

*Centro Internazionale di
Aggiornamento Sperimentale-Scientifico*



Settimo Martinello

EFFETTI DELLE VIBRAZIONI SULLE COSTRUZIONI



APPUNTI CIAS N° 1
edizione 1997

*Centro Internazionale di
Aggiornamento Sperimentale-Scientifico*



Settimo Martinello

**EFFETTI DELLE VIBRAZIONI
SULLE COSTRUZIONI**

APPUNTI CIAS N° 1
edizione 1997

INDICE

INTRODUZIONE	pag. 5
1. TRASMISSIONE DELL'ONDA DI SOLLECITAZIONE DINAMICA	pag. 7
1.1 Trasmissione dell'onda nel suolo	
1.2 Trasmissione lungo le strutture	
2. VIBRAZIONI INDOTTE SUGLI EDIFICI	pag. 12
2.1 Caratteristiche delle vibrazioni	
2.2 Criteri di valutazione della pericolosità delle vibrazioni	
2.3 Cautele e rimedi	
2.4 Fenomeni di risonanza (campanili e strutture precomprese)	
2.5 Traffico veicolare o su rotaia	
3. MISURA DELLE VIBRAZIONI	pag. 23
3.1 Caratteristiche delle strumentazioni	
3.2 Punti di rilevazione	
4. VALUTAZIONE DEL DISTURBO SULLE PERSONE	pag. 27
4.1 Misura delle vibrazioni	
4.2 Criteri di valutazione	
CONCLUSIONI	
BIBLIOGRAFIA	
5. ESEMPI PRATICI	
5.1 Analisi delle vibrazioni indotte da macchinari industriali.	
5.1.1 Sul capannone stesso (stabilimento della Ferrari a Maranello).	
5.1.2 Su strutture attigue (officina meccanica a Nichelino TO).	
5.1.3 Su edificio civile attiguo (fonderia vicino a Cuneo).	
5.2 Analisi delle vibrazioni prodotte dal traffico.	
5.2.1 Su edificio attiguo a strada statale (VR).	
5.2.3 Su muri Romani (Roma).	
5.3 Studio del comportamento di un campanile durante il suono delle campane.	
5.3.1 Campanile di Spinea (VE).	
5.3.2 Campanile di Seregno (MI).	
5.4 Pali battuti. Valutazione degli effetti dinamici su edifici attigui ad un cantiere durante l'infissione di pali (Oristano).	
5.5 Uso di esplosivo. Studio degli effetti dinamici su due edifici attigui ad un cantiere di scavo. Calibrazione delle esplosioni.	
5.6 Caratterizzazione dinamica per il collaudo di strutture edili.	
5.6.1 Diagnosi dei tralicci della illuminazione dello stadio di Mantova.	
5.6.2 Collaudo di torre piezometrica a Reggio Emilia.	
5.6.3 Collaudo di capriata metallica attraverso simulazione dinamica su modello teorico agli elementi finiti.	
5.7 Studio del disturbo vibrazionale sul personale della torre di controllo Linate.	
5.8 Studio dell'effetto delle accelerazioni prodotte sull'individuo durante la corsa su una montagna russa (S. Cruz California)	

Nota: il capitolo 5 non è presente nella memoria, gli eventuali interessati potranno fare specifica richiesta all'autore.



- Dott. Ing. Settimo Martinello, nato a Bressanone (BZ) nel 1954.
- Direttore Generale della 4 EMME Service S.p.A..
- Presidente del CIAS dal 1991.

INTRODUZIONE

Le vibrazioni possono produrre sulle strutture degli edifici notevoli danni tanto da creare situazioni di instabilità.

La continuità delle vibrazioni può inoltre danneggiare apparecchiature elettroniche con le conseguenze e disfunzioni facilmente immaginabili.

Non va per altro trascurata, in queste circostanze, la sensazione di disagio vissuta dalla popolazione che vive gli edifici stessi, soprattutto nelle ore notturne, anche quando l'intensità delle vibrazioni non è elevata.

Queste prime considerazioni mettono in luce l'importanza dello studio delle cause, delle metodologie di rilevazione, dei criteri di assorbimento e di attenuazione delle vibrazioni.

Tante sono le cause che possono indurre vibrazioni, tra le più frequenti possiamo distinguere:

- **vibrazioni indotte da forze impulsive prodotte da macchinari industriali;**
- **vibrazioni prodotte nelle operazioni di cantiere,**
 - da macchinari durante le fasi di scavo,
 - dall'uso di esplosivo,
 - durante l'infissione di pali;
- **vibrazioni prodotte dal traffico o dal passaggio dei treni.**

Tutte queste cause possono produrre danni agli edifici adiacenti attraverso la trasmissione degli impulsi lungo il terreno o attraverso le strutture portanti.

Ci sono inoltre situazioni particolari di forze impulsive interne agli edifici.

Uno di questi è il caso dei campanili, dove il ritmo del suono delle campane può essere in risonanza con la struttura, provocando lesioni tali da mettere a repentaglio la stabilità.

Va tenuto presente che la pericolosità di una vibrazione dipende da tre fattori fondamentali :

- **il mezzo di trasmissione;**
- **la tipologia della struttura;**
- **l'energia espressa dalla forza pulsante.**

Queste prime puntualizzazioni mettono in luce l'importanza della comprensione dei modi con cui un'onda di sollecitazione si trasmette.

È per questo che affronteremo innanzitutto il modo con cui viene trasmessa la sollecitazione attraverso il suolo e/o le strutture, per poi analizzarne gli effetti e la pericolosità.

Nel paragrafo 2 verrà esposto un criterio di valutazione della pericolosità basato sui dati sperimentali rilevati.

Nello stesso paragrafo verrà evidenziato il fenomeno della risonanza sia sui campanili che sulle strutture in calcestruzzo.

Un accenno verrà dato ai fenomeni vibratorii dovuti al traffico veicolare e su rotaia.

Nel terzo paragrafo illustreremo la metodologia per l'acquisizione in sito delle caratteristiche di una forza impulsiva e del suo effetto, facendo specifici accenni agli strumenti, ai sensori ed alle tecniche di elaborazione dei dati acquisiti.

Verrà infine data un'indicazione sul criterio di valutazione del disturbo prodotto dalle vibrazioni sul corpo umano.

Scopo di questa memoria è quello di fornire delle informazioni generali sulle metodologie di indagine sperimentale e sull'interpretazione delle rilevazioni, tanto da consentire al profano di entrare nella materia percependone l'importanza e le possibilità.

1. TRASMISSIONE DELL'ONDA DI SOLLECITAZIONE DINAMICA

1.1 Trasmissione dell'onda nel suolo

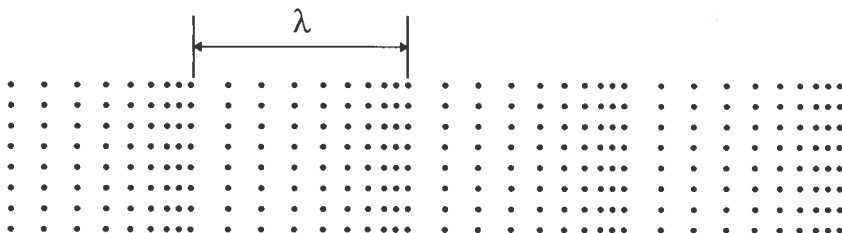
L'onda di sollecitazione nel suolo può essere analizzata in superficie come un micro spostamento, una velocità o un'accelerazione.

