

# **M**ESSA A PUNTO DI UNA PROCEDURA TEORICO-SPERIMENTALE PER LA MISURA DELL'IMPATTO VIBRAZIONALE DOVUTO AL TRAFFICO VEICOLARE SUGLI EDIFICI DI INTERESSE STORICO-ARTISTICO

## **S**ETTING UP OF A THEORETICAL-EXPERIMENTAL APPROACH FOR THE MEASUREMENT OF THE VIBRATIONAL IMPACT ON CULTURAL HERITAGES DUE TO VEHICULAR TRAFFIC

**Salvatore Barbaro, Giuseppe Barrera**

Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali  
Università degli Studi di Palermo

**Antonio Sansone Santamaria**

Laboratorio di Fisica Dipartimento Provinciale di Palermo  
ARPA Sicilia

### **1. Il problema del degrado dei Beni Culturali causato dalle vibrazioni da traffico**

Il passaggio dei veicoli causa vibrazioni che si trasmettono agli edifici circostanti sia attraverso l'aria sia attraverso il suolo. Tra le vibrazioni che si trasmettono attraverso l'aria vanno distinte quelle ad alta frequenza [50 ÷ 100 Hz] dovute alle vibrazioni dei motori dei grossi mezzi di trasporto da quelle legate alla velocità dei veicoli stessi. Le onde di pressione, in entrambi i casi, causano negli edifici adiacenti vibrazioni di componenti deformabili, quali porte e finestre, ma certamente non influenzano le parti più rigide degli edifici stessi e, in particolare, la loro struttura portante. Le vibrazioni che si propagano attraverso il suolo, caratterizzate da frequenze dominanti nell'intervallo [4 ÷ 20 Hz], sono generate dalla variazione delle forze di contatto tra le ruote e la superficie stradale [1] e consistono sia in onde di compressione sia di taglio. Queste, attraverso la pavimentazione, la fondazione stradale e il terreno, giungono agli edifici adiacenti. L'esperienza ha dimostrato che le vibrazioni verticali sono sempre maggiori di quelle orizzontali: cinque volte rispetto a quelle trasversali e due volte quelle longitudinali. Le componenti verticali delle vibrazioni sono amplificate nei solai, specialmente se in legno, mentre le componenti orizzontali causano oscillazioni che si risentono soprattutto ai piani alti degli edifici. Vibrazioni di piccola ampiezza causano fastidio alle persone mentre vibrazioni di entità maggiore possono provocare danni alle strutture. Tra queste quelle più vulnerabili sono senz'altro i monumenti, spesso costruiti con materiali di basse caratteristiche meccani-

che e con fondazioni non adeguate. In molti casi siffatte strutture in vicinanza di strade di traffico intenso hanno mostrato danneggiamenti che potevano essere attribuiti alle vibrazioni indotte da traffico.

Negli ultimi anni, il continuo aumento della domanda di trasporto su gomma e su rotaia, legato al processo di sviluppo economico e sociale, ha dato luogo al fenomeno delle vibrazioni indotte dai mezzi di trasporto sollecitando la sensibilità delle popolazioni residenti e l'attenzione dei tecnici. Esso ha assunto sempre maggiore importanza in relazione sia all'aumentato numero di mezzi pesanti in circolazione sulle strade e alla realizzazione di nuove linee ferrate per il trasporto veloce delle merci e dei passeggeri, sia alla diversa tipologia strutturale delle costruzioni moderne (più snelle e più leggere grazie ad un più razionale utilizzo dei materiali con migliori caratteristiche di resistenza meccanica). Nei centri storici delle città si possono individuare una serie di fattori concomitanti che tendono ad amplificare ulteriormente tale fenomeno:

- le sovrastrutture stradali maggiormente utilizzate nei centri storici sono spesso di tipo lapideo ed il loro impiego è dettato da motivi prevalentemente estetici;
- il non dimensionamento o la mancanza di manutenzione sono spesso causa di elevati livelli di irregolarità;
- nell'ottica di una politica di disincentivazione dell'uso dell'auto privata ai fini della riduzione dell'inquinamento atmosferico, l'incidenza dei veicoli pesanti per trasporto pubblico nella composizione del traffico veicolare, già oggi rilevante, è destinata ad aumentare in futuro.

In funzione di quanto sopra, il *rumore* e le *vibrazioni* indotte dal traffico veicolare terrestre assumono sempre di più i connotati di una fra le principali cause di impatto ambientale.

C'è da dire comunque che, sovente, la componente vibrazione negli studi di impatto ambientale viene trascurata, e ciò per diversi motivi. Uno dei motivi principali è da ricercare nella notevole complessità dello studio relativo alla generazione e propagazione delle onde di vibrazione (in particolare attraverso il suolo), che per essere affrontato richiede il coinvolgimento di numerose competenze (ingegneria meccanica, stradale, geotecnica, strutturale).

Alla difficoltà oggettiva di saper descrivere la componente vibrazione presente nel territorio prima della realizzazione di un'opera, seguono la difficoltà di non disporre di modelli matematici di previsione convalidati perfettamente e la scarsa conoscenza dei criteri di progettazione delle opere di mitigazione, compresa una seria casistica di risultati ottenuti laddove è stata realizzata l'opera di riduzione delle vibrazioni.

Un altro motivo di preoccupazione e di difficoltà risiede nella consapevolezza che un'errata progettazione di un'opera di mitigazione delle vibrazioni può sortire l'effetto contrario, con aumento anche pericoloso della componente per effetto della risonanza delle strutture investite dall'energia meccanica.

Infine, un'ulteriore difficoltà risiede nel fatto che ancora oggi in Italia non esiste una legge cogente sull'inquinamento da vibrazioni che fissi i limiti della componente sul territorio. Le norme a cui si fa riferimento per valutare effetti e rimedi sono le norme internazionali ISO e quelle nazionali quali UNI, DIN, norme francesi.

### **1.1. Il fenomeno fisico**

Il rumore e le vibrazioni sono due fenomeni che, pur avendo origine comune da ricercare nell'interazione meccanica tra le ruote e la superficie di rotolamento, presentano caratteristiche, modalità di propagazione ed effetti indotti sull'ambiente circostante notevolmente differenti [2].

Il *rumore* è dovuto alla propagazione per via aerea di onde meccaniche a frequenze maggiori di 50 Hz.

Le *vibrazioni* si generano per le proprietà elastiche delle strutture e sono fenomeni determinati da trasferimenti di energia potenziale elastica in energia cinetica. Nascono generalmente a causa di forze perturbatrici che agiscono sul sistema meccanico e la loro ampiezza dipende dalle proprietà elastiche del sistema (vibrazioni forzate).

Sperimentalmente si osserva che in un sistema meccanico, a seguito di una perturbazione delle condizioni iniziali di quiete e in assenza di forzanti esterne, i fenomeni vibratorii tendono ad attenuarsi più o meno rapidamente. Se nel sistema fossero presenti solo le forze elastiche e le forze d'inerzia, il decadimento dell'ampiezza dei fenomeni vibratorii non si giustificerebbe (la forza elastica e quella d'inerzia sono entrambe forze conservative). Nella realtà sono presenti dei fenomeni dissipativi che, ad ogni ciclo di oscillazione, trasformano in energia termica o acustica, una quota parte dell'energia totale del sistema (inizialmente solo somma di quella elastica e di quella cinetica). Queste forze, che possono essere di diversa natura, si chiamano forze dissipative.

