



SUONO  
RUMORE  
VIBRAZIONE

LABORATORIO DI ACUSTICA APPLICATA

## ***DANNI NEGLI EDIFICI CONSEQUENTI A VIBRAZIONI***

### ***Ing. Mauro Mezzetti***

Piazza Risorgimento 2 – Gallarate (VA) Tel 0331 795526  
[mauromezzetti@libero.it](mailto:mauromezzetti@libero.it)

### ***Laboratorio di Acustica Applicata – Mario Novo e Samantha Novo***

Via 2 Giugno 13 – Limbiate (MI) Tel 02 99054495  
[acustica@acustica.it](mailto:acustica@acustica.it)

***Ed. Maggio 2005***



## ***Qualche premessa e chiarimento***

Il problema dei disturbi legati alle vibrazioni prodotte da attività umane, è, oggi, sempre più sentito.

Ciò è tanto più vero in quelle aree d'Italia dove più è ramificata, e distribuita sul territorio cittadino, la produzione industriale.

Sorgono infatti, sempre più di frequente, problemi conseguenti ad un'eccessiva prossimità di impianti produttivi (cave, fonderie, manifatture, stamperie etc.), o di altre fonti di disturbo (ferrovie, strade ad alta densità di traffico, aeroporti, etc.), e le abitazioni.

Se tali situazioni, qualche decennio addietro, potevano essere sintomo di ricchezza dell'area, e le case venivano intenzionalmente edificate nelle immediate vicinanze delle fabbriche, oggi, con la diffusione della ricchezza e della ricerca del benessere, le stesse situazioni sono fonti di incompatibilità che sfociano, spesso, in cause civili di non facile soluzione.

○○○○

I disturbi indotti dalle attività umane sono sostanzialmente di tre tipi:

1. rumore
2. vibrazioni percepite dalle persone
3. vibrazioni nei fabbricati, con danni ai manufatti

Il presente materiale si limita a proporre considerazioni relativamente al terzo punto, perseguendo il modesto scopo di fornire utili spunti per affrontare il problema:

- sia per la scarsa conoscenza che, ancora oggi, abbiamo al riguardo;
- sia perché ogni aspetto del problema (dinamica delle strutture, geotecnica, scienza e tecnica delle costruzioni, dinamica delle strutture, tecniche di intervento di ripristino strutturale, etc..) meriterebbe, di per sé, un approfondimento di tale ampiezza da non poter certamente essere sviluppato esaurientemente in questa sede.

Sono escluse analisi relative ai danni indotti da terremoti: d'altra parte, sull'argomento, è facilmente reperibile una notevole mole di documentazione.

### Scheda n. 1 – Perché una vibrazione può produrre un danno?

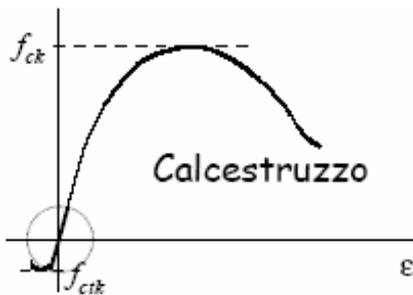
La vibrazione è un'oscillazione, più o meno ampia, di un corpo.

All'interno di un qualsiasi materiale, ad un'oscillazione consegue uno sforzo ( $f$ ), la cui entità è correlata all'ampiezza della deformazione ( $\epsilon$ ) dalla legge costitutiva del materiale.

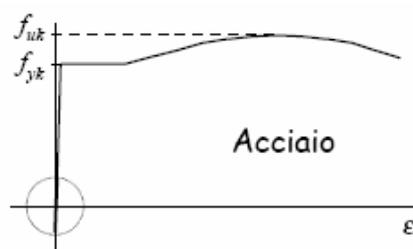
I materiali utilizzati nelle costruzioni hanno, in generale, resistenze a trazione molto basse, in special modo le malte, i laterizi od i materiali utilizzati per i rivestimenti.

Fa eccezione l'acciaio, che, però, è di solito utilizzato solo per la parte strutturale, e raramente negli edifici a destinazione residenziale.

Nelle figure a fianco sono riportati, a titolo indicativo, i diagrammi tipici dei legami costitutivi per:



- calcestruzzo (resistenza a trazione  $f_{ctk} \ll$  resistenza a compressione  $f_{ck}$ )



- acciaio per armature (comportamento simmetrico a trazione e compressione)

Quando lo sforzo, che insorge all'interno del materiale, supera la soglia di resistenza (a trazione), si innesca la lesione e, quindi, si manifesta il danno.

Nei diagrammi sopra tali punti corrispondono, praticamente, all'estremità delle curve.

Ne segue che, evidentemente, i primi danni compaiono:

- nei materiali con minore resistenza (tipicamente, come detto, quelli di rivestimento)
- nei punti “critici”, laddove, cioè, ci siano preesistenti stati di sforzo legati a cause diverse dalle vibrazioni (sollecitazioni statiche per i carichi presenti, per dilatazioni termiche, per ritiro del materiale...)

**Nota:** In linea di principio il danno (la lesione) può manifestarsi anche per superamento della soglia di resistenza a compressione del materiale. E' però evidente come ciò sia più raro e, dati i notevoli valori di resistenza a compressione dei materiali generalmente utilizzati nelle costruzioni, possa avvenire solo a seguito di vibrazioni - e sforzi - di eccezionali entità, conseguenti, per esempio, ad un sisma.

