dell'accelerazione in m/s^2 :

$$L = 20 \log(a / a_0) \quad (\text{con } a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2)$$

I livelli rilevati dall'analisi in terzi di ottava $L_{i,w}$ vengono cumulati per ottenere un solo valore di confronto:

$$L_w = 10 \log \sum_i 10^{L_{i,w}/10}$$

Vengono poi specificati, sotto forma tabellare, i livelli di tollerabilità.

In campo internazionale le norme ISO costituiscono un punto di riferimento importante.

In particolare la ISO 10137 individua due metodi di valutazione. Il primo metodo, teorico, è basato sulla modellazione matematica delle caratteristiche dinamiche della struttura e sul calcolo della risposta in relazione alle caratteristiche di vibrazione della sorgente. Il secondo metodo, di tipo teorico-sperimentale consiste nella misurazione di spostamenti, di velocità, di accelerazioni. La scelta del parametro opportuno da rilevare è dettata dal metodo di analisi e dal criterio di acc riferimento.

Nel caso del confort degli occupanti, la norma rimanda ai criteri di tollerabilità contenuti nelle più specifiche ISO 2631/1 e ISO 2631/2 e nel caso del disturbo alle attività produttive rimanda alla ISO 8569. Nessuna indicazione viene fornita per il danneggiamento dei componenti strutturali.

La ISO 2631/1 e la ISO 2631/2 prescrivono un controllo di accettabilità basato sull'accelerazione. Come metodo descrittivo viene utilizzato, quello dell'analisi spettrale per terzi di ottava, con ordinate ponderate in funzione della sensibilità umana. Viene poi tenuto conto del tipo di edificio e dell'orario di esposizione mediante opportuni fattori moltiplicativi.

Tra le numerose altre norme internazionali disponibili basterà qui citare le tedesche DIN per il loro diffuso impiego anche al di fuori della Germania e per il fatto che sono anche citate dalle norme UNI.

Per quanto riguarda la sicurezza contro il danneggiamento strutturale, le DIN 4150/3 sono tra i riferimenti più completi. Il parametro utilizzato è la massima velocità assoluta di vibrazione, rilevata indipendentemente in direzione orizzontale o verticale.

I valori di riferimento della velocità massima di vibrazione, in funzione del campo di frequenza e per varie tipologie strutturali, sono indicati in forma tabellare.

Le DIN 4150/2 affrontano invece il problema della sicurezza nei confronti del disturbo agli occupanti. Esse propongono la valutazione del fattore KB, definito come *fattore derivato di intensità di percezione*, che può essere calcolato indifferentemente sia a partire da misure di accelerazione, che di velocità o di spostamento.

Il valore di KB va confrontato con opportuni valori di riferimento consegnati in una apposita tabella.

7. ESEMPIO DI APPLICAZIONE

Nel presente paragrafo viene descritta la procedura adottata per l'analisi della sicurezza nei confronti del disturbo arrecato agli occupanti di un edificio sito in Perugia.

L'edificio in oggetto, realizzato nei primi anni del dopoguerra, si trova tra via Cacciatori delle Alpi e Piazza Partigiani. Lo schema strutturale è costituito da un telaio di cemento armato con due piani interrati, quattro piani fuori terra ed un sottotetto praticabile. L'altezza complessiva della struttura è di 26.3 m, mentre quella della sola parte fuori terra è di 23 m.

Le vibrazioni investigate sono dovute al movimento di autobus di linea nella adiacente Stazione Autobus di Piazza Partigiani.

Per l'acquisizione delle vibrazioni è stata impiegata una attrezzatura sperimentale composta da tre accelerometri sismici di tipo piezoelettrico PCB mod. 393 C, di elevata sensibilità e basso rumore, collegati ad un convertitore analogico-digitale Strawberry Tree mod. Data Shuttle Express, pilotato da un elaboratore elettronico dedicato e governato da un apposito software di gestione, il quale si occupa anche della memorizzazione permanente dei dati.

Gli accelerometri sono stati fissati alle membrature di cemento armato mediante staffe di supporto metalliche che consentono la disposizione degli accelerometri secondo tre direzioni ortogonali fra loro.

I punti di misura considerati sono tre: un pilastro del primo piano ed una trave ed un pilastro del secondo piano. Come frequenza di campionamento si è adottato il valore di 500 Hz e la durata di ciascuna misura è stata di circa 15 minuti.

A titolo di esempio vengono discussi nel seguito i risultati ottenuti dal rilievo delle vibrazioni del pilastro del 2° piano. In tab. I sono riportati i valori massimi delle accelerazioni e delle velocità misurate nelle tre direzioni ortogonali. La direzione x è parallela al lato lungo dell'edificio, la direzione

Accelerometro	Accelerazione massima (m/s ²)	Velocità massima (m/s)
1 (dir y)	0.2556	0.006451
2 (dir z)	0.2983	0.004168
3 (dir x)	0.2018	0.013698

Tab. I – Valori massimi della accelerazione e della velocità misurate in corrispondenza del pilastro del 2° piano.