La presenza delle forze dissipative è importante anche nelle vibrazioni forzate perché limita l'ampiezza delle vibrazioni del sistema specie in corrispondenza delle frequenze di risonanza (senza smorzamenti questa sarebbe teoricamente infinita).

Le onde di vibrazione si attenuano con la distanza molto più gradualmente del rumore ed hanno, pertanto, maggiore probabilità di raggiungere i ricevitori situati lontano dalla linea di trasporto.

## 1.2. Danni prodotti dalle vibrazioni

Per **ricevitori** si intendono tutti quei sistemi, persone, manufatti (in particolare edifici storici e fatiscenti), macchine di precisione, il cui comportamento può essere modificato, o meglio, disturbato dalla presenza delle vibrazioni.

Per proteggerli è necessario prevedere il livello delle vibrazioni e verificare se esse sono tali da indurre fastidi o danni e, dove ciò avvenisse, ridurre, attraverso interventi di mitigazione, l'ampiezza delle vibrazioni e, di conseguenza, il danno o disturbo causato.

La previsione del danno, indotto da sorgenti di vibrazioni a manufatti edili o infrastrutture, comporta la necessità di valutare effetti di carattere:

- *diretto*, in conseguenza delle azioni dinamiche trasmesse ai manufatti del campo di vibrazioni propagate nel sottosuolo [3];
- *indiretto*, causati da cedimenti in fondazione indotte dal consolidamento del terreno sottoposto a vibrazioni.

Gli effetti di entrambi i tipi scaturiscono dalla combinazione di:

- modalità di emissione di energia alla sorgente (ampiezza, contenuto in frequenza, durata);
- caratteristiche del mezzo sede del fenomeno di propagazione (proprietà meccaniche e geometriche del sottosuolo);
- interazione tra mezzo di propagazione e ricevitore.

Sorgenti di vibrazioni quali attività di cantiere, scoppi di mine, funzionamento di macchine, traffico stradale e ferroviario [4], possono essere causa di disturbo e apprensione degli occupanti di edifici e ciò può portare alla necessità di verificare se le vibrazioni siano tali da indurre o meno danni alle costruzioni, soprattutto in presenza di evidenti danni architettonici generati da altre cause.

In generale danni strutturali all'edificio nel suo insieme, attribuibili a fenomeni vibratorii, sono estremamente rari e quasi sempre derivano dal concorso di altre cause.

Perché le vibrazioni possano arrecare danni strutturali è comunque necessario che le vibrazioni raggiungano livelli tali da causare, prima, fastidio e disturbo agli occupanti. Sono invece frequenti altre forme di danno, di entità definita "**di soglia**" che, senza compromettere la sicurezza strutturale degli edifici, ne possono determinare una riduzione del valore d'uso.

I danni di soglia si presentano sotto forma di fessure nell'intonaco, accrescimenti di fessure già esistenti, danneggiamenti di elementi architettonici: sono indicati come "**danni estetici**" (*cosmetic damage*).

Il problema della conservazione degli edifici di elevato valore artistico ed architettonico è particolarmente sentito nei centri urbani fortemente trafficati o in vicinanza di linee metropolitane.

Le vibrazioni possono essere anche causa di danneggiamenti o malfunzionamenti di apparecchi all'interno degli edifici.

Conseguentemente la misurazione delle vibrazioni degli edifici è diventata un problema di rilevante importanza.

Essa può essere finalizzata a diversi obiettivi:

- a) *riconoscimento del problema*: per valutare se i livelli di vibrazione riscontrati possano determinare danni all'edificio o limitarne la funzionalità specifica per cui si rende necessario un approfondimento dello studio;
- b) *verifiche o controlli*: per rapportare il livello delle vibrazioni ai limiti suggeriti o imposti da normative specifiche, relative per esempio alle condizioni di esercizio di apparecchiature;
- c) *caratterizzazione a scopo di diagnostica*: per verificare, rispetto a ipotesi progettuali o a condizioni precedentemente note, l'insorgenza di modifiche strutturali dovute a carichi accidentali severi (per esempio terremoti) o a degrado dei materiali;
- d) *caratterizzazione a scopo di previsione*: per valutare l'attitudine dell'edificio a sopportare carichi dinamici accidentali, quali le raffiche di vento, o per stimare l'efficacia di provvedimenti per l'attenuazione dei fenomeni vibratorii.

Una tale caratterizzazione può anche essere effettuata al solo scopo di ottenere informazioni sulle proprietà strutturali dell'edificio, attraverso la stima dei suoi parametri dinamici.

Questi differenti obiettivi richiedono diversi metodi d'approccio, per quanto riguarda sia la misurazione delle vibrazioni sia il trattamento dei dati e la loro valutazione.

### **1.3. Analisi dinamica sperimentale**

L'analisi sperimentale in campo dinamico di elementi strutturali ha un'importanza fondamentale nello studio di ciascun modello [5] e, condotta di pari passo ad analisi teoriche di tipo analitico-numerico [6], va considerata come un passo essenziale nella modellazione stessa. La sperimentazione fornisce, infatti, la base meccanica di ciascuno studio e diventa motivazione per l'affinamento dei modelli analitici di confronto e strumento indispensabile di convalida di qualunque risultato di tipo analitico.

L'analisi delle vibrazioni indotte dal traffico non può prescindere dallo studio sperimentale, sia al fine di verificare l'entità e gli effetti delle vibrazioni stesse, sia per caratte-

rizzare la struttura dal punto di vista dinamico e valutarne la vulnerabilità. L'analisi dinamica sperimentale rappresenta, pertanto, uno strumento utile in tutte le fasi della vita di una struttura:

- in fase di progettazione, attraverso prove su modelli in scala della struttura o di suoi componenti, consente di confrontare varie soluzioni progettuali;
- in fase di collaudo, consente di controllare l'effettivo comportamento dinamico dell'opera, da confrontare con quello previsto in fase di progetto;
- in fase di esercizio, permette di verificare lo stato di salute dell'opera, di diagnosticare la presenza di danni e fenomeni di degrado; inoltre il monitoraggio dinamico consente il controllo continuo dell'opera e costituisce lo strumento più adatto nel caso di strutture soggette in esercizio a carichi dinamici quali sisma, vento e traffico.

Il presente lavoro riguarda l'analisi dei metodi di previsione e di osservazione e l'applicazione di tali metodi ad un caso reale.

#### **1.4. Propagazione delle onde nell'edificio**

La propagazione delle onde all'interno degli edifici dipende dall'interazione suolo-fondazioni [7] e dalla propagazione attraverso le strutture portanti. La scarsa solidarietà tra fondazioni e terreno [8] comporta dei fenomeni dissipativi, differenti per le diverse tipologie di fondazione. La presenza nella struttura di solai, con frequenze di risonanza comprese tra 10 ÷ 30 Hz, può causare problemi di amplificazione.

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-fondazione;
- 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.

#### *Accoppiamento suolo fondazioni*

È possibile reperire in letteratura dei valori di attenuazione delle onde vibrazionali in funzione della banda di frequenza e della tipologia di edificio (tab. 1).

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.