## *Scheda n. 2 – Quali sono le vie di propagazione delle vibrazioni?*

Nel caso degli edifici, la principale via di vibrazione dalla fonte (sorgente) al ricettore è il terreno.

La vibrazione è un'onda: l'energia, ad essa correlata, si propaga quindi con successive compressioni/rarefazioni del materiale.

**Nota:** le vibrazioni possono propagarsi anche attraverso l'aria: basti pensare a quelle prodotte da aeroplani che volino a bassa quota, od a quelle prodotte da raffiche di vento.

E' comune assumere l'ipotesi che il terreno si comporti come un semispazio:

- a) **elastico**  $\Rightarrow$  il legame costitutivo vale sia per incrementi, sia per decrementi di carico,
- b) **omogeneo**  $\Rightarrow$  il legame costitutivo è il medesimo per ogni elemento del semispazio,
- c) **isotropo**  $\Rightarrow$  il legame costitutivo è il medesimo indipendentemente dalla direzione della sollecitazione.

Sulla base di queste ipotesi le onde elastiche possono essere distinte in:

- onda di compressione (onde **P**): si propaga radialmente nel semispazio sferico posto al di sotto della sorgente (idealmente puntiforme).
- onda di taglio (onde **S**): si propaga radialmente nel semispazio sferico posto al di sotto della sorgente.
- onda di superficie (onde **Rayleigh**): si propaga radialmente lungo la superficie del terreno.

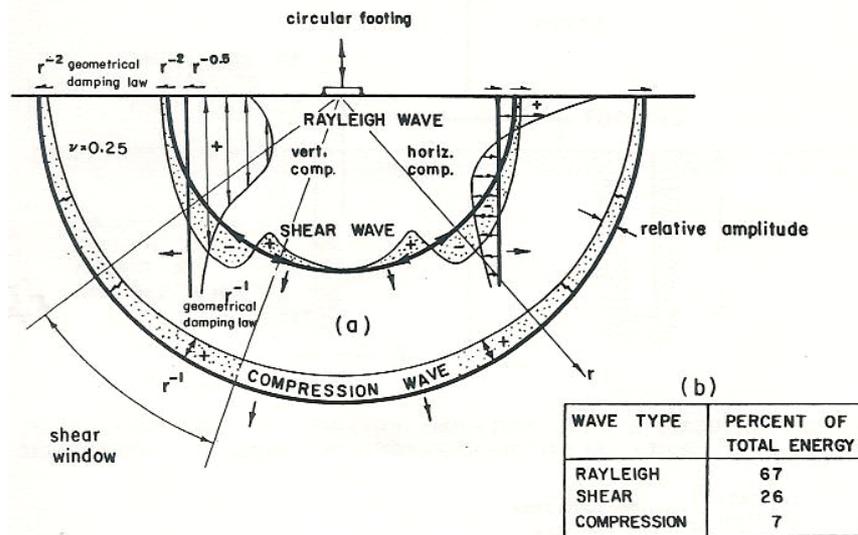


FIG. 1.—DISTRIBUTION OF DISPLACEMENT WAVES FROM A CIRCULAR FOOTING ON A HOMOGENEOUS, ISOTROPIC, ELASTIC HALF-SPACE

La maggior parte dell'energia viene trasmessa dall'onda R, anche perché questa si muove in un semispazio a contatto con l'aria, e subisce, quindi, effetti smorzanti inferiori. Le percentuali di energia associate ai diversi tipi di onde sono riportate nella precedente figura.

La riduzione dell'ampiezza di spostamento, ad una distanza  $r$  dalla sorgente, è proporzionale a:

$$1/r \text{ per le onde P - S}$$

$$1/r^{0.5} \text{ per le onde R}$$

Dalle osservazioni fatte si deduce facilmente che le onde più pericolose sono quelle di superficie (onde R).

### Scheda n. 3 – Le grandezze caratteristiche delle vibrazioni

L'effetto, su di una massa, di una sollecitazione (sia essa un'oscillazione od una forza) variabile nel tempo dipende da:

- a) **ampiezza:** (a parità di altri parametri) a maggior ampiezza consegue maggior danno.
- b) **durata:** (a parità di altri parametri) a maggior durata consegue maggior danno.
- c) **frequenza:** il rischio di danno è tanto più elevato quanto più la frequenza è prossima alla frequenza propria del corpo ⇒ rischio di **RISONANZA**

La **frequenza**  $f$  è, quindi, un parametro fondamentale per valutare la pericolosità di una sollecitazione dinamica.

Il **periodo**  $T$ , come noto, è l'inverso della frequenza:

$$T = 1/f$$

Le strutture degli edifici (per altezze < 30 m) hanno periodi propri di vibrazione compresi, in generale, tra i seguenti valori:

edifici residenziali, di altezze modeste	0.1–0.3	sec
strutture in c.a. con nuclei di controvento	0.1–0.5	sec
strutture in acciaio con controventi	0.1–0.5	sec
strutture in c.a. senza nuclei di controvento	0.3–1.0	sec
camini in acciaio	1.0–1.5	sec
telai in acciaio non controventati	< 2.0	sec

**Raramente i livelli energetici più elevati delle vibrazioni prodotte da fonti esterne si collocano in questi intervalli di periodi.** In generale i valori sono inferiori (le frequenze sono più elevate), ed il loro effetto, sugli edifici, è, quindi, modesto o trascurabile.

Una sorgente di vibrazioni con elevati livelli energetici, e periodi che interessano gli intervalli sopra individuati, quindi estremamente pericolosa per le strutture, è il **TERREMOTO**.

