



Appunti di acustica pratica N°2.- 20110625

Danni agli edifici da vibrazioni trasmesse dal terreno.-



bruno.abrami@tin.it - Tel:335 6187429

B.Abrami

Spectra srl. - Strumentazione e software per l'acustica e le vibrazioni. -

Presentazione degli appunti.- Gli appunti di acustica pratica non sono da considerare come un testo o un trattato, vogliono semplicemente richiamare l'attenzione su aspetti ignorati o, secondo me, mal interpretati da chi fa il mestiere di consulente in acustica in Italia. Per acustica intendo implicitamente le vibrazioni perché sono la stessa cosa, cambiano solo il mezzo e gli effetti.- Quello che vien qui scritto ha lo scopo di stimolare lo studio e l'approfondimento della materia e il confronto fra gli addetti ai lavori.- Per acustica pratica intendo quella conoscenza così approfondita della teoria che consente di vedere - immediatamente - in ogni caso pratico, la o le leggi dell'acustica dominanti il fatto.- Gli appunti sono caratterizzati da un numero e una data, stesso numero e data diversa vuol dire che sono stati aggiunti nuovi casi o nuove osservazioni.-

1. - Premessa.- Correva l'anno 2001, e un cliente cercava con insistenza di coinvolgermi in una CTU che riguardava un caso di lesioni da vibrazioni ad un edificio, la sorgente era costituita da un impianto di telai per segare blocchi di marmo. In un primo momento mi rifiutai pensando:"cosa ne so io di strutture e loro resistenza dinamica a rottura....."; poi, continuando l'insistenza, feci una ricerca bibliografica individuando tre articoli molto buoni^{1,2,3} e un paio di relazioni tecniche fatte da colleghi. Il materiale scientifico era illuminante le relazioni dei colleghi molto lontane dallo stato delle conoscenze tecniche e scientifiche, diciamo incongruenti. Decisi che potevo far molto meglio e accettai l'incarico.- L'incongruenza delle relazioni tecniche stava nell'attribuire a vibrazioni dell'ordine dei zero virgola millimetri al secondo di velocità di picco, danni con lesioni strutturali in un caso filiformi e nell'altro di tre-quattro millimetri di spessore. Veniva citata come causa un possibile, ma non meglio identificato⁴, fenomeno di fatica^{5,6} o la affermazione generica del "non potersi escludere la vibrazione come causa delle lesioni"..... per quale motivo, non è dato sapere, ma questo hanno scritto e firmato.



Valori di velocità di vibrazione dell'ordine dei zero virgola millimetri al secondo (lineari) sono tattilmente percettibili (con piedi o glutei) come leggero movimento del supporto e, di regola, l'imputazione della sorgente come causa di lesione parte dalla percettibilità tattile della vibrazione da essa prodotta. Dalle pubblicazioni scientifiche risultava con ogni chiarezza possibile che danni alle strutture di un edificio potevano risultare da valori di vibrazione superiori di una o due decadi ai valori citati in quelle relazioni, se restiamo nel campo della osservazione vibrotattile, per vibrazioni tattilmente percettibili oggettivamente paurose da sperimentare. L'incongruità dell'attribuire a vibrazioni di quell'ordine di grandezza l'origine di lesioni, ancora prima delle considerazioni su forze a carichi di rottura, risulta dal seguente dato sperimentale: se si esegue un monitoraggio in un qualsiasi edificio che sia abitato, senza sorgenti di vibrazione esterne e senza lesioni, è normale trovare valori reiterati di $1-1,5 \text{ mms}^{-1}$ di picco indotti dalle attività degli abitanti.

2.- Considerazioni a carattere generale.- Le vibrazioni indotte nelle abitazioni da attività di cantiere, o cava, o traffico ferrato o su gomma, possono essere notevoli nella loro percettibilità tattile ma la probabilità che possano produrre danni estetici o strutturali⁷ è molto bassa. Le volte in cui sia verificata la responsabilità delle vibrazioni nella formazione del danno, questo si accompagna quasi sempre con un difetto costruttivo che favorisce la formazione della lesione.-

In Italia abbiamo una norma che fornisce le linee-guida per indagini di questo tipo ed è la UNI9916 e suoi aggiornamenti. Questa si ispira alla norma europea-base che è la DIN 4150-3. Se si guardano altre norme europee, statunitensi, australiane, ecc, si osservano limiti molto più alti imputati di solito alle diverse modalità costruttive, ma tutto fa pensare che la DIN 4150-3 abbia adottato dei limiti cautelativi rispettati i quali non c'è probabilità di insorgenza di lesioni anche solo estetiche in un edificio ben costruito.-

Se si crede che ci possano essere danni alle abitazioni da una attività di cantiere tipo la battitura di pali o una demolizione, o lo scavo di una galleria, allora è importante fare eseguire una indagine dello stato dell'edificio prima che incominci l'esposizione alle vibrazioni (o comunque al più presto possibile), monitorare le vibrazioni in corso d'opera, qualora queste superino le soglie di rischio consigliare approcci diversi all'opera di cantiere. Alla fine dell'opera verificare se c'è stata una variazione del quadro fessurativo dell'edificio, avendo a riferimento le osservazioni precedenti l'inizio della attività del cantiere. Non è sufficiente verificare il quadro fessurativo dell'edificio una volta finita l'opera, trovare delle lesioni che il più delle volte pre-esistevano inosservate all'opera, e imputarle alle vibrazioni.-