Tabella 1. Valori di attenuazione delle onde vibrazionali in funzione della banda di frequenza e 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

#### *Amplificazione dovuta alla presenza di risonanze*

Per poter tenere conto di questo fenomeno è necessario valutare prima i valori delle frequenze proprie della struttura e poi confrontarli per costatarne la coincidenza o meno con le frequenze delle componenti vibrazionali.

La norma DIN 4150, per le frequenze orizzontali, 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 vibrazioni verticali, la frequenza fondamentale dipende con proporzionalità diretta dalle condizioni di vincolo e dallo spessore del solaio, mentre con proporzionalità inversa dalla luce libera, dal modulo di Young e dalla densità del materiale costituente il solaio.

Oltre alla prima frequenza di risonanza verticale, è considerata anche la seconda frequenza. Essa si calcola analogamente alla prima, variando le condizioni di vincolo.

Aumentando il rapporto tra frequenza di eccitazione e frequenza propria varia il fattore di trasferimento e dunque gli spostamenti dell'edificio sotto l'azione del traffico veicolare aumentano, fino a raggiungere il massimo quando frequenza di eccitazione e frequenza propria coincidono.

#### *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 classi-

co problema della parete vibrante. Numerose esperienze 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.

## 2. Norme di riferimento

Molti ricercatori hanno studiato gli effetti delle vibrazioni sugli edifici e sulle persone al fine di stabilire le scale di percezione e i limiti ammissibili. Le ricerche in questo campo, alle quali hanno contribuito, tra gli altri, Malloch (1965), Reiher (1970), Soliman, Dieckermann, Zeller (1980), hanno portato alla formulazione delle normative sulla protezione dell'uomo e degli edifici dalle vibrazioni. Le sperimentazioni iniziarono utilizzando vibrazioni di forma armonica semplice, fino ad arrivare a comprendere vibrazioni aleatorie o non periodiche a spettro conosciuto.

In tale modo le diverse normative hanno fissato i limiti di durata di esposizione alle vibrazioni (limiti di comfort, soglia di fatica, e soglia di pericolo) in funzione della frequenza e dell'accelerazione.

Si premette che per ricevitore si intende un qualunque sistema il cui comportamento può essere influenzato dalle vibrazioni (persone, edifici storici monumentali, macchinari di precisione) (fig. 1).

La risposta di un edificio o dei suoi elementi strutturali sottoposti ad eccitazione dinamica dipende, oltre che dal contenuto spettrale dell'eccitazione stessa, dalle caratteristi-

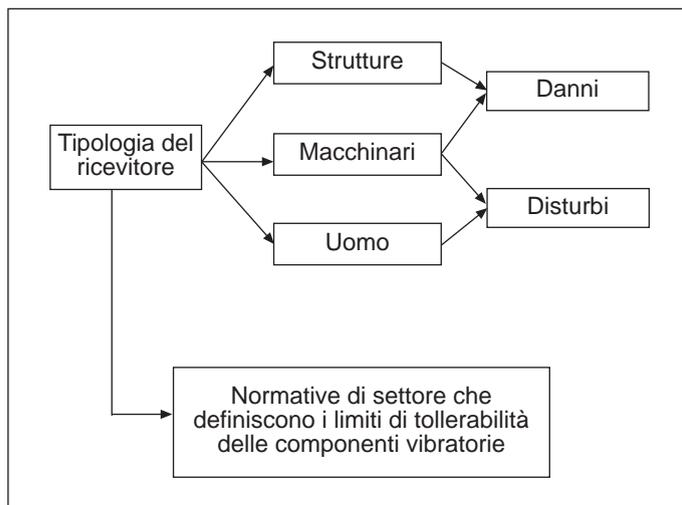


Figura 1. Tipologia di ricevitore di vibrazioni.

che dinamiche dell'edificio [9]. Queste sono influenzate dalla tipologia strutturale dell'edificio, dal suo stato di conservazione, nonché dalle condizioni di interazione con il terreno e dalle caratteristiche (tipo e grado di compattezza) di quest'ultimo.

La caratterizzazione della risposta di un edificio richiede, in generale, la valutazione dell'ampiezza di risposta, delle frequenze naturali dell'edificio e degli smorzamenti associati.

### **2.1. Norma UNI 9916**

La norma UNI 9916 fornisce una guida per la scelta delle metodologie appropriate per la misurazione, il trattamento dei dati e la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici. Essa identifica inoltre le possibili sorgenti di vibrazione ed i fattori che influenzano la risposta strutturale dell'edificio alle vibrazioni.

Le vibrazioni possono essere generate dall'esterno, trasmesse attraverso il terreno o causate da sovrappressioni d'aria (per esempio traffico aereo, vento, rombo di motori, etc.), ovvero dall'interno, dovute ad attività antropiche o ad azioni di macchinari. Si considerano vibrazioni di carattere sia transitorio che continuo. Sono presi in considerazione solo gli effetti diretti delle vibrazioni sugli edifici: altri effetti delle vibrazioni, quali il movimento di oggetti non fissati all'interno degli edifici, la possibilità di danni ad apparecchiature e gli effetti delle vibrazioni sugli occupanti non sono trattati nella norma.

La norma fornisce criteri e metodologie atti a valutare la potenzialità delle vibrazioni a causare danni di tipo architettonico e fornisce nell'Appendice D valori indicativi di riferimento, i quali non possono tuttavia essere considerati come limiti assoluti di accettabilità o non accettabilità.

La norma si applica, in generale, a tutte le tipologie di edifici di carattere abitativo, industriale e monumentale. Ciminiere, ponti e strutture sotterranee, quali gallerie e tubazioni, non vengono considerate. Effetti di vibrazioni generate da terremoti e da onde marine sono al di fuori del campo di interesse della norma.

Le raccomandazioni, fornite nella UNI 9916 sulla risposta strutturale degli edifici, si limitano agli effetti delle vibrazioni che possono comportare l'insorgere di "danno architettonico o di soglia", come per esempio fessurazione di intonaco, apertura di finestre già esistenti, rottura di vetri, etc.

Vi è da dire comunque che danni ad elementi strutturali di un edificio integro attribuiti a vibrazioni continuative sono estremamente rari, e comunque è necessario che le vibrazioni raggiungano livelli tali da causare prima fastidio e dolore agli occupanti l'edificio medesimo.

I valori e le metodologie semplificate riportati non sono generalmente applicabili ai casi di insorgenza di "danno maggiore", per il quale è necessario ricorrere a valutazioni ed approfondimenti specifici.

Svilupperemo successivamente la metodologia di analisi per la misura delle vibrazioni indotte da traffico veicolare.

## 2.2. Norma DIN 4150/3

Le norme tedesche DIN 4150/3 sono tra le più diffuse a livello internazionale e vengono menzionate anche nelle nostre norme UNI 9916. Affrontano il problema della sicurezza contro il danneggiamento strutturale e 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 tipologie strutturali, sono indicati in forma tabellare.

Per la valutazione delle vibrazioni sono determinanti le tensioni esistenti nell'opera edile. Esse devono essere determinate attraverso la misurazione ed il calcolo. Si riassumono i procedimenti possibili:

- 1) misurazioni della dilatazione delle parti edili oscillanti → determinazione delle tensioni (mediante la legge costitutiva dei materiali);
- 2) misurazioni delle vibrazioni → linee di deformazione e frequenza di vibrazione → forze di inerzia → sollecitazioni.