#### ***Scheda n. 4 - Perché possono aversi danni per vibrazioni per cause diverse dal terremoto?***

Le ragioni principali sono due:

1. anche se le fonti esterne hanno, in generale, frequenze lontane dagli intervalli di pericolosità tipici per gli edifici, inducono, pur sempre, sollecitazioni di tipo dinamico.
2. Come visto, le vibrazioni si propagano sotto forma di onde che comprimono e rarefanno, a fasi alterne, il mezzo che attraversano (il terreno, nel caso degli edifici) Le non uniformità delle continue compressioni e rarefazioni conseguenti a:
  - differenti distanze degli elementi di fondazione dalla sorgente
  - disomogeneità del mezzo di propagazione (terreno),

possono, pertanto, determinare un addensamento del terreno, con velocità ed ampiezze differenti da zona a zona, in funzione dei parametri caratterizzanti la vibrazione stessa.

Ne conseguono cedimenti differenziati delle fondazioni, con redistribuzione degli sforzi all'interno dell'edificio.

Da: DIN 4150-3 - punto 4.6 -  
Effetti delle vibrazioni nel suolo

*...soprattutto nel caso di terreni molli o di media compattezza (sabbia, ghiaia), forti vibrazioni possono determinare sprofondamenti e dunque cedimenti strutturali del terreno. Ciò vale particolarmente, in caso di vibrazioni frequenti, per sabbie uniformi e per terreni al di sotto della falda freatica.*

*..... Poiché gli assestamenti del terreno si riducono allontanandosi dalla sorgente delle vibrazioni, avviene che i cedimenti prodotti in una fondazione vicina alla causa perturbatrice non siano uniformi, ma variabili lungo di essa, e quindi possono produrre inclinazioni e dissesti delle sovrastrutture. Il secondo effetto, ossia la propagazione delle vibrazioni alle sovrastrutture è in generale meno dannoso, tanto più se è escluso il pericolo di risonanza, poiché ben difficilmente il complesso di onde che investe la costruzione è tale da offenderne la stabilità. Ciò non toglie che se la costruzione si trova in uno stato di tensione gravoso, che lambisce la soglia della resistenza in alcune parti, per vetustà o per effetto di precedenti stati di coazione, prodotti ad esempio da cedimenti differenziali, possano manifestarsi per l'intervento delle vibrazioni dei segni di dissesto.*

Da: Cestelli Guidi, "Geotecnica e  
Tecnica delle fondazioni" – vol.  
2 – Ed. HOEPLI – par. 19.3.2

In sostanza, quindi, le vibrazioni provocate da sorgenti differenti dalle scosse sismiche, più frequentemente, possono provocare danni, non tanto per effetti "oscillatori", quali sono, per esempio, quelli indotti da un terremoto ("scuotimento orizzontale" delle strutture), quanto, piuttosto, per assestamenti del terreno e conseguente aggravio, localizzato, dello stato tensionale.

Il rischio di danni è tanto più grave quanto meno addensato è il terreno, e quanto più deboli (da un punto di vista strutturale) sono le fondazioni e le sovrastrutture.

I criteri di stima della pericolosità di una vibrazione, adottati da tutte le principali normative, si basano, sostanzialmente, su quest'ultima considerazione (ved. **Scheda n. 5**)

## ***Scheda n. 5 – Livello di pericolosità delle vibrazioni***

Per definire il livello di pericolosità di una vibrazione, nei riguardi di un fabbricato, occorre valutare:

- le caratteristiche meccaniche del terreno (composizione e grado di compattazione)
- tipologia delle fondazioni (continue, isolate, dirette, su pali)
- tipologia e materiali che costituiscono l'edificio
- eventuali situazioni critiche dal punto di vista strutturale.

La procedura è relativamente semplice, e si concretizza nei seguenti passi:

1. sulla base di considerazioni, sostanzialmente di tipo qualitativo, legate all'esperienza del tecnico, si individua la classe (o categoria) cui appartiene l'edificio in esame. L'edificio sarà, ovviamente, tanto più sensibile al rischio di danni per vibrazioni, quanto più scadenti saranno i parametri significativi elencati in precedenza.
2. Si effettuano, in genere con accelerometri, misurazioni delle grandezze ritenute significative (in generale lo spostamento o la velocità) alle diverse frequenze.
3. Si confronta l'entità delle misure rilevate, nei vari campi di frequenza, con quelle ipotizzate ammissibili per la categoria di struttura cui appartiene l'edificio.

**A titolo esemplificativo**, si cita quanto prevede la **DIN 4150 – 3** in relazione a vibrazioni di breve durata:

Tabella 1: Valori indicativi relativi alla velocità di oscillazione  $v_i$  per valutare l'effetto di vibrazioni di breve durata sugli edifici.

Categoria	Tipi di strutture	Velocità di vibrazione in mm/s *			
		Misura alla fondazione			Misura al pavimento ultimo piano
		Campi di frequenza (Hz)			Frequenze diverse
		<10	10-50	50-100**	
1	Edifici utilizzati per scopi commerciali ed edifici industriali e simili	20	20-40	40-50	40
2	Edifici residenziali e simili	5	5-15	15-20	15
3	Strutture particolarmente sensibili alle vibrazioni, non rientranti nelle categorie precedenti e di grande valore intrinseco	3	3-8	8-10	8

\* Si intende la massima delle tre componenti della velocità nel punto di misura.  
 \*\* Per frequenze maggiori di 100 Hz possono applicarsi i valori riportati in questa colonna.