In generale possiamo schematizzare i modi di trasmettere sollecitazioni meccaniche nel suolo con tre tipi diversi di onde:

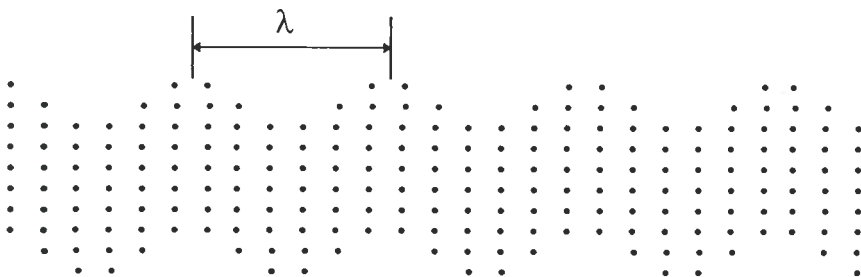
- onde di compressione;
- onde di taglio;
- onde di superficie.

Le prime due percorrono il suolo in tutte le direzioni a partire dalla sorgente, mentre la terza si sviluppa in superficie attraverso un vero e proprio andamento sussultorio di tipo sinusoidale.

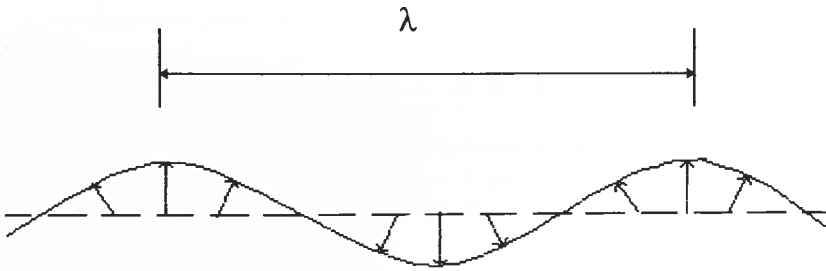
Le figure 1a , 1b, 1c, ne mostrano una schematizzazione grafica.



1a) onda di compressione



1b) onda di taglio



1c) onda di superficie

L'onda di sollecitazione è caratterizzata dalla lunghezza λ e dalla velocità di propagazione C .

Le funzioni fondamentali che governano questi parametri sono le seguenti:

$$C = f \cdot \lambda$$

dove :

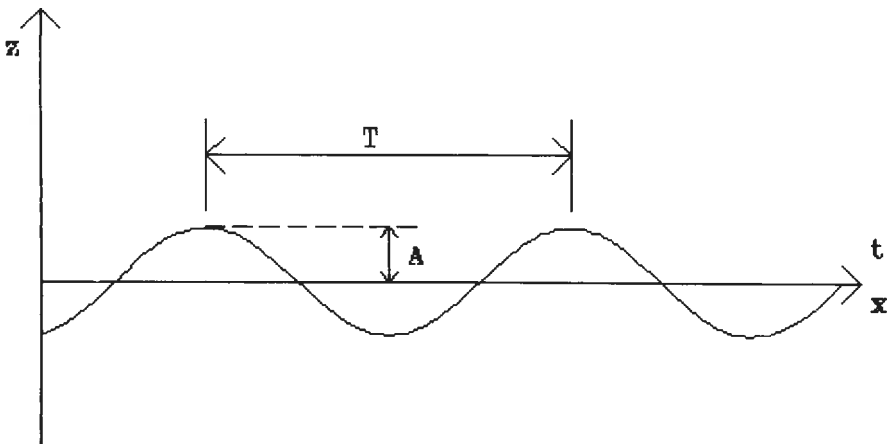
$$f = 1 / T$$

C = velocità di propagazione (m/s^2);

f = frequenza (Hz);

$$T = X / C$$

λ = lunghezza d'onda (m).



Le funzioni che governano la velocità di propagazione in un mezzo perfettamente isotropo sono:

$$C_c = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$$

$$C_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho (1 + \nu)}}$$

$$C_s = C_t \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu}$$

con:

E = modulo elastico;

ν = coefficiente di Poisson;

ρ = densità.

I pedici c , t , s , indicano rispettivamente la velocità di propagazione dell'onda di compressione, taglio, superficie.

Per quanto riguarda il terreno la velocità di propagazione superficiale varia in un campo tra 60 e 150 m/s. Per confronto si pensi che nel calcestruzzo la velocità di propagazione di un'onda di compressione varia tra i 3.500 ed i 4.500 m/s e nel l'acciaio è di circa 5.000 m/s.

L'onda di compressione si propaga in forma semisferica in tutte le direzioni a partire dal punto di eccitazione.

L'energia trasmessa ad un oggetto posto a distanza r dalla sorgente è inversamente proporzionale a r^2 . Nel caso semplice di una eccitazione con forma d'onda armonica, contenente una sola frequenza di spicco, l'energia dell'onda trasmessa è proporzionale all'area sottesa all'ampiezza. La stessa ampiezza è inversamente proporzionale alla distanza r .

Dalla figura 2 vediamo come le onde di superficie si muovono su un'area circolare a contatto con l'aria. Pertanto è facile comprendere perché si attenua di meno rispetto a quelle di compressione e taglio.

In un mezzo isotropo l'energia sviluppata da un impulso verticale si trasmette per il:

- 67 % come onda superficiale, per il
- 26 % come onda di taglio e per il
- 7 % si propaga come onda di compressione.

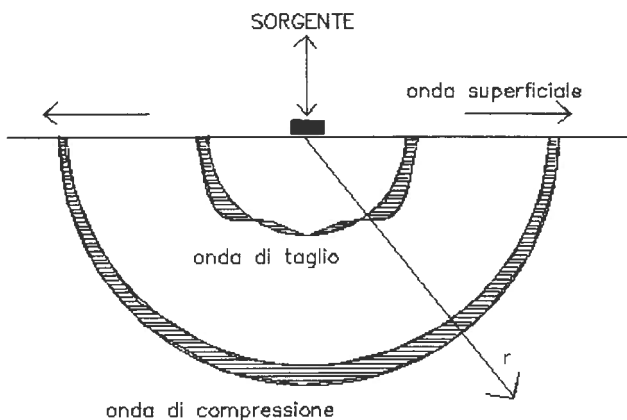


Figura 2. L'andamento delle onde di sollecitazione su una sezione verticale.

Da questi dati si comprende che è l'onda di superficie quella che va maggiormente ad interessare le fondazioni di edifici posti nella vicinanza di una forza impulsiva.

È chiaro che nella realtà di un terreno, di certo non isotropo, contenente elementi disomogenei, come sassi ed acqua, la distribuzione e propagazione dell'energia emanata da una sorgente, è diversa da quella descritta nel modello.

Va detto comunque che le indicazioni fornite rappresentano una distribuzione tendenziale anche nel caso reale.

Vanno fatte alcune considerazioni in merito alla frequenza.

Innanzitutto va sottolineato che esiste un legame diretto tra la frequenza e la velocità di propagazione; questo legame è definito dalla **dispersione**.