I valori delle tensioni ricavati vanno quindi raffrontati con quelli ammissibili previsti dalla normativa.

Tabella 2. Norma DIN 4150.

Classe del fabbricato	Tipo di fabbricato	Vel. amm. (mm/s)
I	Rovine, fabbricati danneggiati sotto il patrocinio dei beni culturali	2
II	Fabbricati con danni a vista, crepe nella muratura	4
III	Fabbricati senza danni in buono stato tecnico (anche con fessure nell'intonaco)	8
IV	Fabbricati ben realizzati	da 10 a 40

Molte informazioni relative ai danni causate alle strutture da vibrazioni sono state ottenute da quelli provocati da esplosioni, ed infatti la norma prevede anche una valutazione delle velocità ammissibili per quel che concerne le vibrazioni in seguito a processi di urto, in particolari scoppi.

I valori orientativi in tab. 2 valgono per vibrazioni da scoppio in ambito di frequenza da 8 ad 80 Hz, quando questo tipo di vibrazione si verifica una sola volta o di rado, cioè fino a due scoppi per giorno lavorativo; i valori orientativi vanno diminuiti fino ad  $1/2$  del loro valore, in caso di frequenze superiori ad 80 Hz.

### **2.3. Confronti fra norme**

Nel confronto tra le norme presentate si può evidenziare una diversa classificazione delle tipologie di appartenenza degli edifici e dei campi di frequenze individuati.

Particolare attenzione sembra meritare la norma svizzera che si differenzia dalle altre per l'inserimento del numero di sollecitazioni che colpiscono la struttura e quindi forniscono un ulteriore parametro di valutazione.

È interessante notare che se si considera la soglia di danno architettonico, tra le norme dei vari paesi esistono notevoli differenze nei valori massimi ammissibili per le strutture di elevato pregio artistico ed architettonico.

Ad esempio, la norma UNI 9916 riporta un valore di soglia di 3 mm/sec in fondazione e di 8 mm/sec in elevazione per frequenze inferiori ai 10 Hz, mentre le norme tedesche DIN 4150/3 fanno riferimento agli stessi valori di soglia, ma considerano come grandezza di misura la velocità istantanea, calcolata come radice quadrata della somma dei quadrati dei valori di velocità calcolati nelle tre direzioni. Le norme svizzere individuano invece una soglia di 1,5 mm/sec, in termini di velocità istantanea, se la classe di sollecitazione è di tipo permanente; altri autori [11] suggeriscono un valore massimo pari ad 1 mm/sec.

### **3. Metodologia di analisi**

- ***Gamma di frequenze caratteristiche***

Dipende dalla sorgente inquinante: per il traffico veicolare, le frequenze di interesse sono comprese tra 1 e 80 Hz.

- ***Metodi di misura***

- ***Grandezze da misurare***

La scelta delle grandezze da misurare dipende da:

- I. Durata e ampiezza della vibrazione;

II. Campo di frequenza di interesse;

II. Caratteristiche dimensionali dell'elemento strutturale di interesse.

Si prendono in considerazione grandezze di tipo cinematico (spostamento, velocità, accelerazione); in alcuni casi si effettuano misure di deformazione in elementi strutturali

➤ *Metodi di misura*

La scelta del metodo di misura dipende da:

I. Caratteristiche dell'edificio oggetto delle rilevazioni (dimensioni, tipologia strutturale)

II. Finalità delle rilevazioni.

➤ *Posizionamento e numero dei punti di misura*

Per verificare il livello di vibrazione alla base dell'edificio (p.es. in rapporto a valori di riferimento), la posizione di misura va scelta in corrispondenza della fondazione. Per edifici senza fondazioni, la misura va effettuata in corrispondenza del muro di sostegno esterno, ad una altezza inferiore a 0.5 m. I punti di misura sulle fondazioni vanno predisposti, se possibile, sul lato dell'edificio prossimo alla sorgente di vibrazioni (almeno 3 punti di misura).

Per ciascun punto devono essere misurate le vibrazioni sia in direzione verticale che in due direzioni orizzontali ortogonali, preferibilmente coincidenti con gli assi principali dell'edificio. Per edifici ad ampia superficie di base (dimensione di base maggiore di 20 m), le misure vanno eseguite simultaneamente in più punti (indicativamente 1 punto ogni 10 m).

➤ *Misura della risposta dell'edificio*

Per valutare l'ampiezza di vibrazioni in particolari parti strutturali dell'edificio, il posizionamento dei trasduttori deve essere effettuato direttamente sulle parti strutturali, nei punti di presumibile massima ampiezza del fenomeno vibratorio. I trasduttori sono accelerometri sismici di tipo piezoelettrico a componenti monoassiali con elettronica integrata e sono realizzati con un elemento piezoelettrico a forma di tronco di cono cavo. Questo sistema di realizzazione offre diversi vantaggi tra cui una spiccata affidabilità, e consente di ottenere alte sensibilità con dimensioni contenute. Gli accelerometri piezo-tronic integrano un convertitore carica/tensione e sono alimentati da una sorgente di corrente costante. Questi trasduttori hanno un'uscita in tensione a bassa impedenza e sono immuni dal rumore.

Il segnale rilevato dagli accelerometri è trasmesso in forma analogica (mediante la forza elettromotrice indotta) ad una scheda di acquisizione dati che, dopo aver amplificato il segnale, esegue una scansione dei canali in ingresso alla frequenza di campionamento stabilita per ogni canale. A questo punto, il segnale acquisito è sottoposto ad un ciclo di elaborazione che prevede per ogni canale:

- a) l'esecuzione della trasformata di Fourier;
- b) la successiva correzione secondo la curva di risposta dello strumento;
- c) l'integrazione e la derivazione nel dominio delle frequenze;
- d) la esecuzione della trasformata inversa per ricavare l'andamento temporale della accelerazione.

Nel ciclo di elaborazione vengono altresì utilizzati algoritmi di anti-aliasing e anti-leakage. I dati acquisiti sono, infine, memorizzati nella memoria di massa del personal computer.

Per edifici di altezza inferiore a 12 m (circa 4 piani), è sufficiente effettuare la misura alla fondazione e all'ultimo piano dell'edificio, sempre nelle tre direzioni ortogonali, con riferimento agli assi principali della struttura.

Per edifici di altezza superiore a 12 m, dovranno essere aggiunti punti di misura ai piani intermedi; le posizioni di misura devono essere scelte in corrispondenza degli elementi strutturali che determinano la rigidezza dell'edificio (solitamente 3 componenti di misura sugli angoli).

Se l'edificio ha più di 10 m di lunghezza, si devono effettuare misure ad intervalli orizzontali di circa 10 m.

In presenza di edifici dissimmetrici o sottoposti a carichi dissimmetrici devono essere previste posizioni di misura atte a rilevare modi di vibrare torsionali dell'edificio.

Punti di misura aggiuntivi possono essere previsti in funzione delle richieste degli occupanti o a seguito di rilevazioni preliminari.

Nel caso in cui le vibrazioni si mantengano con caratteristiche stazionarie per una durata sufficiente, è possibile utilizzare il medesimo trasduttore per effettuare misure in più posizioni, purché si conservi almeno un captatore di riferimento fisso, in corrispondenza alla fondazione.