L'andamento della storia temporale della accelerazione del sensore n°2, quello verticale, è riportata in fig. 3.

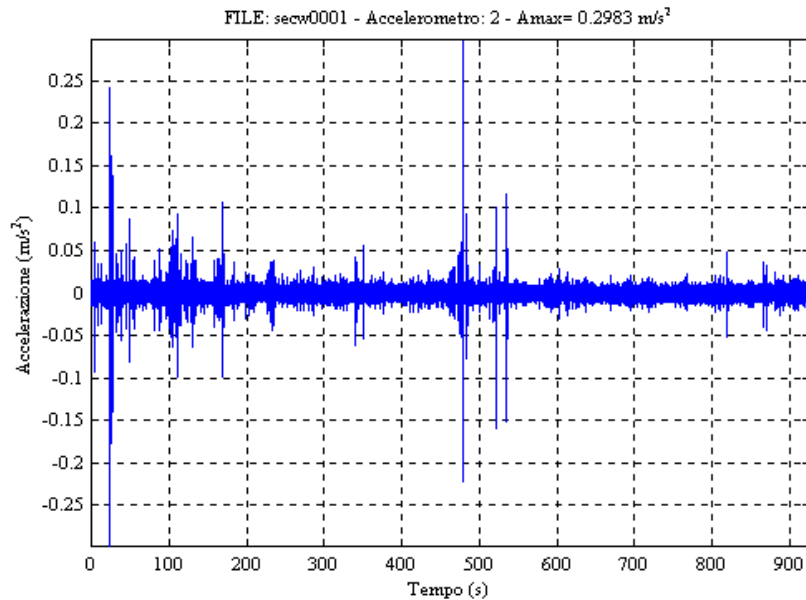


Fig. 3 – Pilastro al 2° piano. Storia temporale della accelerazione verticale.

L'esame della tab. I e delle fig. 3 mostra che durante la misura, l'accelerazione verticale ha raggiunto il valore di 0.30 m/s^2 , pari a circa $0,03 \text{ g}$.

Del segnale misurato è stata determinata preliminarmente la densità di potenza spettrale, riportata in fig. 4.

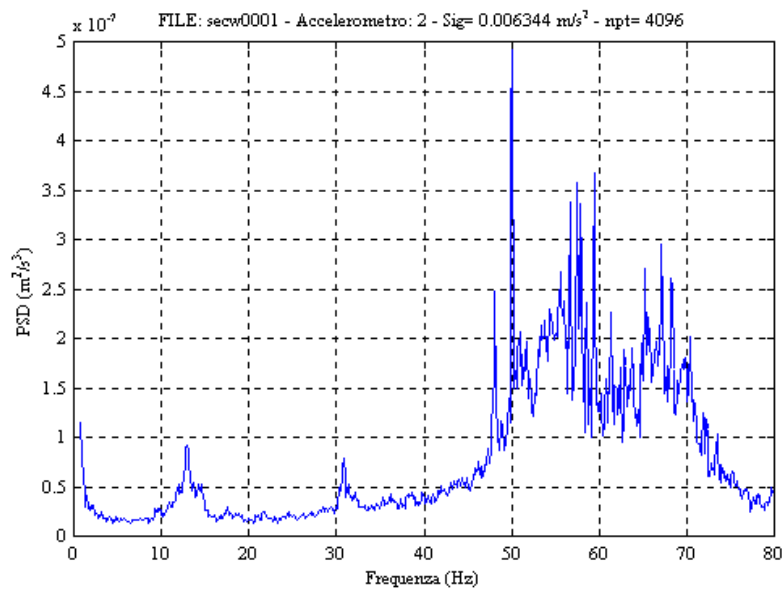


Fig. 4 – Pilastro al 2° piano. Densità di potenza spettrale della accelerazione verticale.

Dalla figura sono ben evidenti alcune frequenze proprie di vibrazione della struttura in direzione verticale, posizionate a circa 13, 31 e 47 Hz. Questi valori, inusualmente elevati rispetto a quelli che si incontrano nelle analisi sismiche delle strutture, sono dovuti alla elevata rigidezza verticale della struttura ed alla collaborazione dei componenti portati, che normalmente viene trascurata nelle verifiche sismiche.

Allo scopo di poter applicare la norma UNI 9614, è stata quindi eseguita l'analisi in banda di 1/3 di ottava, riportata in fig. 5.