“... se si rimane entro i valori indicativi della tabella 1 non si verificano, allo stato attuale della conoscenza, danni traducibili in una diminuzione del valore d'uso (cfr. par. 4.6) per cause riconducibili a vibrazioni...”

La grandezza di confronto, secondo la tabella precedente, è, quindi, la velocità di oscillazione misurata alla fondazione (ma non sempre è possibile localizzare la misura in fondazione) o all'ultimo piano, ovviamente in uno o più punti significativi (per esempio, per le oscillazioni verticali: il centro di un locale di luci maggiori; per le oscillazioni orizzontali, da rilevarsi secondo due direzioni principali: uno più spigoli del fabbricato).

Non è superfluo precisare che, attualmente, esistono diverse linee guida che propongono tabelle del tipo di quella sopra richiamata. I valori ritenuti “tollerabili”, basati sostanzialmente su osservazioni sperimentali, possono differire, anche in misura significativa, da Paese a Paese (di seguito si propongono alcune tabelle che non provengono da fonti normative).

**Tabelle e grafici per la stima del rischio di danni per vibrazioni  
(fonti non normative)**

5.1) Da: Ing. Settimo Marinello - "Effetti delle vibrazioni sulle costruzioni" - Appunti CIAS (ed. 1997)

Categorie edifici:

- I^ CATEGORIA: edifici con fondazioni adeguate o poggianti su pali di fondazione, comunque costituite da elementi strutturali in calcestruzzo armato, acciaio o legno. (Le parti che non svolgono compiti di resistenza e sono costituiti da calcestruzzo non armato, murature od elementi lapidei appartengono alla categoria successiva).
- II^ CATEGORIA: edifici in muratura o nei quali la muratura è parte prevalente dei materiali costituenti.
- III^ CATEGORIA: edifici della categoria precedente, ma di notevole età, o di grande importanza storico-culturale od edificio in cattivo stato di manutenzione.

**TABELLA DEI DANNI E DELLA PERICOLOSITÀ**

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

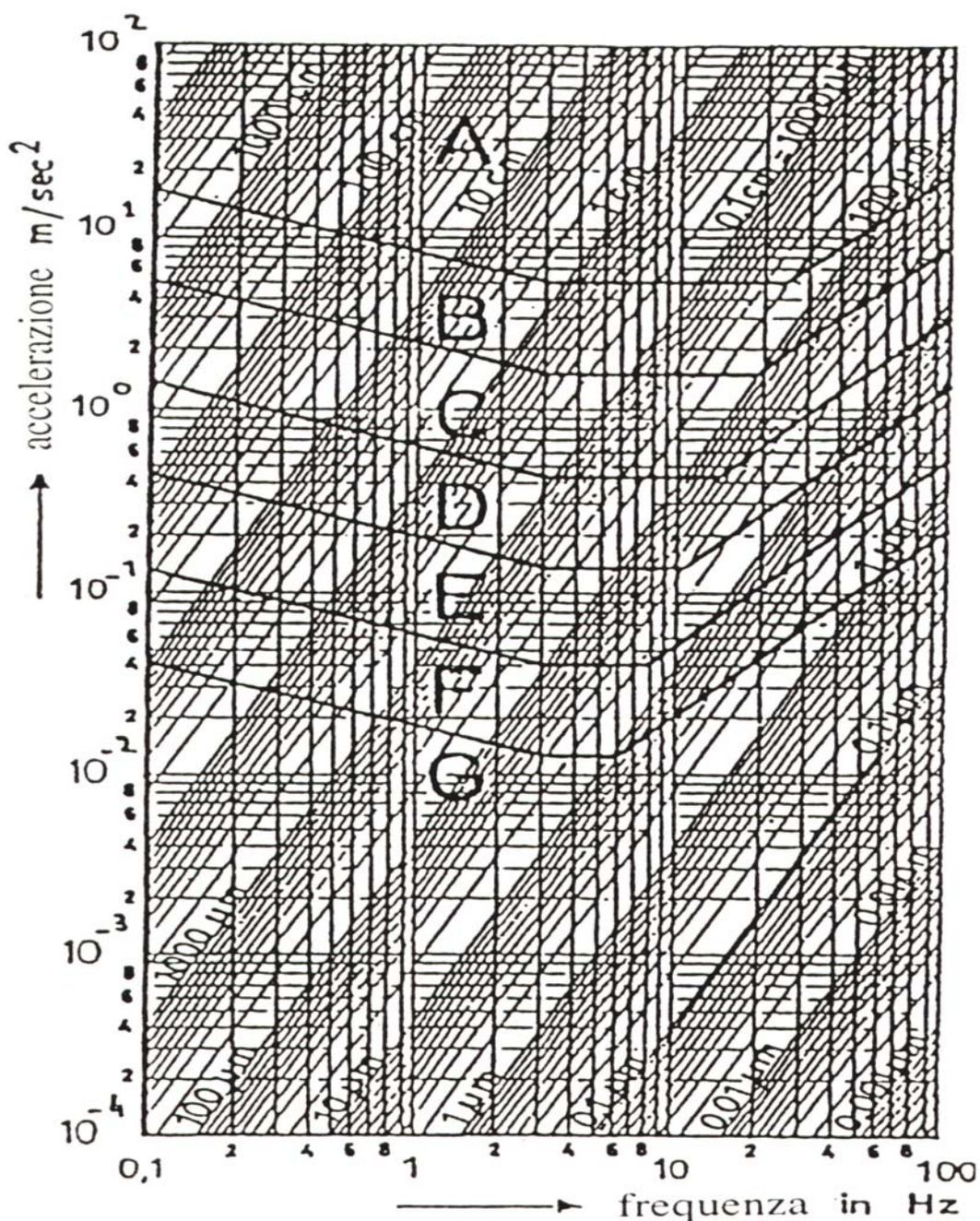
**Tabella 1 . Effetti prodotti dalle vibrazioni sulle varie categorie di strutture.**

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.