Si può dimostrare come un'onda di superficie, nella sua propagazione, non mantiene la stessa forma. Inoltre, si può osservare che un'onda ad alta frequenza si propaga più velocemente di una a bassa frequenza.

Come ordine di grandezza si consideri che le frequenze di un'onda superficiale, in un terreno medio, variano tra i 5 ed i 35 Hz, e che le ampiezze delle accelerazioni prodotte possono raggiungere i 5 m/s^2 e si attenuano, disperdendosi nel suolo, fino a diventare inefficaci per valori di 0.02 m/s^2 .

Questi due limiti possono ottenersi, per una distanza tra sorgente e soggetto in esame, tra i 40 e 80 m.

1.2 Trasmissione lungo le strutture

Intendiamo con questo paragrafo analizzare quelle onde di sollecitazione dinamiche che si propagano tra mezzi solidi, o meglio direttamente attraverso le strutture di un edificio, all'interno del quale è posta la sorgente della forza pulsante.

Caso frequente è quello di macchine industriali che per processi di lavorazione producono forze impulsive, come le presse o macchine da taglio, e ogni qual volta il moto rotativo di un motore viene trasformato in moto alternativo.

Altro caso tipico è quello dei campanili dove la forza centrifuga prodotta dalla oscillazione delle campane si scarica, a notevole altezza, producendo momenti di segno opposto.

In tutti questi casi l'onda di sollecitazione dinamica ha frequenze pari a quelle impulsive.

L'entità dell'ampiezza dell'onda indotta è inversamente proporzionale alla massa delle strutture lungo il percorso dell'onda.

L'energia trasmessa tende ad attenuarsi per effetto smorzante di alcune parti elastiche e per il **lavoro** prodotto nella vibrazione forzata delle strutture di trasporto dell'onda.

Queste forze impulsive possono diventare estremamente pericolose quando la frequenza della forza pulsante si avvicina alla frequenza propria della struttura o ad un suo sottomultiplo. In queste circostanze la struttura entra in risonanza, o sottononanza, e l'ampiezza della vibrazione indotta aumenta notevolmente.

2. VIBRAZIONE INDOTTE SUGLI EDIFICI

2.1 Caratteristiche delle vibrazioni

Come evidenziato nei paragrafi precedenti, le strutture possono essere sollecitate dinamicamente sia dall'interno che dall'esterno.

In ognuno dei due casi bisognerà valutare se l'eccitazione può danneggiare le strutture o parte di esse.

Analizziamo per ora il caso di forze **esterne**, per poi cercare le similitudini nel caso di forze impulsive interne.

Abbiamo visto che gli edifici vengono sollecitati attraverso onde superficiali che interagiscono con le fondazioni.

La figura 3 ci mostra schematicamente il trasferimento delle forze meccaniche da suolo a fondazioni.

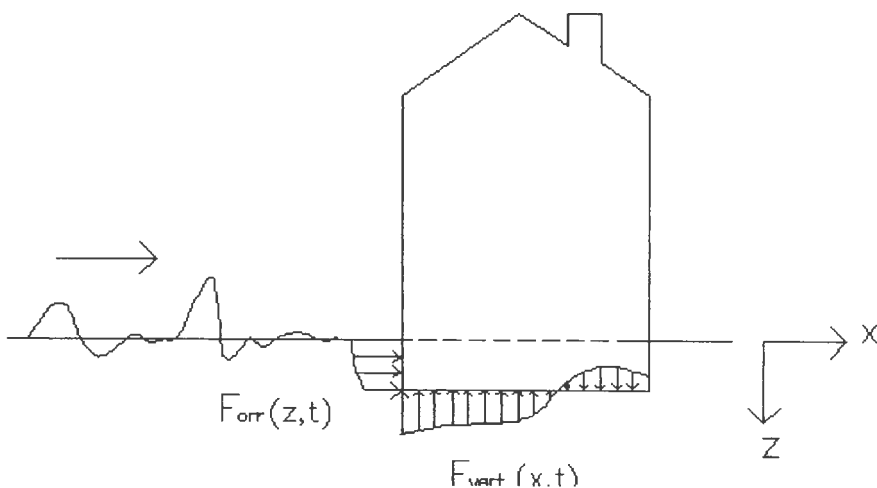


Figura 3. Indicazione schematica delle forze indotte alle fondazioni di un edificio dalle onde di sollecitazione superficiali.

Come accennato precedentemente, nell'analisi degli effetti delle vibrazioni su un edificio, particolare importanza è assunta dal materiale costituente, dalle caratteristiche dinamiche proprie delle singole strutture, dalla tipologia dell'edificio nel suo insieme, dalle fondazioni e dal terreno circostante.

Le onde di sollecitazione, dal punto di vista della pericolosità, possono essere identificate attraverso due soli parametri, **frequenza** ed **ampiezza**, in quanto la velocità e gli spostamenti possono da questi essere ricavati.

È molto difficile determinare un limite di frequenza ed ampiezza che possa essere considerata dannosa per una struttura, non esistono pertanto limiti netti, possiamo però individuare dei campi di pericolosità su cui basarsi.

Nel seguito questi limiti verranno chiamati **limiti di pericolosità**.

Per quanto riguarda la frequenza, questa si dimostra particolarmente pericolosa nel campo delle infrasonore (cioè meno di 16 Hz), in quanto rientrando nel campo delle frequenze naturali degli edifici o delle singole strutture.

Al riguardo dei materiali i più sensibili alle vibrazioni sono quelli meno assimilabili ad un materiale isotropo, o meglio che presentano una forte anisotropia in termini di resistenza. Questo perché la vibrazione svolgendosi, sotto forma di sollecitazione, in tutte le direzioni troverà sfogo dove meno è efficace la resistenza del materiale.

Caso tipico è quello delle murature che rappresentano uno dei materiali più a rischio di fronte alle sollecitazioni dinamiche.

Un'altro fattore importante nella valutazione della pericolosità della vibrazione è la **durata**. La durata della vibrazione abbassa i limiti di pericolosità ed in modo particolare l'entità limite dell'ampiezza della oscillazione.

Come ordine di grandezza si pensi che per vibrazioni tra i 5 ed i 30 Hz, un'eventuale ampiezza di 0.5 m/s^2 può produrre danni anche per durate limitate, ore o giorni; mentre un'ampiezza di 0.05 m/s^2 può essere dannosa se sopportata per lunghi periodi, mesi o anni.

Possiamo ora schematizzare le situazioni più tipiche che rappresentano una situazione di pericolo.

- L'intensità della sollecitazione dinamica, intesa come insieme dei valori di ampiezza e frequenza, supera anche per breve tempo il limite di resistenza di un elemento strutturale.
- L'eccitazione dinamica produce un assestamento differenziato delle fondazioni, provocando indirettamente una ridistribuzione dei carichi, con possibile superamento dello stato limite.
- La frequenza di eccitazione corrisponde ad un sottomultiplo o alla frequenza fondamentale dell'edificio o di un suo elemento strutturale.

Ognuna di queste tre possibilità dovrà essere presa in considerazione nell'esame di un edificio sottoposto a vibrazioni, tenendo conto che tutte queste situazioni si possono presentare anche contemporaneamente.

Per quanto riguarda le sorgenti **interne**, queste possono essere trattate, nella valutazione della pericolosità, con gli stessi parametri precedentemente esposti.