#### ➤ *Criteri di fissaggio dei trasduttori*

Le modalità di fissaggio dei trasduttori dovranno consentire la fedele riproduzione del moto vibratorio dell'elemento al quale sono fissati, evitando alterazioni alla misura derivanti dal sistema di accoppiamento trasduttore-struttura. Il sistema di montaggio dovrà quindi essere quanto più leggero e rigido possibile.

#### ➤ *Fissaggio agli elementi strutturali*

Il fissaggio dei trasduttori deve essere effettuato in conformità alle indicazioni del costruttore, o per gli accelerometri, alla ISO 5348. Le modalità di fissaggio devono essere indicate nel rapporto di prova.

Il fissaggio diretto del captatore è sempre preferibile. Sono ammessi il montaggio

meccanico con vite, l'incollaggio con resine ad essiccazione rapida ed il fissaggio magnetico. Dovrebbero, se possibile, essere evitate le misure su rivestimenti.

Gli strumenti di misura non devono essere fissati vicino o in corrispondenza di elementi strutturali quali fessure di grossa entità, punti di infiltrazione di acqua, porte di ventilazione, e così via, a meno che non si debbano misurare le vibrazioni proprio in quei punti.

➤ *Fissaggio al terreno*

È opportuno assicurare un contatto stretto trasduttore e terreno. Nel caso di accelerazioni  $> 1\text{m/s}^2$ , è necessario un collegamento fisso al terreno per prevenire slittamenti.

Quando i trasduttori devono essere montati nel terreno, vanno interrati ad una profondità  $> 0 = 3$  volte la dimensione principale del sistema captatore-elemento di fissaggio.

La misura delle vibrazioni, effettuata alla superficie del terreno, al fine di valutare le vibrazioni delle fondazioni dell'edificio è da evitare, a meno che non si conosca la funzione di trasferimento del terreno.

#### **4. Analisi dinamica sperimentale**

Tra le eccitazioni ambientali quella da traffico veicolare è risultata quella più appropriata al fine del monitoraggio strutturale, in quanto oltre ad essere tra le più comuni e diffuse all'interno delle nostre città, provoca vibrazioni al piede di una costruzione facilmente misurabili.

Negli ultimi anni è stata sviluppata una metodologia di analisi strutturale basata su monitoraggio, inteso come sperimentazione non invasiva di edifici "reali", finalizzata alla determinazione di specifiche risposte strutturali, e alla identificazione strutturale adottata, per definire la distribuzione delle caratteristiche elastiche. Il soddisfacimento di tali esigenze nel caso di edifici già realizzati soprattutto se datati, all'atto pratico può incappare nell'ostacolo costituito dall'impossibilità di pervenire ad una completa conoscenza sia dell'organismo strutturale (in termini di geometria, tecniche costruttive, caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti, etc.), sia dell'effettivo stato di conservazione di ogni suo componente. Un livello di conoscenza del tutto esauriente sarebbe infatti conseguibile soltanto applicando estensivamente metodi di indagine tali da indurre pesanti disturbi al manufatto analizzato. Da queste considerazioni parte l'idea della costruzione di un sistema elementare di cui siano note tutte le caratteristiche geometriche, meccaniche che possa coprire l'intervallo di frequenze tra 1 e 20 Hz.

L'idea è quella di realizzare un modellino da portare in sito, vicino alla sorgente vibratoria, eccitandolo quindi senza operazioni di filtraggio che sarebbero inevitabili in laboratorio (in considerazione del fatto che ogni strumento ha la propria funzione di trasferimento). Il modellino deve essere trasportabile, quindi avere delle dimensioni limitate e un peso non eccessivo. Inoltre deve essere posizionato vicino alla sorgente senza arrecare disturbo alla circolazione dei veicoli e al monumento analizzato. Altro vincolo di tipo ambientale è costituito dall'impossibilità di utilizzare la base d'appoggio (marciapiedi, vicoli, etc.) per la creazione di un sistema che renda le parti solidali.

#### 4.1. Costruzione del modello con MSC.visualNastran

Il sistema realizzato è un oscillatore elementare formato da un'asta in alluminio di dimensioni (0,6 x 7 x 120 cm) ed ha una massa in acciaio di dimensioni (4 x 20 x 16 cm) e massa pari a 10 kg, che può scorrere per tutta l'altezza dell'asta, fissata alle diverse quote attraverso bulloni. L'asta quindi è stata incastrata al piede ad un blocchetto di calcestruzzo di dimensioni (40 x 40 x 15 cm). Il peso complessivo del sistema è stato contenuto in kg 80. In tab. 3 sono evidenziate le proprietà dinamiche del modellino per le diverse quote del baricentro della massa in acciaio, considerando la trave incastrata ad un vincolo fisso.

In realtà l'asta di alluminio (fig. 2) sarà incastrata al blocchetto di calcestruzzo (che avrà una armatura minima), ma quest'ultimo non è un vincolo fisso. Infatti, la necessità di non arrecare disturbo all'ambiente circostante limita il vincolo ad un semplice appog-

Tabella 3. Proprietà dinamiche del modello.

<i>Quota del baricentro della massa rispetto alla base in calcestruzzo</i>	<i>Pulsazione naturale o angolare del sistema</i>	<i>Periodo del sistema</i>	<i>Frequenza</i>
$h = 112.5$ cm	$W_0 = 13.47$ rad/sec	$T = 0.466$ sec	$f = 2.14$ Hz
$h = 97.5$ cm	$W_0 = 16.51$ rad/sec	$T = 0.380$ sec	$f = 2.63$ Hz
$h = 82.5$ cm	$W_0 = 21.35$ rad/sec	$T = 0.295$ sec	$f = 3.4$ Hz
$h = 67.5$ cm	$W_0 = 28.70$ rad/sec	$T = 0.218$ sec	$f = 4.58$ Hz
$h = 52.5$ cm	$W_0 = 42.01$ rad/sec	$T = 0.149$ sec	$f = 6.68$ Hz
$h = 37.5$ cm	$W_0 = 69.65$ rad/sec	$T = 0.09$ sec	$f = 11.09$ Hz
$h = 22.5$ cm	$W_0 = 149.9$ rad/sec	$T = 0.041$ sec	$f = 23.86$ Hz

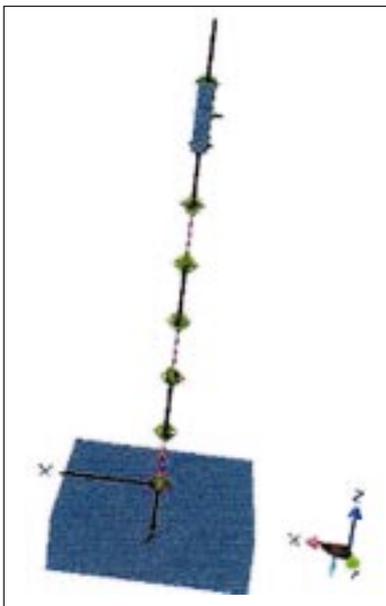


Figura 2. Modello ricevitore ideale.

gio ad attrito tra le superfici a contatto. Per verificare i valori teorici ottenuti e valutare se effettivamente il sistema sotto l'azione del traffico veicolare conservi le proprie caratteristiche, abbiamo simulato il comportamento dinamico del sistema utilizzando il programma di calcolo MSC.visual Nastran.