### Grafico della pericolosità di una vibrazione



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.

**5.2) Metodo di Crandel (CRANDEL, "Ground vibration due to blasting." Boston Society of Civil Engineers (April 1949) – da: Cestelli Guidi, "Geotecnica e Tecnica delle fondazioni" – vol. 2 – Ed. HOEPLI –**

Per attività che prevedono esplosioni (cave, scavi, demolizioni), definito il **COEFFICIENTE ENERGETICO**

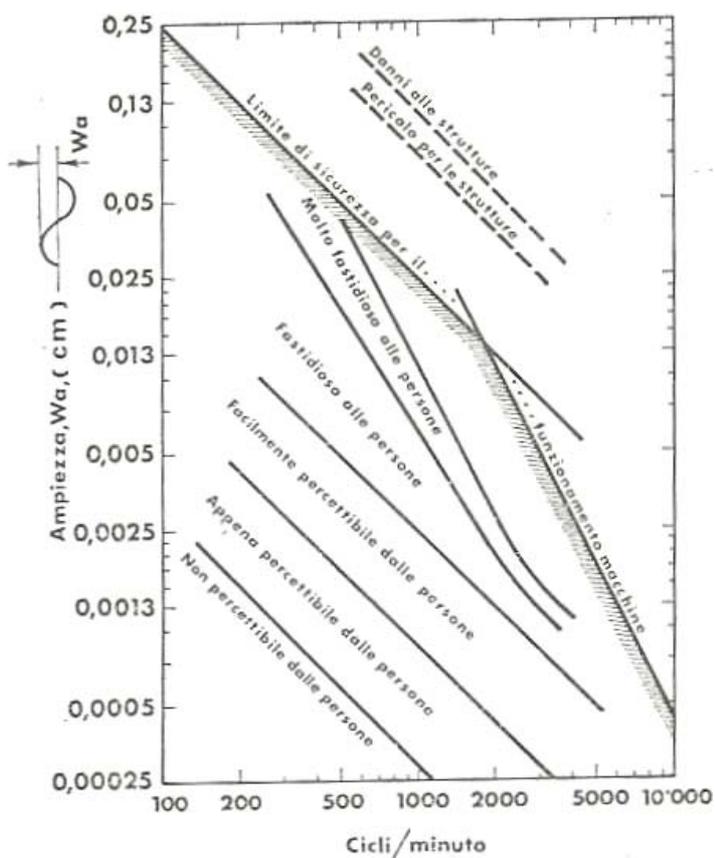
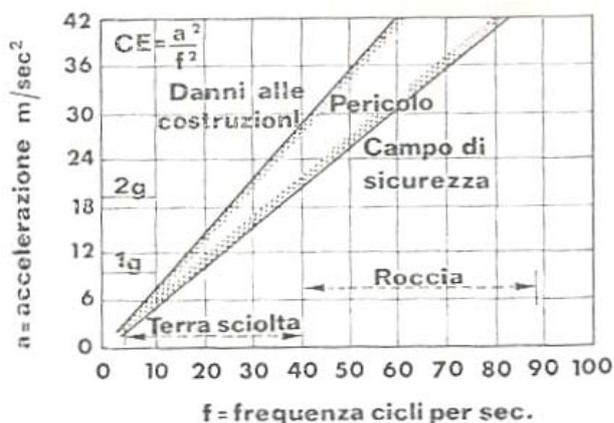
$$CE = \frac{a^a}{f^2} = 16\pi^4 f^2 \omega_a^2$$

dove:

**a** = accelerazione

**f** = frequenza

**$\omega_a$**  = ampiezza dell'oscillazione del suolo  
 si può individuare, nel grafico a fianco, una zona di pericolo.



**5.3) Grafico di Richardt (1962) – da: Cestelli Guidi, "Geotecnica e Tecnica delle fondazioni" – vol. 2 – Ed. HOEPLI –**

## Un problema correlato: la fatica dei materiali

Quello della **fatica** dei materiali costituisce un aspetto indotto delle vibrazioni nei fabbricati.

Si definisce **rottura per fatica** la rottura del materiale conseguente a livelli di sollecitazioni cicliche, anche di modesta entità – comunque di livello tollerabile se di tipo statico – per un elevato numero di cicli.

Per valutare il rischio di rottura per fatica, la prima operazione consiste nel quantificare l'ampiezza di oscillazione dello sforzo (per semplicità ci si riferisce alla sola componente normale dello sforzo, ma analogo discorso dovrebbe essere fatto anche per la componente tangenziale), pari a:

$$\Delta\sigma = 2\sigma_{\text{dinamico}}$$

dove:

$\sigma_{\text{dinamico}} \Rightarrow$  sforzo ottenuto, sulla base di opportuni schemi strutturali, dal valore, misurato in una posizione opportuna (per esempio, centro di un solaio in latero-cemento), dello spostamento dell'elemento in esame a partire dalla posizione di riposo;

La seconda operazione consiste nel confrontare  $\Delta\sigma$  con il valore di sforzo accettabile (ammissibile) per quel determinato materiale, in corrispondenza di un determinato numero di cicli.