Anche se, come accennato, queste pulsanti tendono a far vibrare la struttura con la stessa frequenza della forzante. Diverso invece, come vedremo, sarà il modo di intervenire per attenuare gli effetti dannosi di queste vibrazioni.

2.2 Criteri di valutazione della pericolosità delle vibrazioni

Nella valutazione della pericolosità di una vibrazione vanno considerati diversi aspetti.

In generale bisognerà valutare:

- a. le proprietà geotecniche del terreno;
- b. la tipologia delle fondazioni;
- c. la tipologia ed i materiali costituenti l'edificio;
- d. l'età;
- e. lo stato delle strutture.

Le proprietà geotecniche del terreno sono fondamentali nei casi in cui la sorgente è esterna. In generale il miglior comportamento assorbente è prodotto da suoli granulari di materiale asciutto.

Per le fondazioni il miglior comportamento viene riscontrato per fondazioni profonde o dove maggiore è la massa fondale.

Per quanto riguarda il punto c possiamo suddividere gli edifici in tre categorie.

- | | |
|---------------|---|
| I CATEGORIA | Edifici con fondazioni adeguate o poggianti su pali di fondazione, comunque costituite da elementi strutturali in calcestruzzo armato, acciaio o legno.
Mentre le parti dell'edificio che non hanno compiti di resistenza e sono costituiti da calcestruzzo non armato, murature o elementi lapidei, fanno parte della II categoria. |
| II CATEGORIA | Edifici in muratura o dove la muratura è parte prevalente dei materiali costituenti. |
| III CATEGORIA | Edifici della II categoria ma di notevole età o di grande importanza storico-culturale o edifici non in perfetto stato di conservazione. |

Sulla base delle categorie descritte viene presentato un grafico ed una tabella che ci forniscono delle indicazioni sui limiti di pericolosità di una vibrazione.

Il grafico si basa sulla determinazione della frequenza della vibrazione e sull'ampiezza massima (picco del segnale di accelerazione, positivo o negativo, vedi ISO 2041 : 1082 punto 2.036) subita dalla struttura in esame.

Il grafico è diviso in 6 zone segmentate A, B, C, D, E, F, nelle quali esiste un concreto pericolo che le vibrazioni producano l'effetto descritto nella tabella riportata a seguito del grafico.

GRAFICO DELLA PERICOLOSITÀ DI UNA VIBRAZIONE

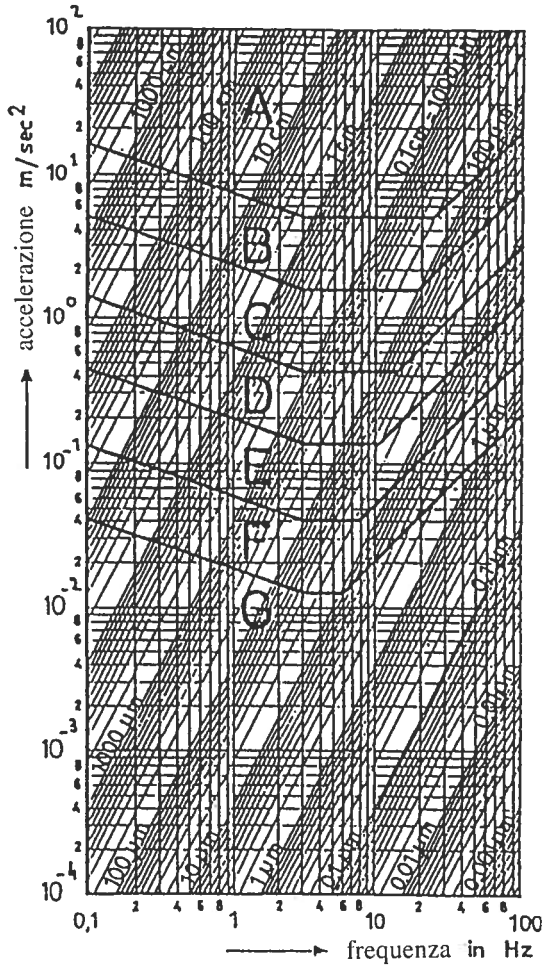


Grafico 1. Il grafico presenta sei campi di pericolosità determinati dall'identificazione di almeno due parametri della vibrazione, frequenza fondamentale o ampiezza dello spostamento o della velocità o dell'accelerazione.

La tabella seguente indica gli effetti prodotti, sulle varie categorie di edifici, da vibrazioni con caratteristiche di **intensità** rientranti nei campi definiti nel grafico 1.

TABELLA DEI DANNI E DELLA PERICOLOSITÀ

	PERCETTIBILITÀ UMANA	INFLUENZA SULLE STRUTTURE		
		I CAT.	II CAT.	III CAT.
A	fortemente intollerabile	pericolo di collasso	pericolo di collasso	pericolo di collasso
B	intollerabile	forti danni localizzati	pericolo di collasso	pericolo di collasso
C	fortemente percettibile	formazione di fessurazioni	danni molto estesi	danni molto estesi
D	molto percettibile	fessurazioni in pochi punti	fessurazioni estese	fessurazioni estese
E	percettibile	non influente	fessurazioni in pochi punti	fessurazioni varie
F	appena percettibile	non influente	non influente	fessurazioni in pochi punti
G	non percettibile	non influente	non influente	non influente

Tabella 1 . Effetti prodotti dalle vibrazioni sulle varie categorie di strutture.

I danni descritti si riferiscono a vibrazioni prodotte per periodi brevi, da poche ore ad alcuni giorni.

Nel caso di vibrazioni prolungate, mesi o anni, possiamo considerare le pericolosità descritte scalare di una casella.

La tabella riportata ha un valore indicativo ed è basata principalmente sull'esperienza acquisita in numerosi casi studiati.

2.3 Cautele e rimedi

Dopo un'accurata analisi delle vibrazioni indotte su un edificio, e una volta identificato sul grafico 1 il valore massimo delle vibrazioni, se ci troviamo in zone pericolose, è necessario progettare il sistema di attenuazione degli effetti vibratorii.

In generale possiamo definire i seguenti criteri di intervento:

- a. ridurre, ove possibile, l'intensità della sorgente;
- b. separare fisicamente le strutture della sorgente dalle strutture adiacenti;
- c. interporre tra sorgente e edificio in esame un'intercapedine di materiale a basso coefficiente conduttivo vibratorio;
- d. irrigidire le strutture sottoposte a vibrazione.

Nel caso di situazioni di risonanza o sottorisonanza:

- e. variare la frequenza della forzante;
- f. variare la frequenza propria della struttura.

Analizziamo questi criteri uno per uno, senza dimenticare che gli stessi possono essere adottati anche contemporaneamente.

a. Ridurre, ove possibile, l'intensità della sorgente.

Non è in generale facile attuare questa possibilità perché spesso legata a fattori produttivi, come nel caso delle macchine industriali, o situazioni di forte traffico. Nel primo caso si può intervenire in tre modi:

- limitando la potenza espressa nel lavoro svolto dalla macchina;
- appoggiando la struttura su materiali che dissipano l'energia vibratoria, come l'amianto, il feltro, il sughero ed altri materiali plastici, o direttamente su appositi ammortizzatori meccanici (silent stock);
- aumentando l'inerzia del basamento.