Le norme DIN & UNI prevedono dei limiti conservativi, di origine empirica, espressi come velocità massima di picco delle particelle - ppv - o come componente della velocità massima di picco delle particelle - pcpv - a seconda di come sono stati acquisiti i dati empirici. Questi limiti vogliono prevenire l'insorgenza di lesioni estetiche, vanno considerati come una soglia di buona pratica da rispettare in corso di cantiere. Vengono distinti i limiti per vibrazioni transienti e continue perché il fattore di smorzamento delle strutture edilizie è dell'ordine di 0,01 - 0,08 e sono quindi necessari alcuni secondi di eccitazione continua per portare le strutture alle massime ampiezze di vibrazione in corrispondenza delle frequenze di risonanza. Queste durate vengono raggiunte dalle vibrazioni continue e non da quelle transienti (esclusi i transiti ferroviari che possono durare da 4 - 120 secondi). In generale si assume che per vibrazioni continue la soglia vada abbassata alla metà di quella per vibrazioni transienti, fatta eccezione per il limite inferiore di 3 mm s^{-1} che si colloca poco sopra i valori di picco di fondo di un edificio abitato.-

Si assume inoltre che oltre all'ampiezza della vibrazione vada considerato anche lo stato degli edifici. Questi vengono normalmente distinti per grado di resistenza meccanica in storici⁸-fatiscenti, residenziali, industriali. Sono distinzioni grossolane in quanto ci aspettiamo comportamenti dinamici diversi per una rovina storica e il Maschio Angioino; un grattacielo o una casa di tre piani. Sta al professionista fare quelle considerazioni complessive che porteranno alla diagnosi: lesione da vibrazione o da altra causa.- Fra le cause che sono più frequentemente all'origine di lesioni agli edifici vanno annoverate, in ordine di frequenza, i cedimenti del terreno di fondazione, la dilatazione termica, le infiltrazioni di umidità.-

3.- Alcune considerazioni storiche.- Le più frequenti reazioni di autodifesa da vibrazioni della popolazione sono innescate principalmente dalla percettibilità tattile delle stesse. Dalla impressione della loro "spiacevolezza" si conclude che possano lesionare l'edificio. Il più delle volte la misura delle vibrazioni e l'analisi strutturale mostrano la loro impossibilità di produrre lesioni. Le sorgenti che storicamente sono state all'origine di queste reazioni di autodifesa sono: volate di cava, infissione di pali, scavo di gallerie, transiti gommati pesanti su asfalti in cattivo stato di manutenzione, transiti ferroviari molto vicini alle abitazioni o da materiale rotabile in cattivo stato di manutenzione.-



Il dibattito su cosa misurare si è fermato nel 1968 con R.Gasch (ref.9) che ha dimostrato come, in condizioni di risonanza, le sollecitazioni dinamiche delle strutture siano proporzionali alla velocità di vibrazione. E' stato anche importante comprendere come la stima del danno da vibrazioni non si basa sul solo valore della velocità, occorre considerare anche le condizioni generali dell'edificio, il tipo di costruzione e i rapporti con il terreno di fondazione. La prima DIN 4150 del 1939 non trattava le lesioni da vibrazioni che sono state normate con la DIN4150-3 del 1975. Questa DIN ha cercato di semplificare la procedura di valutazione adottando dei limiti di velocità così bassi da dover escludere la loro pericolosità anche nelle condizioni più sfavorevoli. Al superamento di questi limiti, se ci sono lesioni, occorre sempre e comunque che sia un professionista a stabilire se le lesioni siano dovute a vibrazioni o ad altra causa.

Nello sviluppo di queste competenze la filosofia fondamentale è stata che era impraticabile, almeno in prima istanza, fare un gran numero di misure in tanti punti all'interno di un edificio, ma che era meglio misurare la vibrazione del terreno come indicatore del potenziale danno. Sono stati proposti diversi parametri come indicatori della possibilità di danno ma, alla fine, viene generalmente accettato che il miglior descrittore sia la velocità delle particelle⁹. E' una grandezza semplice da misurare ed è conveniente