Quest'ultimo utilizzato principalmente in ingegneria meccanica permette una ottima visualizzazione del comportamento dinamico del sistema sia in termini di spostamenti che di sollecitazione. Inoltre la semplicità dei comandi unita alla possibilità di importare dati e immagini da altri programmi (Autocad, Acrobat), ne fanno un valido strumento anche in campo strutturale.

Due studiosi, Paul Mitiguy e Arun K. Banerjee, in una loro relazione (riportata integralmente in

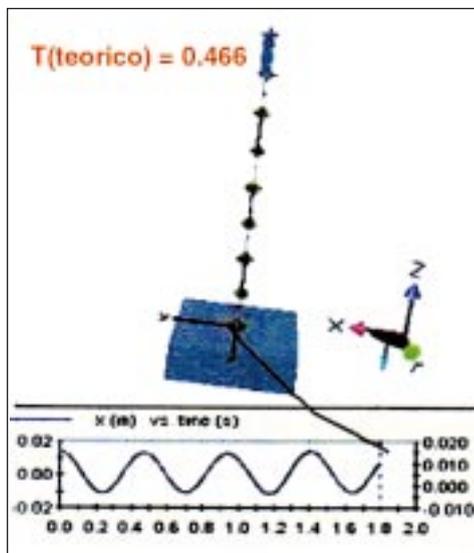


Figura 3. Determinazione della frequenza del sistema per altezza della massa  $hM = 112.5$  cm.

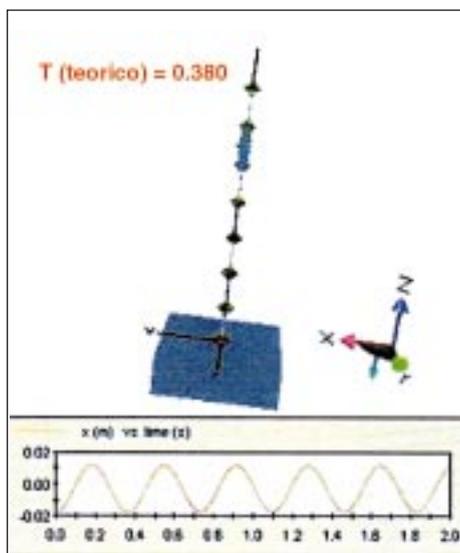


Figura 4. Determinazione della frequenza del sistema per  $hM = 97.5$  cm.

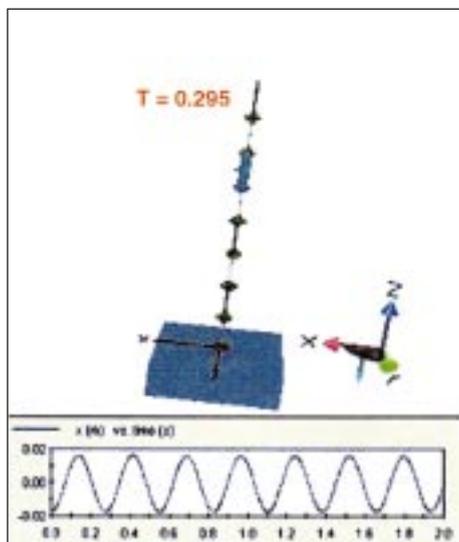


Figura 5. Determinazione della frequenza del sistema per  $hM = 82.5$  cm.

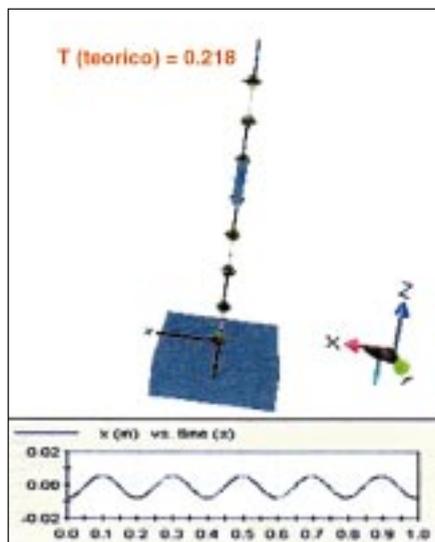


Figura 6. Determinazione della frequenza del sistema per  $hM = 67.5$  cm.

appendice) delineano un metodo di modellazione di una trave in campo elastico con l'utilizzo di MSC.VisualNastran.

La trave viene considerata come un insieme di corpi rigidi legati da molle elastiche: una estensionale, due flessionali, ed una torcente.

Vengono indicati i metodi di calcolo delle costanti elastiche che dipendono dal numero di elementi rigidi in cui si è discretizzata la trave, nel nostro caso otto elementi rigidi, ciascuno della lunghezza di 15 cm.

Allontanando la massa dalla posizione di equilibrio statico e imprimendo uno spostamento lungo la direzione  $x$ , si è determinata la frequenza naturale del sistema. Questa è risultata essere coincidente alla frequenza teorica del sistema per le diverse altezze della massa ( $hM$ ) in acciaio, come si può vedere dalle figg. 3-6, dove è immediato notare dal diagramma degli spostamenti la coincidenza tra il periodo  $T$  (teorico) e quello ottenuto dalla simulazione.

#### 4.2. Simulazione del comportamento dinamico

Il moto di un sistema soggetto ad una accelerazione impressa ai vincoli può essere ricondotto allo studio di un sistema fisso alla base, soggetto ad un carico pari all'accelerazione del suolo per la massa.

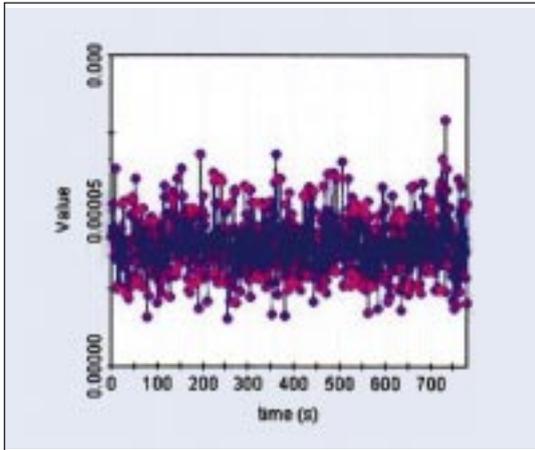


Figura 7. Storia temporale accelerazione.

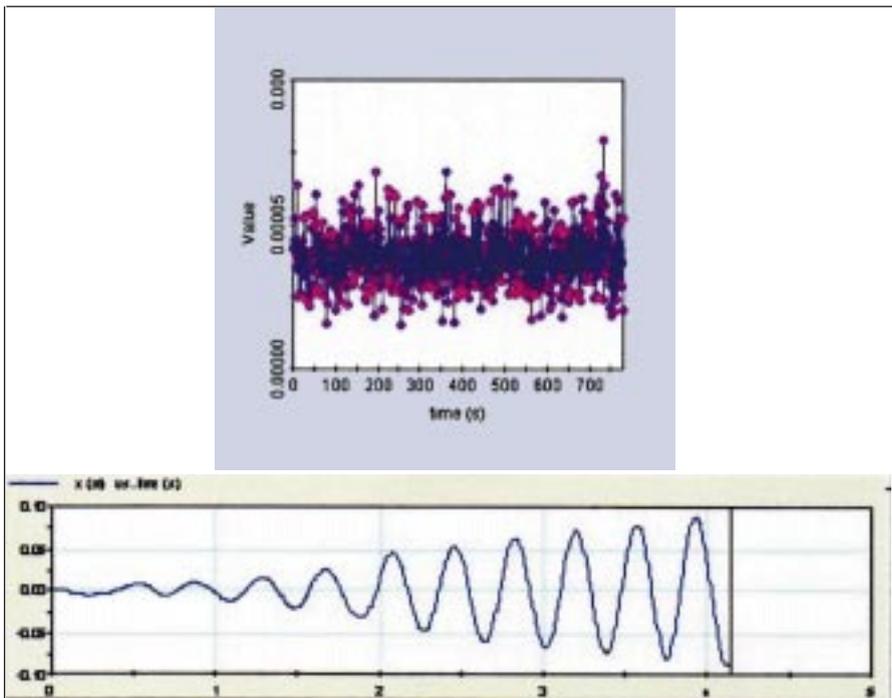


Figura 8. Simulazione degli spostamenti del sistema forzato da traffico veicolare.