Nell'altro caso, ove non è possibile eliminare del tutto il traffico, si dovrà ridurre la velocità consentita e soprattutto eliminare eventuali discontinuità del percorso stradale.

b. Separare fisicamente le strutture della sorgente dalle strutture adiacenti.

Questa soluzione determina immediati vantaggi.

Spesso i macchinari produttori della forzante sono fissati a basamenti o pavimenti industriali, è quindi possibile intervenire tagliando il perimetro ed interponendo del materiale elastico.

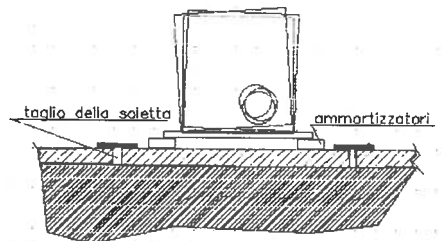


Figura 4. Isolazione della sorgente.

c. Interporre tra sorgente e edificio in esame un'intercapedine di materiale a basso coefficiente conduttivo vibratorio.

Questa soluzione prevede la costruzione di un **canale di assorbimento** interponendolo tra sorgente e soggetto delle vibrazioni.

Il canale dovrà avere profondità e lunghezza tali da evitare l'irradiazione diretta delle vibrazioni da parte della sorgente. Nel caso di vibrazioni derivanti dal passaggio di automezzi il canale sarà lungo almeno quanto l'edificio. In questo modo vengono eliminate le onde superficiali che rappresentano la sostanza degli impulsi trasmessi alle fondazioni. Per ovvie ragioni il canale sarà posto il più vicino a valle possibile alla sorgente.

Il canale di assorbimento dovrà essere riempito di materiale vibroassorbente e dovrà evitarsi la presenza di acqua, che al contrario è molto trasmettente. Viene consigliato semplice aggregato di spessore medio-grande > 30 mm.

La superficie esterna del canale sarà coperta da pannelli semplicemente appoggiati.

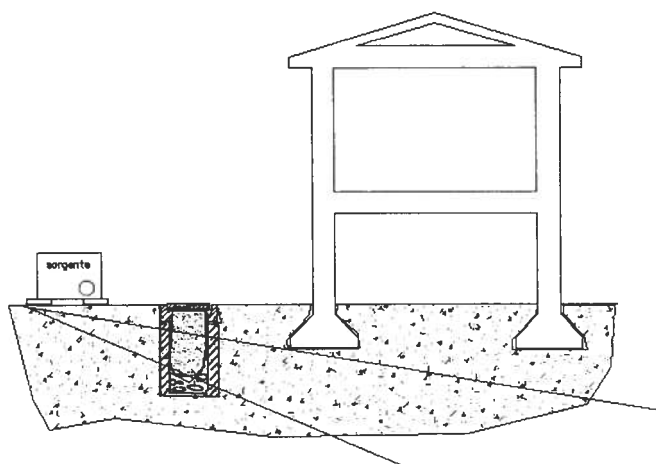


Figura 5 . Schema di canale di assorbimento.

d. Irrigidire le strutture sottoposte a vibrazione.

Questa soluzione, in genere molto costosa, dovrà essere applicata dopo aver tentato di riportare le vibrazioni all'interno di valori accettabili attraverso le soluzioni precedentemente suggerite.

L'eventuale irrigidimento dovrà avvenire nella direzione ove si è riscontrata l'ampiezza maggiore della accelerazione.

2.4 Fenomeni di risonanza

Caso dei campanili

La condizione di risonanza si presenta spesso sui campanili dove il ritmo delle campane corrisponde ad un sottomultiplo della frequenza propria del campanile.

Come ordine di grandezza si pensi che il ritmo delle campane ha frequenza tra 0.2 e 0.4 Hz (cioè tra 24 e 48 colpi al minuto) e la frequenza propria dei campanili varia mediamente tra 0,5 e 1,5 Hz .



Foto 1. Campanile di Moniego (VE).

Per generare effetti di risonanza non è necessario che ci sia una perfetta corrispondenza dei valori, ma è sufficiente starci vicino. In altre parole se 30 suoni di campana, corrispondenti a 15 cicli al minuto, 0.25 Hz, sono esattamente un sottomultiplo della frequenza propria del campanile, anche ritmi vicini come 31 o 29 causeranno un effetto di risonanza sia pur ridotto.

Con lo stesso esempio se la frequenza propria del campanile è 0.75 Hz , corrispondente a 45 oscillazioni al minuto, i sottomultipli di risonanza sono valori pari a 22.5, 15, 11.25, mentre i valori intermedi 18.75 e 13.13 sono valori in controfase. Pertanto in questo caso un ritmo delle campane pari a 37 o 26 colpi al minuto produrrà un effetto di controfase delle forze impulsive rispetto al modo di vibrare del campanile, con il risultato di smorzare le forze in gioco.

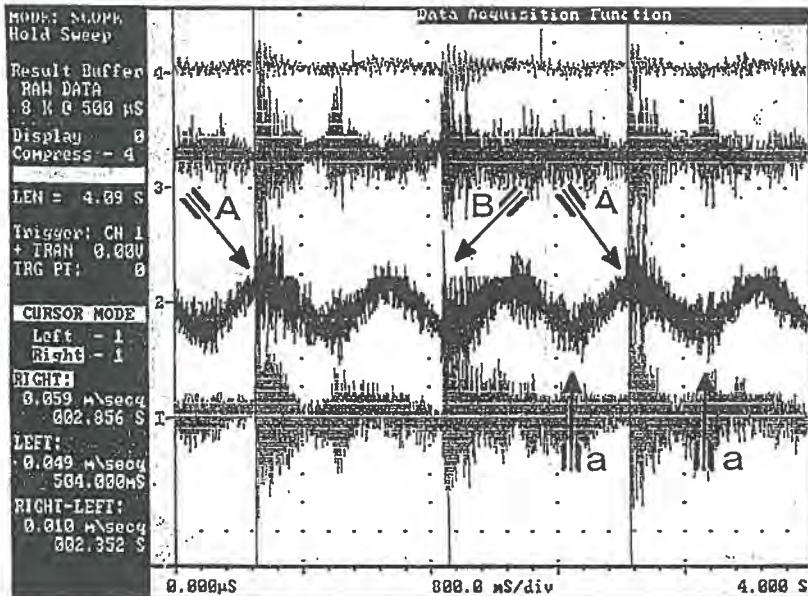


Grafico 2. Situazione di risonanza su un campanile. Con le frecce si indicano i due colpi di campana.

Può accadere che una situazione di risonanza prolungata negli anni, o addirittura nei secoli, abbia prodotto delle lesioni tali da cambiare il modo di vibrare ed uscire quindi dalla situazione critica.

Pertanto se si interviene risaldando le fessurazioni esistenti si riproduce la condizione critica di partenza.

Va da se che il risanamento va inteso come incremento della inerzia della struttura sia attraverso l'irrigidimento delle fondazioni che delle pareti.

Da queste osservazioni comprendiamo come la strada migliore da seguire è quella del cambiamento del ritmo delle campane. Piccole variazioni producono forti riduzioni delle oscillazioni.

Strutture precomprese

Un'altro tipico caso di risonanza è riscontrabile in quelle strutture civili che impiegano strutture precomprese di grande luce.