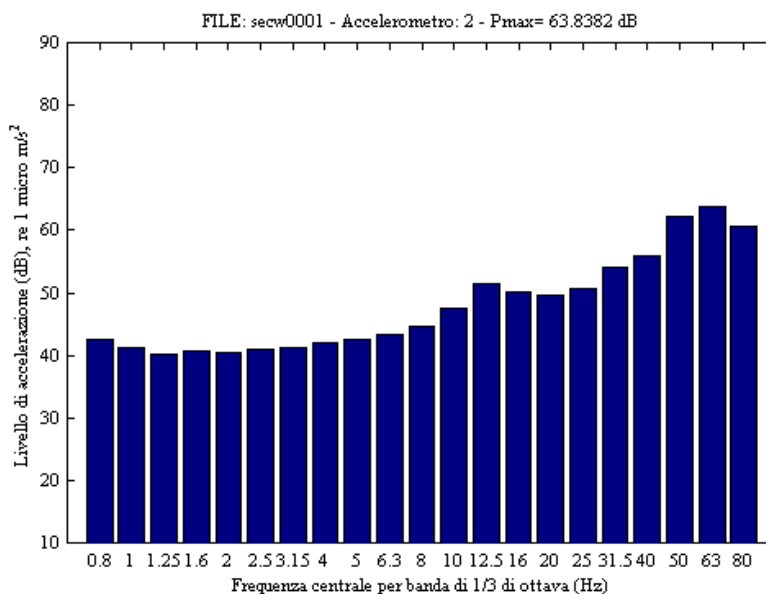


Fig. 5 – Pilastro al 2° piano. Accelerazione verticale. Analisi in frequenza in banda di 1/3 di ottava.

I livelli massimi delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza sono riportate in tab. II per tutti quanti i punti di misura.

Punto di misura	$P_{a,dir y}$ (dB) re 10^{-6} m/s ²	$P_{a,dir z}$ (dB) re 10^{-6} m/s ²	$P_{a,dir x}$ (dB) re 10^{-6} m/s ²
Pilastro del 1° piano	53.69	55.49	52.29
Pilastro del 2° piano	55.89	54.21	61.93
Trave del 2° piano	62.27	53.21	51.65

Tab. II – Livelli massimi delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza.

L'indagine ha mostrato che i valori massimi del livello di accelerazione complessiva ponderata in frequenza sono inferiori al valore limite di 83 dB consentito dalla UNI 9614 per gli edifici destinati ad ufficio, ed anche al di sotto del valore limite più restrittivo di 71 dB previsto per le aree critiche, per le quali è tollerato un livello di vibrazioni ancora più ridotto di quello compatibile con le abitazioni nelle ore notturne.

8. OSSERVAZIONI CONCLUSIVE

Le costruzioni civili sono esposte, nel corso della loro vita di servizio, a vibrazioni di origine ambientale. Esse possono arrecare disturbo agli occupanti, impedire il soddisfacimento dei requisiti di efficienza funzionale, produrre danneggiamento per fatica. Nel caso in cui i livelli di tollerabilità delle vibrazioni vengano superati si richiede l'intervento consapevole del progettista strutturale.

La metodologia di intervento parte dalla conoscenza del fenomeno vibratorio indesiderato, prosegue con lo studio della propagazione delle vibrazioni attraverso il terreno e con l'analisi della risposta strutturale, si conclude con il giudizio sul comportamento della struttura in relazione a prefissati criteri di accettabilità.

D'altra parte la metodologia sopra esposta esige che la progettazione strutturale si arricchisca dei metodi di indagine sperimentali idonei alla acquisizione delle vibrazioni in condizioni di servizio, tecniche applicate da lungo tempo nel settore delle costruzioni meccaniche, ma ancora poco utilizzate nel settore della ingegneria civile.

Emerge pertanto l'esigenza di mettere in contatto gli ingegneri civili con queste problematiche, prevedendone anche la opportuna valorizzazione negli Insegnamenti Ufficiali delle Facoltà di Ingegneria.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C.E.B., Vibration problems in structures, Bull. d'Information n. 209, August 1991.
- [2] A. L. Materazzi, E.F. Radogna, Requisiti di durabilità e tollerabilità nella progettazione strutturale di opere in sotterraneo per gallerie metropolitane, Atti delle Giornate AICAP '95, Pescara, 1995.
- [3] A. L. Materazzi, E.F. Radogna, Il controllo delle vibrazioni negli stati limite di servizio delle costruzioni di cemento armato, Atti delle Giornate AICAP '99, Torino, 1999.
- [4] E. O. Doebelin, Measurement systems: application and design, McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo, 1976.
- [5] K. F. Graff, Wave motion in elastic solids, Ohio State University Press, Tokyo, 1975.