Prendiamo quindi in esame come forzante la registrazione delle accelerazioni indotte dal traffico veicolare e precisamente quelle misurate al punto 4 in direzione ortogonale alla parete perimetrale.

Si è fatto riferimento a 5 minuti di registrazione (fig. 7) in cui erano presenti picchi di accelerazione dovuti al passaggio di mezzi pesanti.

Si può evidenziare (fig. 8) una prima fase in cui le accelerazioni hanno una intensità medio-bassa e il contenuto in frequenza piuttosto alto che provocano piccoli spostamenti del sistema.

In una seconda fase le ampiezze crescono sensibilmente, in corrispondenza del passaggio di veicoli pesanti in cui si nota anche un abbassamento del contenuto in frequenza, quindi un avvicinamento alla frequenza del sistema.

Si è quindi eccitato il sistema con una forzante sinusoidale con frequenza propria coincidente a quella naturale del sistema. La visualizzazione grafica (fig. 9) del compor-

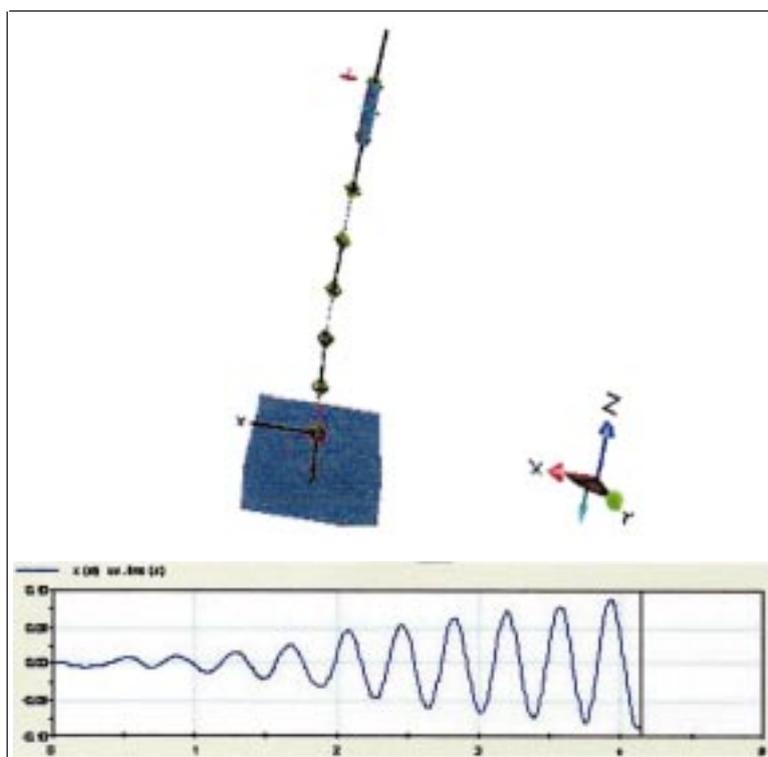


Figura 9. Simulazione degli spostamenti del sistema a risonanza.

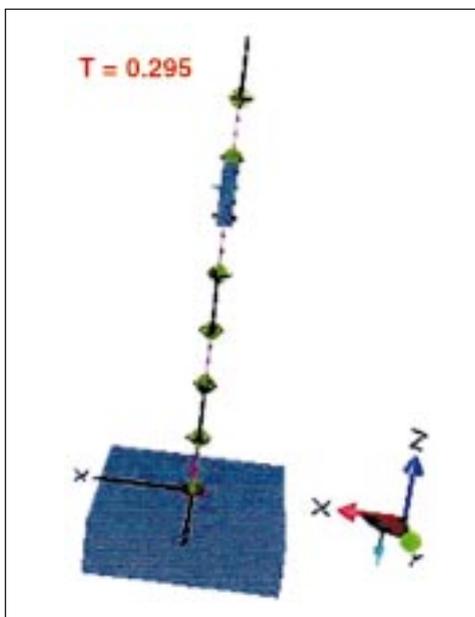


Figura 10. Comportamento dinamico con altezza della massa  $h_M = 82.5$  cm.

tamento dinamico del sistema a risonanza, evidenza come tale fenomeno sia particolarmente insidioso nei problemi dinamici. La risposta del sistema è caratterizzata da grandi spostamenti, i quali non hanno comunque causato variazioni ai vincoli.

In questo intervallo notiamo spostamenti dell'ordine di qualche centimetro, di gran lunga superiori a quelli iniziali.

Infine riportiamo (fig. 10) i risultati del comportamento dinamico del modellino ponendo il baricentro della massa alla quota  $h = 82.5$  cm. È ovvio che il sistema risulti più rigido del precedente, e che contestualmente la frequenza aumenti. Dal diagramma degli spostamenti si evince una amplificazione della risposta causata dall'avvicinamento della frequenza naturale a quella della forzante.

### Bibliografia

- [1] LOSA M. 2000, *Vibrazioni indotte dal traffico: valutazione dei parametri dinamici degli strati della pavimentazione mediante prove deflettometriche*, XX Congresso S.I.I.V., Catania, 26-28 ottobre.
- [2] DOMENICHINI L., FERRO R., LA TORRE F. 1999, *Vibration produced by road traffic: influence of road surface characteristics*, International Symposium on Environmental impact of Road Unevenness, Porto.

- [3] D'APUZZO M. 2000, *Una metodologia per il calcolo delle vibrazioni trasmesse al sottofondo stradale dal traffico veicolare*, Tesi di Dottorato Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti – Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi “Federico II”, Napoli.
- [4] CASTELLANI A. 1989, *Vibrazioni prodotte da linee ferroviarie metropolitane*, Atti della Conferenza di Geotecnica, XVI Ciclo “Comportamento dei terreni e delle fondazioni in campo dinamico”, Torino.
- [5] ABRUZZESE D., AA.VV. 2002, *Comportamento dinamico di torri in muratura attraverso misurazioni di vibrazioni ambientali*, XXXII Convegno Nazionale AIAS (Associazione italiana per l'analisi delle sollecitazioni), Salerno, 3-6 settembre 2003.
- [6] LAGOMARSINO S., CAVICCHI A., PENNA A. 2001, *Structural identification by dynamic testing: the example of the building n. 4 of the Fivizzano hospital*, Desing and refitting of hospitals in seismic areas, Firenze, 21-22 ottobre 1999.
- [7] CRISPINO M., D'APUZZO M. 2001, *Analisi di errori nel rilievo del profilo stradale tramite profilometri con ruota di misura*, Milano, STRADE&AUTOSTRADE, gennaio-febbraio.
- [8] CESTELLI GUIDI C. 2000, *Geotecnica e tecnica delle fondazioni*, 1° e 2° volume, Milano, Hoepli.
- [9] MATERAZZI A.L. 2001, *Effetti delle vibrazioni di origine ambientale sulle costruzioni civili*, *Workshop: Problemi di vibrazioni nelle strutture civili e nelle costruzioni meccaniche*, Perugia, 12 ottobre.
- [10] PISANI R. 2000, *Origine, propagazione e modelli previsionali delle vibrazioni dei mezzi di trasporto*, Convegno Nazionale Traffico e Ambiente, Trento.
- [11] BLONDE et al. 1998, *Vibration produced by road traffic*, Quaderno AIPCR, Comitato Nazionale Italiano, Verona, 18/21 maggio 1998.