Queste strutture hanno frequenze proprie comprese tra 5 Hz e 20 Hz e si prestano facilmente a trovare rapporti di forze impulsive in risonanza. Infatti, ragionando in giri al minuto, queste frequenze rappresentano un campo tra 300 g/min e 1200 g/min che sono velocità frequentemente utilizzate da macchine operatrici tipo le lavatrici industriali, le pompe, i motori in genere.

Va tenuto conto che la situazione di risonanza oltre al disturbo fisico, che analizzeremo al paragrafo 5, è fortemente dannosa per la struttura stessa in quanto produce un rapido decadimento delle caratteristiche di pretensione, dovuto ad un meccanismo di rilassamento della coesione ferro-calcestruzzo.

In queste circostanze si cercherà innanzitutto di variare la frequenza della forza impulsiva, possibilmente attraverso un processo iterativo tra rilievo sperimentale e variazione.

Se questa possibilità è negata da problematiche produttive si deve intervenire sulla struttura modificando i modi naturali.

Si può agire o aumentando o diminuendo le frequenze naturali, cercando comunque di raggiungere una situazione di controfase tra frequenza impulsiva e modo naturale in risonanza.

Per chiarezza facciamo un esempio numerico. Una delle frequenze naturali sia di 20 Hz e la frequenza di risonanza (in questo caso sottorisonanza) di 5 Hz, corrispondente ad un numero di giri di un motore pari a 300. Siamo nella situazione in cui viene creata una spinta ogni due oscillazioni (infatti anche se il rapporto tra le frequenze è 4, tenuto conto che il moto rotatorio produce due forze verticali per ciclo, si ottiene un effetto eccitante doppio).

L'ideale come detto è quello di variare la frequenza della forza impulsiva il cui numero di giri ideale sarebbe di 275 o 325 g/min, se questa soluzione non è praticabile si cercherà di cambiare la frequenza naturale della struttura portandola a 17,5 Hz oppure 22,5 Hz.

Per raggiungere questo risultato ci sono varie tecniche.

Per aumentare la frequenza naturale si può agire producendo un'ulteriore tensionamento attraverso una catena longitudinale, oppure aumentare il momento di Inerzia attraverso delle placche laterali.

Per esperienza comunque il consiglio è quello di cercare di rendere indipendenti le strutture di sostegno delle macchine rotanti rispetto a quelle dell'edificio.

2.5 Traffico veicolare o su rotaia

Il traffico veicolare, in certe condizioni, può indurre delle vibrazioni dannose.

Non sono dell'opinione di imputare automaticamente al traffico la responsabilità dei dissesti che non hanno immediata spiegazione. Per esperienza ho constatato come spesso i valori di accelerazione derivanti dal traffico non sono assolutamente considerabili dannosi.

Diversa è la situazione di strade dissestate con passaggio di mezzi pesanti. In questi casi la forza impulsiva che ne deriva può avere valori superiori ai limiti indicati nel grafico 1.

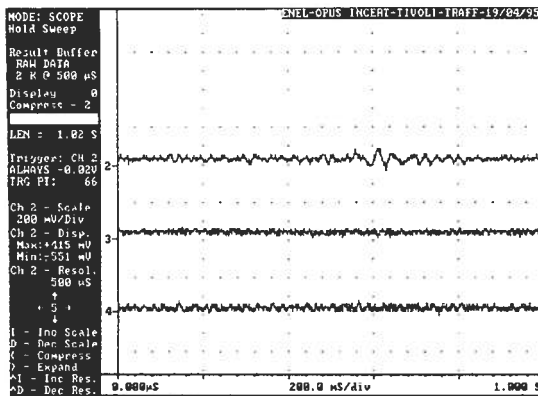


Grafico 3. Rilievo del segnale orizzontale su un muro antico al passaggio del traffico veicolare.

In tutte le situazioni a rischio bisognerà intervenire attraverso un rilevamento in sito come verrà illustrato al paragrafo 4.

Nel caso, invece, del traffico su rotaia si riscontrano facilmente valori all'interno delle fasce di pericolosità. Situazioni che vanno analizzate con attenzione anche se si tratta di vibrazioni transitorie in quanto si ripetono con frequenza e per periodi brevi.

Questo tipo di vibrazione crea degli assestamenti del terreno e quindi delle fondazioni, con conseguenti fessurazioni. Se normalmente questi fenomeni tendono a consolidarsi in una nuova situazione di stabilità, in particolari condizioni di falda o di terreno, non scompaiono del tutto, anzi si ripresentano in maniera incostante e dannosa.

Per le vibrazioni generate internamente alle gallerie si veda la UNI 9942.

3. MISURA DELLE VIBRAZIONI

La tecnica con cui vengono acquisiti i parametri dinamici delle forzanti e delle strutture in esame deve seguire dei criteri fondamentali.

Delle norme tecniche specifiche vengono indicate nelle UNI 9916 e nelle UNI ENV 28041 .

Nei paragrafi seguenti svilupperemo le caratteristiche minime che devono avere le strumentazioni di acquisizione dinamica.

3.1 Caratteristiche delle strumentazioni

Innanzitutto è bene ribadire che la strumentazione utilizzata deve essere in grado di acquisire i dati con un'elaborazione video in tempo reale.

Questo fatto fornisce la possibilità al tecnico di valutare anche intuitivamente se i dati acquisiti sono compatibili con quanto a lui noto o quanto calcolato teoricamente.



Foto 2. Apparecchiatura di acquisizione dati.

Il software di acquisizione.

Il software dovrà essere in grado di acquisire più di 10 dati per ogni ciclo.

In altre parole se la frequenza in misura è di 20 Hz dovremo acquisire con una scansione minima di 200 Hz per singolo canale.

Questa necessità deriva dal pericolo sempre incombente dell'effetto "aleasing" cioè il rischio che la ricostruzione della funzione accelerazione non sia effettivamente rappresentativa .

È inoltre consigliabile introdurre un filtro analogico nel sistema di acquisizione, come il passa basso (sono filtri hardware che impediscono il passaggio di segnali con frequenze superiori ad un valore prefissato).

Il filtro p.b. dovrà avere un valore appena superiore alla frequenza che si vuole studiare.

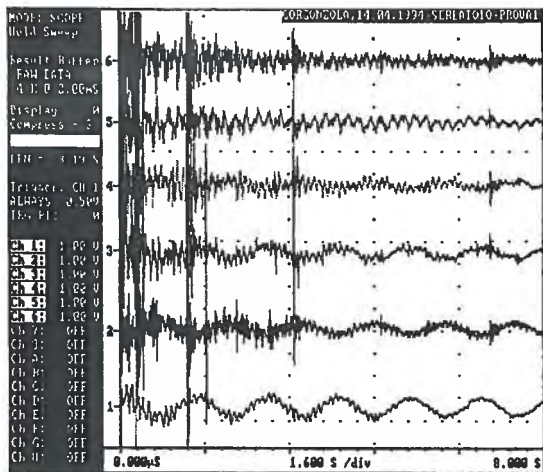


Grafico 4. Mostra il segnale di acquisizione su sei canali. Foto 3. Coppia di accelerometri.

Gli accelerometri.

Questi sensori hanno la caratteristica di emettere un segnale elettrico in funzione della forza con cui una massa preme o tira l'elemento sensibile.