Tale operazione, però, è spesso impossibile, essendo pressochè inesistenti dati concreti sulle resistenze a fatica di materiali quali: pareti in laterizio, pietra, intonaci, rivestimenti, legno, etc.

**Nota:** Attualmente il problema può essere affrontato, con un buon bagaglio di dati, solo per quanto riguarda i manufatti in acciaio e, per alcuni aspetti, in cemento armato.

Naturalmente, è sempre necessario verificare che lo sforzo totale risulti inferiore al valore ammesso dalle norme:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{statico}} + \sigma_{\text{dinamico}} \leq \sigma_{\text{amm}}$$

dove:

$\sigma_{\text{statico}} \Rightarrow$  sforzo ottenuto dall'analisi statica dell'elemento in esame.

Ancora a titolo esemplificativo si cita, sull'argomento, quanto indicato dalla **DIN 4150 - 3**

.....

Non è necessario compiere una verifica di sicurezza relativamente a possibili collassi da fatica, qualora per la verifica della sicurezza di stabilità le parti dinamiche del carico vengano moltiplicate per il coefficiente di fatica 3.

Non è necessario certificare la stabilità rispetto ai collassi da fatica, se la proporzione dinamica della sollecitazione risulta inferiore al 10% della sollecitazione ammissibile a livello statico.

.....

## **Scheda n. 6 – Classificazione dei danni**

I danno possono essere di entità estremamente variabili: da leggere cavillature nei rivestimenti, a fessure passanti attraverso gli elementi portanti.

In funzione delle ampiezze, e del livello di pericolosità, i danni sono classificati in diversi livelli:



- a) **danni di soglia**, se coinvolgono solo elementi con funzione architettonica ed estetica. Danni di questo tipo sono: fessure più o meno marcate negli intonaci, nelle piastrelle, fessure in corrispondenza dei giunti di separazione tra un laterizio e l'altro...

- b) **Danni minori**. Come i precedenti, ma di entità maggiore: distacco di pezzi di intonaco, fessure nei laterizi...





c) **Danni maggiori,**

se coinvolgono e compromettono elementi con funzione strutturale, o comunque se compromettono la fruibilità dell'edificio. Danni di questo tipo sono: lesioni (manifestazioni di eccessiva sollecitazione all'interno dell'elemento) nelle travi e/o nei pilastri in c.a., evidenti separazioni tra due porzioni di fabbricato...

## ***Scheda n. 7 – Quali danni sono imputabili a vibrazioni?***

Non esiste una risposta univoca a questa domanda, in quanto le cause dei danni possono essere le più disparate. Tra le più frequenti:

- **cedimenti di fondazione** o, comunque, **strutturali** (ivi inclusi i movimenti per insufficiente rigidità degli elementi portanti, rispetto a quella degli elementi portati)
- **corrosione** delle barre d'armatura per insufficienza del copriferro, con distacco, per esplosione, del medesimo,
- **fessurazioni per ritiro** del calcestruzzo, o per **dilatazioni termiche** (particolarmente frequente la presenza di fessure nell'intonaco tra due elementi – per esempio pilastro in cls e muratura in laterizio – di materiali differenti),
- **eccessive concentrazioni di sforzo** (in rapporto alle caratteristiche meccaniche del materiale danneggiato),
- **insufficiente traspirabilità dell'intonaco**, con conseguente aumento della pressione di vapore, ed apertura di fessure per le vie di fuga,
- **vibrazioni** (per traffico, esplosioni, infissioni di pali o paratie, demolizioni, attività industriali interne od esterne, attività umane di varia natura etc.)
- **infiltrazioni di umidità (o umidità di risalita)**
- .....

L'eziologia del danno è, quindi, estremamente difficile ed incerta. Lo è ancora di più se si considera il fatto che, in generale, possono sovrapporsi più cause.

Fatte queste premesse, si propongono comunque alcune considerazioni utili per rispondere alla domanda iniziale, almeno nell'ipotesi che le vibrazioni siano ancora in atto:

1. il tecnico verifichi, mediante osservazione di medio/lungo periodo, se i danni sono ancora in atto, ovvero si sono arrestati (in quest'ultimo caso, evidentemente, il danno non è correlato alle vibrazioni, ancora in atto)
2. escluda (ove possibile) che siano in atto assestamenti del terreno per cause statiche (prendendo in considerazione il tipo di terreno coinvolto dal bulbo di pressione, lo sforzo trasmesso a livello delle fondazioni, l'età del fabbricato etc.),
3. escluda la presenza di altre possibili cause evidenti (si veda, come riferimento, il breve elenco proposto sopra),
4. effettui rilievi strumentali dei parametri più significativi alle diverse frequenze: in generale velocità e spostamento di alcuni punti significativi del fabbricato. I valori rilevati possono essere confrontati con alcuni valori di "soglia", forniti dalle normative (ved. Scheda n. 5)

### Come fare i rilievi strumentali?

Uno degli strumenti più facilmente reperibili è l'accelerometro. Le altre grandezze significative (velocità e spostamento) possono essere ricavate tramite integrazione dei dati (operazione svolta automaticamente dall'apparecchiatura)



Non è sempre possibile collocare lo strumento in corrispondenza dell'elemento di cui si vuole rilevare l'accelerazione: basti pensare, per esempio, alle

difficoltà di collegamento (che deve essere “rigido”) del sensore ad una parete verticale, oppure alle fondazioni o, ancora, al terreno.

Spesso ci si deve limitare a rilevare i dati in corrispondenza di punti accessibili e, successivamente, ad estrapolarli.