## Riassunto

Negli ultimi anni, il continuo aumento della domanda di trasporto su gomma e su rotaia, legato al processo di sviluppo economico e sociale, ha dato luogo al fenomeno delle vibrazioni indotte dai mezzi di trasporto sollecitando la sensibilità delle popolazioni residenti e l'attenzione dei tecnici.

Nei centri storici delle città si possono individuare una serie di fattori concomitanti che tendono ad amplificare ulteriormente tale fenomeno:

- le sovrastrutture stradali maggiormente utilizzate nei centri storici sono spesso di tipo lapideo ed il loro impiego è dettato da motivi prevalentemente estetici;
- il non dimensionamento o la mancanza di manutenzione sono spesso causa di elevati livelli di irregolarità;
- gli edifici presenti nei centri storici presentano carattere storico-artistico di primaria importanza e parti di essi (mosaici, affreschi, etc.) sono sensibili alle vibrazioni essendo aderenti alle pareti perimetrali.

In funzione di quanto sopra, il rumore e le vibrazioni indotte dal traffico veicolare assumono sempre di più i connotati di una fra le principali cause di impatto ambientale.

## Summary

During the last years, the constant increase of the request for transport by road and by rail, connected to the economic and social development process, has provoked the birth of the phenomenon

of the vibrations induced by the means of transports, with the result of stimulating the resident population's curiosity and the technical personnel's interest.

Into the historic centres of the towns, it is possible to trace a series of concomitant factors that tend further to increase this process:

- the road superstructure mostly used in the historical centres are often stony, and their usage is due mainly to aesthetic reasons;
- the no-measurement or the lack of maintenance are often the causes of high levels of roughness;
- the buildings set into the historical centres have got a historical-art value of primary importance and some parts of them (such as mosaics, pictures, etc.) are very sensitive to vibrations, being sticking to the outside walls;

According to what said above, the noisy and vibrations provoked by the road traffic are becoming even more one of the main cause of the environmental damage.

### Résumé

Dans les dernières années, l'augmentation continue de la demande de transport routier et par chemin de fer, liée au procès de développement économique et social, a donné lieu au phénomène des vibrations déterminées par des moyens de transport sollicitant la sensibilité des populations résidentes et l'attention des techniciens.

Dans les centres historiques des villes, on peut localiser une série de facteurs concomitants qui tendent à amplifier ultérieurement ce phénomène:

- les superstructures routières les plus utilisées dans les centres historiques sont souvent de type en pierre et leur emploi est dicté par des motifs essentiellement esthétiques;
- le non dimensionnement ou le manque d'entretien sont souvent cause de niveaux élevés d'irrégularité;
- les édifices présents dans les centres historiques présentent un caractère historico-artistique de primaire importance et une partie de ceux-ci (mosaïques, fresques, etc.) sont sensibles aux vibrations étant collants aux murs extérieurs.

En fonction de ce qui a été dit plus haut, le bruit et les vibrations déterminées par le trafic véhiculaire assument toujours plus les connotations d'une des principales causes d'impact de l'environnement.

### Zusammenfassung

Während den letzten Jahren hat die wachsende, durch die wirtschaftlich-gesellschaftliche Entwicklung geforderte Nachfrage nach Transport auf Reifen und Bahn das Phänomen der Vibrationen verursacht, die mit Verkehrsmitteln verbunden sind. Diese Lage hat die Empfindlichkeit der Befehlkehrung und das Interesse der Fachleute wiedererweckt.

In den Altstädten kann man sich von einer ganzen Reihe von Faktoren anmerken, die dieses Phänomen maßgeblich erweitern:

- Die am meisten benutzten Strassen in den Altstädten sind oft mit Steinen bedeckt, die nur aus Optischen Gründen gewählt wurden;
- Wegen Diskrepanz der Dimensionen oder fehlender Wartung werden oft hohe Niveaus der Unregelmäßigkeit hier erläutert;
- Die Gebäude der Altstädte sind hochbedeutende kunsthistorische Werke und ihre Teile (Mosaiken, Fresken, usw.) sind vibrationsempfindlich, da sie an die Äußermauer liegen.

Schlussfolgerung der obigen Analyse ist, dass der Lärm und die verkehrverbundene Vibrationen immer mehr zu den Hauptursache der Umweltbeschädigung gehören.

### Resumen

En los últimos años, el continuo aumento de la demanda de transportes por carretera y ferrocarril, ligado al proceso de desarrollo económico y social, ha dado lugar al fenómeno de las vibraciones

generadas por los medios de transporte, que despierta a la sensibilidad de las poblaciones afectadas y la atención de los técnicos.

En los cascos antiguos de las ciudades, pueden identificarse una serie de factores concomitantes que tienden a amplificar aún más el fenómeno:

- las superestructuras viales más utilizadas en los cascos antiguos generalmente son de tipo lapídeo y su empleo obedece a razones primordialmente estéticas;
- unas proporciones inadecuadas o la falta de mantenimiento son a menudo causa de altos niveles de irregularidad;
- los edificios de los cascos antiguos poseen un carácter histórico-artístico de primaria importancia, y algunas partes de los mismos (mosaicos, frescos, etc.) son sensibles a las vibraciones, ya que están adheridos a las paredes del perímetro.

En función de todo ello, el ruido y las vibraciones inducidas por el tráfico de vehículos asumen cada vez más las connotaciones de una de las principales causas de impacto medio-ambiental.

### **Резюме**

В последние годы, постоянно растущий спрос на транспортные и железнодорожные перевозки, в связи с экономическим и социальным развитием, породил феномен вибраций, происходящих от транспортных средств. Это вызвало негодование местных жителей и привлекло внимание техников. В различных местах исторического центра города можно выявить ряд сопутствующих факторов, которые приводят к дальнейшему усугублению этого феномена:

- дорожные надстройки, особенно используемые в городском центре, часто сделаны из камня, и их применение вызвано, по большей части, эстетическими соображениями;
- не соблюдение параметров, или недостаточное техническое обслуживание являются нередко причинами частых нарушений;
- здания, расположенные в центре города, имеют первостепенную художественно-историческую ценность, и их части (мозаики, фрески и т.д.) чувствительны к вибрациям, так как расположены на наружных стенах.

С учетом вышеназванного, шум и вибрации, происходящие от транспортного движения, играют все большую роль среди главных причин разрушения окружающей среды.