Nel settore edile i sensori più indicati sono quelli piezoresistivi. Questi sensori possono fornire un segnale molto forte, da 500 a 1000 mV/g .

Vengono inoltre utilizzati anche sensori a principio estensimetrico, dove una massa produce una forza su un elemento metallico che la trattiene e dove quest'ultimo è strumentato con strain-gauges. Per particolari situazioni sono impiegabili anche sensori a principio capacitivo.

In qualunque caso la caratteristica principale è il valore minimo della frequenza acquisibile che deve essere inferiore a 0.2 Hz , in quanto rappresenta una frequenza facilmente riscontrabile.

È importante che l'**influenza laterale** sia minima, inferiore al 3 %, e questo per evitare che le componenti ortogonali non alterino eccessivamente il valore dell'ampiezza misurata.

La risoluzione dovrà essere inferiore a 0,0001 g ed il rumore di fondo della strumentazione dovrà essere inferiore della risoluzione.

Comunque nonostante l'alto valore di emissione dei sensori indicati è necessario prevedere un'amplificazione del segnale di 100 volte, oppure la possibilità di ridurre il fondo scala di acquisizione a valori compresi tra i 10 e 50 mV.

Questo consente di acquisire ampiezze anche di 1/1000 m/s² necessarie a rilevare vibrazioni non percettibili dall'uomo.

Il software di elaborazione.

Sono diverse le elaborazioni effettuabili sul segnale originale acquisito. Citeremo le più importanti.

Passa basso. È una tecnica software che consente di eliminare le frequenze superiori al valore prefissato. È preferibile comunque un filtraggio analogico.

Smoothing. Fissato un intervallo di elaborazione in termini temporali, tutti i dati acquisiti nell'intervallo vengono mediati. La tecnica consente di individuare l'andamento portante del segnale. Particolare attenzione dovrà essere fatta a non ampliare eccessivamente il Δt per evitare di ridurre il valore dell'ampiezza portante.

Trasformata di Fourier. Consente la rielaborazione del segnale nel dominio delle frequenze. Il risultato dell'elaborazione costituisce lo *spettro di potenza*, ed evidenziano le frequenze fondamentali acquisite.

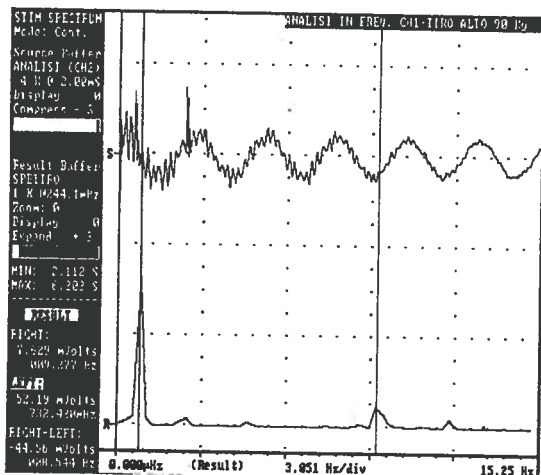


Grafico 5. Elaborazione del segnale attraverso la trasformata di Fourier.

Funzione di trasferimento. Rappresenta la funzione ricavata dal rapporto tra la funzione della forzante rispetto al segnale rilevato nel punto di osservazione. Questa elaborazione consente di ipotizzare la risposta dinamica di una struttura in funzione del variare dell'impulso sorgente.

3.2 Punti di rilevazione

Il posizionamento dei sensori deve seguire alcuni criteri fondamentali.

- Una terna di sensori dovrà essere posta a contatto con la sorgente. I sensori posti nel piano avranno direzione diretta e ortogonale alla linea congiungente la sorgente e l'edificio in esame.

- Vanno localizzati dei sensori al suolo sia vicino alla sorgente che vicino all'edificio; ne sono sufficienti due per punto diretti verticalmente e lungo la congiungente; i dati acquisiti permetteranno un rapido confronto nel caso si dovesse impiegare una delle tecniche di attenuazione esposte al paragrafo 2.3.

- Ovviamente se esistono delle fessurazioni evidenti si sceglierà il più vicino nodo strutturale per posizionare una terna di sensori, altrimenti si posizioneranno i trasduttori sui nodi principali della struttura.

Evitare comunque la mezzeria delle singole strutture per non accavallare gli effetti vibratori (a meno che non si debba verificare l'eventuale condizione di risonanza del singolo elemento).

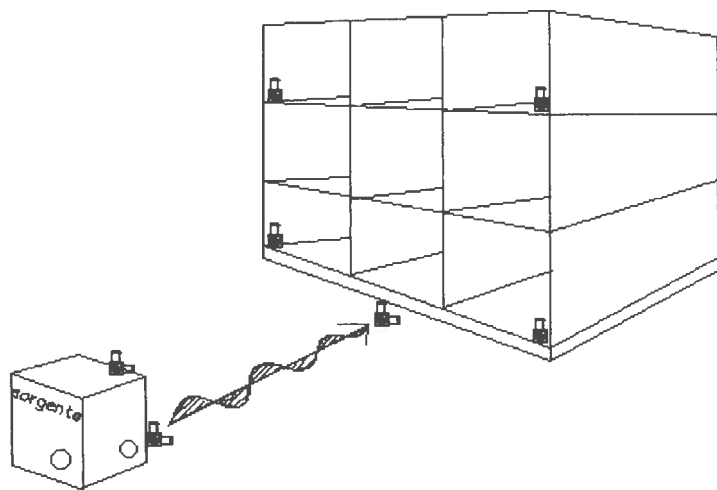


Figura 6. Schema dei punti di rilevazione accelerometrici.

4. VALUTAZIONE DEL DISTURBO SULLE PERSONE

Per questa particolare tipologia di indagine si può fare riferimento alle norme UNI 9614.

4.1 Misura delle vibrazioni

Le vibrazioni vengono divise tra:

- *costanti*;
- *non costanti*;
- *impulsive*.

Il segnale viene considerato costante quando varia in un intervallo di tempo di 1 sec con valori, dell'*accelerazione complessiva ponderata in frequenza*, inferiori a 0.0018 mm/sec^2 .

Va innanzitutto compreso che l'effetto su un soggetto esposto non dipende esclusivamente dai picchi delle accelerazioni, ma anche dal valore delle frequenze che compongono lo spettro del segnale. Infatti il corpo umano, in direzione verticale, ha una maggiore sensibilità per le frequenze comprese tra i 4 ed i 10 Hz.

(Questo fatto deriva dalle caratteristiche degli elementi maggiormente sensibili che compongono il nostro corpo, come il fegato ed il cuore, che hanno modi di vibrare all'interno del campo citato.)

Nei casi più frequenti dove il soggetto è esposto ad uno spettro con una sola componente principale in frequenza, l'accelerazione ponderata equivale al *valore efficace* dell'accelerazione misurata, definito dal simbolo *r.m.s.* (dall'inglese root mean square = radice media quadratica).

Per l'individuazione del disturbo va quindi calcolato il valore efficace del segnale dell'accelerazione. Nel caso di andamento sinusoidale questo corrisponde al 70% del picco.

Le norme prevedono un livello limite a seconda della tipologia di locali, che sono divisi in:

- *aree critiche*;
- *abitazioni*;
- *uffici*;
- *fabbriche*.