Una possibile procedura per l'estrapolazione dei dati è la seguente:

1. si crea un modello matematico della struttura (usualmente con il noto “Metodo degli Elementi Finiti”).
2. Per successivi tentativi si fanno variare, entro intervalli accettabili, i valori delle grandezze meccaniche significative ai fini del calcolo strutturale (moduli elastici, di Poisson, etc), fino ad ottenere, nei punti del modello corrispondenti a quelli dove è stato applicato l'apparecchio di misura, lo spostamento realmente rilevato.
3. Si utilizzano i risultati del modello per ottenere dati significativi, ai fini delle verifiche, in ogni altro punto della struttura.

○○○○

Pur ricercando quante più informazioni possibili sulle grandezze significative, e pur spingendo le indagini ad un ottimo livello di dettaglio, rimane sempre aperto un ampio fronte di dubbi interpretativi sulle cause dei danni.

In questo campo, per concludere con ragionevole certezza se le vibrazioni siano, o meno, causa – meglio: concausa – dei danni, è fondamentale l'esperienza del tecnico.

Può essere interessante osservare che **l'esperienza si acquisisce anche con l'osservazione e lo studio di edifici danneggiati in assenza di fenomeni vibratorii**. Infatti, è forse proprio il procedere con l'esclusione di altre cause che porta alle conclusioni più attendibili (ed è evidente che, per escludere una causa, occorre conoscere la stessa ed i suoi effetti).

- Nella grande maggioranza dei casi legati a vibrazioni prodotte da attività dell'uomo, comunque, le vibrazioni sono concausa – e non causa unica – dell'insorgenza o del propagarsi di danni.
- Principalmente, le vibrazioni concorrono al danneggiamento dei fabbricati per l'assestamento, non uniforme, che provocano nel terreno di fondazione.

## *Scheda n. 8 – Interventi di mitigazione del disturbo*

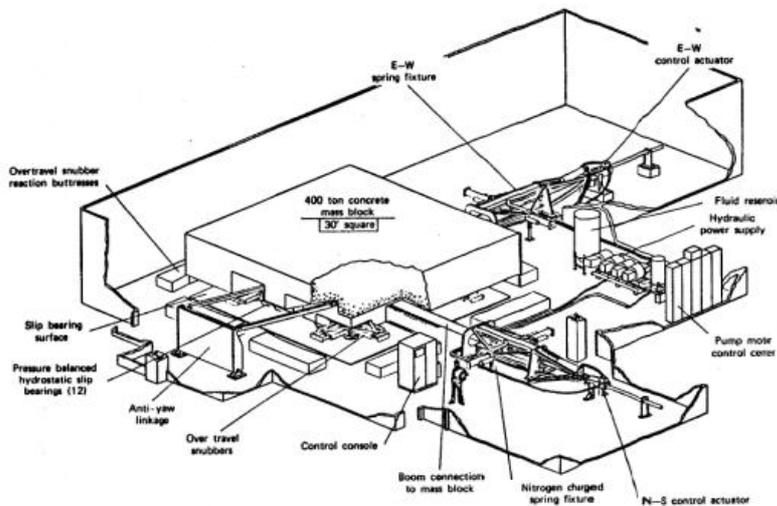
Le strade percorribili per la mitigazione del danno prodotto da vibrazioni, quando non sia possibile ridurre l'intensità della sorgente, sono:

- a) **Variazione della massa** dell'edificio ricevente mediante l'aggiunta di masse, opportunamente collocate, e collegate con elementi elastici e viscosi (tali dispositivi sono identificati come "tuned mass damper", ovvero "smorzatori a massa accordata"). Variando la massa e lo smorzamento dell'elemento ricevente variano, di conseguenza, gli effetti delle vibrazioni sollecitanti.

Esempio di applicazione:



*First City National Corporation (Citicorp Center), New York, USA (h = 275 m)*



Smorzatore a massa accordata installato nel Citicorp Center (peso di circa 370 t)

Una soluzione di questo tipo è raramente proponibile per mitigare i danni da vibrazioni indotti da sorgenti legate all'attività dell'uomo.

**Problema principale:** le masse in gioco in un edificio sono, in generale, molto grandi. Apportare variazioni significative a strutture esistenti comporta l'adozione di dispositivi pure dotati di massa elevata. Sorgono, quindi, problemi in merito alla loro localizzazione ed al collegamento alle strutture esistenti. Questi dispositivi trovano applicazione se previsti in fase progettuale.

○○○○

b) **Variazione della rigidezza** dell'edificio ricettore, mediante interventi di rinforzo sulla struttura, eventualmente anche con interventi sulle fondazioni.

Esempio di applicazione:

Scuola Domiziano Viola – Potenza



**Problema principale:** interventi complessi e costosi, che possono comportare anche significative demolizioni parziali dell'esistente, con conseguenti notevoli disagi per gli occupanti.

Anche questo tipo di soluzione è raramente proponibile per mitigare i danni da vibrazioni indotti da sorgenti legate all'attività dell'uomo.