La misura del segnale va effettuata in funzione della *postura* assunta dalle persone esposte. Nel caso di postura seduta, gli assi sono posizionati come in figura 7, e la misura va effettuata attraverso una terna fissata in corrispondenza dei glutei.

Il valore dell'accelerazione efficace viene generalmente espresso in dB, che si ottiene dal valore dell'accelerazione, espresso in m/sec^2 , attraverso la relazione:

$$L = 20 \log (a/a_0)$$

dove:

a = valore efficace dell'accelerazione;

$a_0 = 10^{-5} m/sec^2$ valore efficace di riferimento.

Si riporta una sintetica tabella di conversione:

a [m/sec^2]	0.001	0.0032	0.01	0.032	0.1	0.32	1	3.2	10
L [dB]	60	70	80	90	100	110	120	130	140

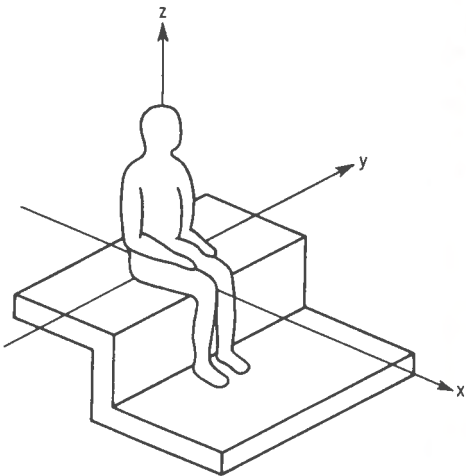


Figura 7. Postura seduta.



Foto 4. Rilevamento del segnale vibratorio all'interno di un'area critica.

La soglia di percezione dell'uomo, per l'asse Z, è posta a 74 dB corrispondente a $0.005 m/sec^2$, e scende a 71 dB per gli assi X e Y.

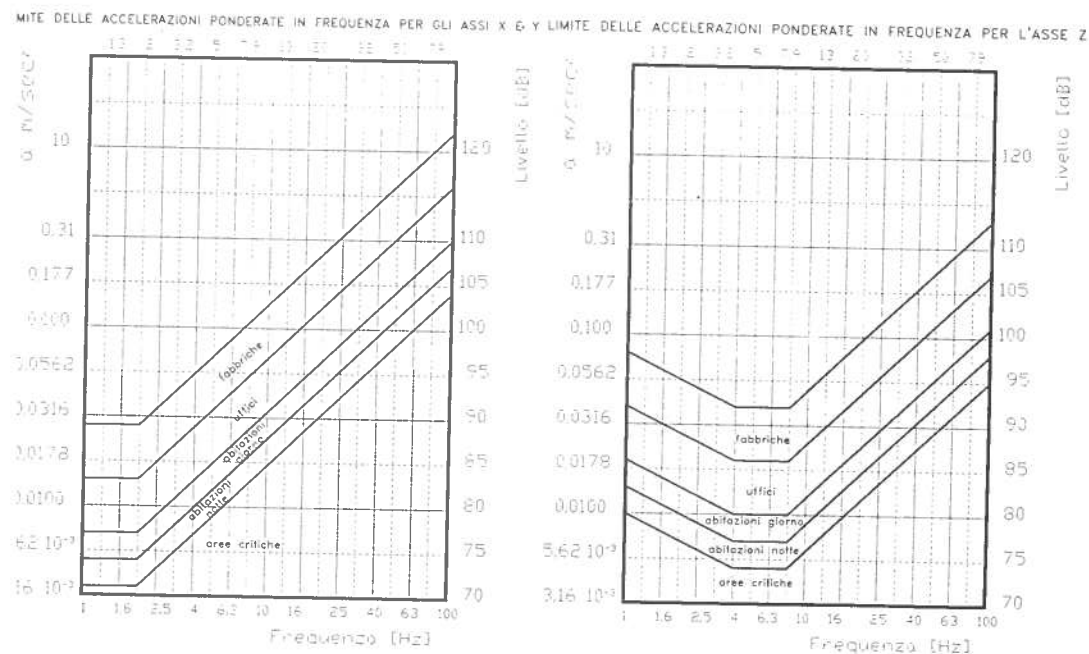
4.2 Criteri di valutazione

Il criterio di valutazione del disturbo causato da una vibrazione è basato sulla perceibilità umana che come accennato è massima alle basse frequenze.

Di seguito vengono riportati le linee limite a seconda della tipologia di locale.

Va specificato che per area critica si intende locali in cui si svolgono lavori delicati, tipo le sale operatorie, i laboratori, ecc.

I grafici si riferiscono alla situazione più diffusa di un segnale con un valore di frequenza portante nettamente prevalente, e pertanto possiamo riferirci direttamente al valore efficace dell'accelerazione.



Individuato il segnale percepito nell'ambiente in misura, si controllerà che il livello dell'accelerazione efficace sia al di sotto della soglia definita per la tipologia di ambiente.

Si ricorda comunque che questi limiti non rappresentano un fattore regolato da una legge specifica, ma sono solo consigliati.

CONCLUSIONI

Il lavoro presentato nella memoria ha messo in luce quanto diverse possono essere sia le sorgenti della vibrazione che il loro modo di trasmettersi.

Abbiamo poi cercato di fornire una tecnica di valutazione basata su dei riferimenti sperimentali da prendere sul posto.

La tabella con le indicazioni del probabile danno conseguente non è matematicamente accertabile, ma è stata sviluppata sulla base di numerose esperienze e può essere ritenuta affidabile.

Al tecnico che dovesse affrontare queste problematiche, viene consigliato di appoggiarsi a strutture esterne in grado di fornirgli i dati sperimentali, ma di rimanere a stretto contatto con i tecnici addetti alla rilevazione per percepire personalmente il risultato.

È inoltre necessario ricordarsi che dopo un'eventuale intervento di attenuazione è consigliabile verificare che i valori siano effettivamente scesi sotto le soglie volute, o meglio ancora, effettuare le modifiche durante una costante rilevazione del segnale.

Molto lavoro scientifico deve ancora essere svolto per la perfetta comprensione dei danni prodotti dai fenomeni vibratorii. Questa memoria ha il solo scopo di dare le prime indicazioni ritenendo quanto scritto l'inizio del lavoro.

BIBLIOGRAFIA

- [1] K. Graff , “Wave motion in elastic solids” , Oxford, 1975.
- [2] DIN 4150 :1995 Teil 3 “ Erschütterungen im Bauwesen -
Einwirkungen auf bauliche Anlagen”, Germania.
- [3] ISO/DIS 4866:1986 “Mechanical vibration and shock - Measurement
and evaluation of vibration effects on buildings “
- [4] F. E. Richart, J. R. Hall , R. D. Woods “Vibrations of soils and
foundations” , Prentice Hall , Englewood Cliffs , New Jersey, 1970.
- [5] S. Mastrodicasa, “Dissesti statici delle strutture edilizie”, Hoepli 1988
- [6] “ The fundamentals of signal analysis “ , Hewlett Packard ,
- [7] M. Petrangeli “L’impiego delle prove dinamiche nella diagnostica dei ponti”
dagli atti del Seminario “ Evoluzione della sperimentazione per le costruzioni”
CIAS Merano 22-23 Aprile 1994 .
- [8] Norme UNI 9614