Interventi più modesti, eseguibili su strutture a muratura portante, e proponibili per mitigare i danni conseguenti a vibrazioni prodotte dall'attività umana possono concretizzarsi in irrigidimenti:

- delle murature (con l'esecuzione di "armature" opportunamente diffuse)

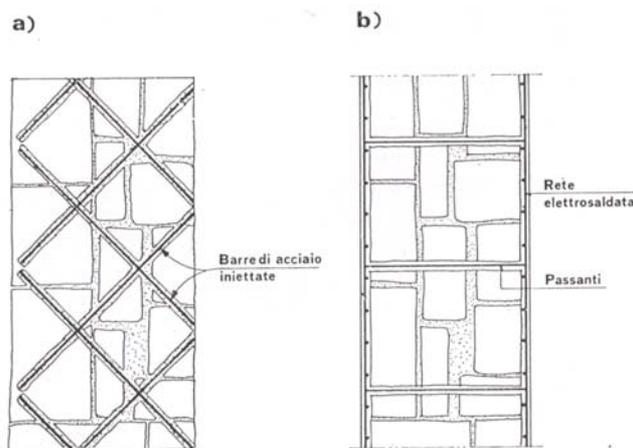


Fig. 20.20 - Consolidamento di strutture murarie: a) con iniezioni armate; b) con intonaci cementizi retinati.

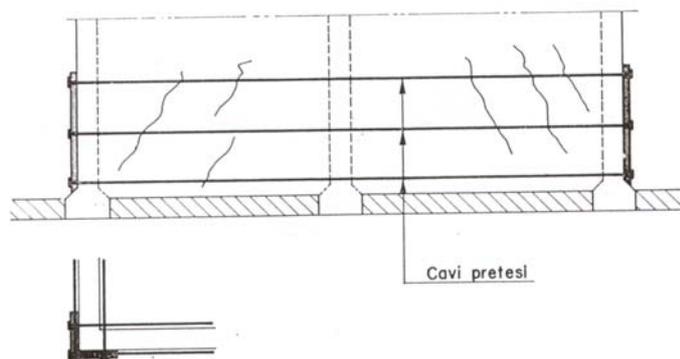
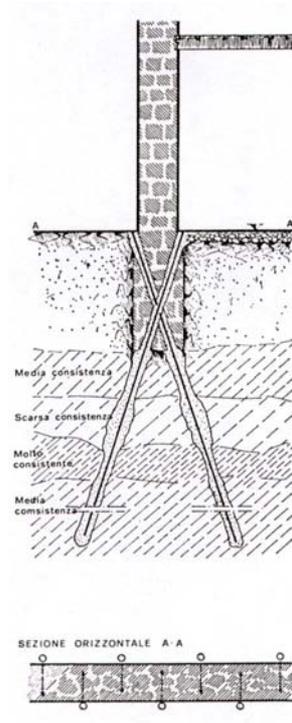


Fig. 20.21 - Consolidamento di pareti di base di edifici in muratura mediante cavi di acciaio pretesi.

- delle fondazioni:



- eventualmente anche con l'interposizione di elementi dissipatori sotto le fondazioni



○○○

c) **Interposizione di uno schermo**, tra sorgente ed edificio ricevente, lungo il mezzo di propagazione della vibrazione (quindi, nel terreno). Tale schermo è, generalmente, costituito da due paratie, o diaframmi, paralleli tra loro, in cemento armato, con interposta una miscela di cemento e fanghi bentonici (bentonite = miscela argillosa costituita in prevalenza da silicato idrato di alluminio), secondo proporzioni da definire sperimentalmente.

Barriere di questo tipo forniscono smorzamenti più significativi delle vibrazioni verticali, piuttosto che di quelle orizzontali. Ciò è presumibilmente dovuto al fatto che le particelle interne alla barriera tendono a trasferire la vibrazione orizzontale nella zona da schermare, mentre tendono a trasferire la vibrazione verticale negli strati più profondi.

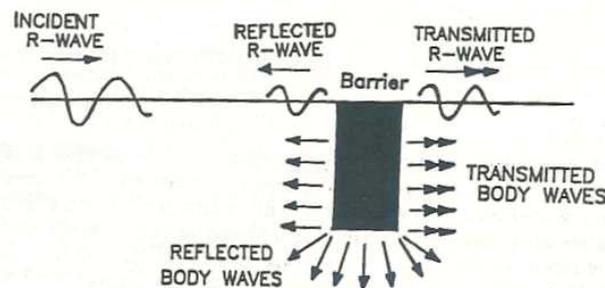


FIG. 6. Waves Generated due to Incident Rayleigh Wave on Solid Wave Barrier

**Principale problema:** elevata aleatorietà dello smorzamento (per la difficoltà nella caratterizzazione dei parametri dinamici che governano il problema), costi elevati.

**Indicazioni (di larga massima) per il dimensionamento di barriere smorzanti:**

( $\lambda_R$  = lunghezza dell'onda di Rayleigh)

➤ Lo spessore  $t$  dello schermo deve essere:

$$t > 0.4 \lambda_R$$

(maggiore è lo spessore, maggiore è, in generale, l'effetto schermo. Con il valore minimo sopra indicato ci si può attendere una riduzione in ampiezza dell'onda di circa il 40%)

- La profondità **h** dello schermo deve essere compresa tra:

$$0.6 \lambda_R < \mathbf{h} < 1.5 \lambda_R$$

- La distanza **d** dello schermo dalla sorgente deve essere:

$$\mathbf{d} > 5.0 \lambda_R$$

○○○○

**d) Riduzione delle vibrazioni alla sorgente, mediante:**

- sospensione elastica dei macchinari mediante opportuni elementi smorzanti



- irrigidimento della fondazione ⇒ è prassi realizzare una fondazione con massa molto elevata (> 5 volte la massa della macchina), ovvero prevedere fondazioni su pali

Questi ultimi tipi di soluzioni sono indubbiamente preferibili, anche perché, intervenendo sulla sorgente, i parametri da controllare sono in quantità inferiore e, soprattutto, di più facile definizione.