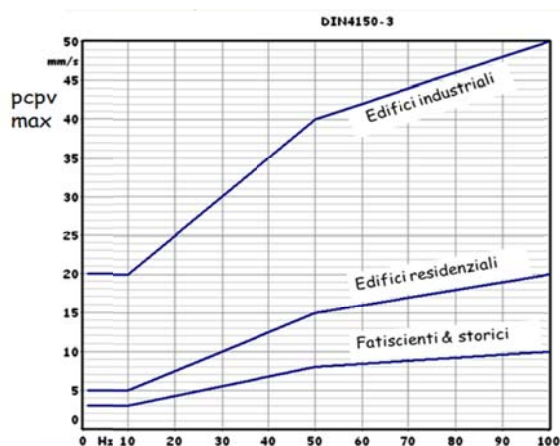
usarla come limite per valori accettabili di vibrazione quando misurata al perimetro dell'edificio. Ovviamente prendere delle misure solamente all'esterno dell'edificio può essere un indicatore molto approssimativo per valutare il rischio di danno all'interno dell'edificio. Per avere un quadro di insieme attendibile occorre valutare il tipo di struttura, particolari del progetto e lo stato generale di manutenzione. In particolare sono da considerare gli effetti delle risonanze strutturali, perché queste possono far sì che all'interno dell'edificio si possano trovare valori fino a 10 volte (20 dB) maggiori di quelli misurati al basamento. Se troviamo un $pcpv_{max}$ di $0,1 \text{ mms}^{-1}$ al basamento allora sappiamo che al massimo, nel punto più risonante dell'edificio, avremo un $pcpv_{max}$ di $1,0 \text{ mms}^{-1}$ e li possiamo tranquillamente ignorare. Se troviamo $3,0 - 5,0 \text{ mms}^{-1}$ al basamento allora incominciamo a considerare, visitando l'edificio, dove potremo avere delle risonanze e dove ripetere la misura.-

4.- Cosa si misura e i limiti.- Due sono gli elementi da prendere in considerazione: la velocità delle particelle (particle velocity - pv) e la frequenza.- Si parla di velocità delle particelle intendendo la velocità di vibrazione di un punto solido posto sul percorso dell'energia vibratoria che si propaga alla velocità di fase "c".- Si introduce la distinzione (fase, particelle) per non far confusione fra i due fenomeni:

1. velocità con cui si propaga il fronte d'onda (velocità di fase);
2. velocità e direzione in cui oscillano localmente le particelle del mezzo attraversato dal fronte d'onda (velocità delle particelle nelle direzioni X, Y, Z).-

Dal punto di vista dell'ampiezza della vibrazione si misura il massimo valore istantaneo delle particelle (peak particle velocity - ppv) in un dato punto in un determinato intervallo di tempo. PPV è il vettore e dà un valore indipendente dall'orientamento del trasduttore.- Alcune norme (UNI e DIN) sono invece basate sulla componente la velocità massima delle particelle in una delle tre direzioni ortogonali secondo le quali è orientato il trasduttore (Peak component particle velocity - pcpv) in un determinato intervallo di tempo¹⁰.- La frequenza è la frequenza dominante dello spettro del segnale comunque complesso dell'evento, ma normalmente è una componente "monofrequenza" determinata dalla risonanza dominante della struttura.-

A destra vediamo lo schema proposto da DIN4150-3 & UNI9916: si tratta di limiti per vibrazioni transienti espressi come valore massimo istantaneo della componente maggiore ($pcpv_{max}$) delle tre, misurate in direzioni ortogonali. Valori inferiori alla soglia indicano la non possibilità di formazione di lesioni vibrazioni-correlate. Valori superiori non indicano necessariamente la comparsa di lesioni vibrazione-correlate, ma occorre integrare la misura con una analisi delle sollecitazioni là dove particolari della struttura dell'edificio fanno pensare ad una debolezza intrinseca. La misura va fatta al basamento dell'edificio in corrispondenza di una parete portante. Per vibrazioni a carattere continuo le soglie cambiano sensibilmente e sono riportate nella tabella seguente, la soglia per vibrazioni continue è frequenza-indipendente.-



DIN4150-3 Soglia per vibrazioni continue, solo componenti orizzontali X & Y.-			
Riga	Tipi di edificio	Valori di riferimento come pcpv max "x" o "y" in mms^{-1}	Il trasduttore va posizionato in corrispondenza di una parete portante
		Ultimo solaio, solo componenti orizzontali, tutte le frequenze	
1	Edifici industriali	10	
2	Edifici residenziali	5	
3	Fatiscienti & storici	2,5	

5.- Come misurare e dove misurarlo.- Vanno misurate le tre componenti ortogonali della velocità della vibrazione. Per eventi transienti o impattivi vanno misurate simultaneamente, una verticale e due trasversali. Occorre usare un trasduttore triassiale. Va inoltre registrata la storia dei valori istantanei sui tre assi, senza alcuna ponderazione temporale (il mio amico Armani direbbe che si registra la forma d'onda). In questo modo si potranno ricavare le componenti o pcpv, o il valore assoluto o ppv e trovare la frequenza dominante. La misura va fatta al basamento dell'edificio, in vista della sorgente, alla distanza minore dalla sorgente, con uno degli assi orizzontali parallelo alla parete dell'edificio. Se l'edificio non c'è (misura previsionale) uno degli assi orizzontali va orientato parallelo alla parete dell'edificio che sorgerà.-

Se si vuole una rappresentazione dettagliata della risposta dell'edificio, quando dalla prima misura e dalla considerazione dei fattori di merito delle risonanze, risultasse la possibilità di superamento della soglia, allora sarà necessario usare più punti di misura: al basamento, all'ultimo piano, ed in ogni particolare della struttura dell'edificio nel quale è plausibile la presenza di una risonanza e quindi la comparsa di una lesione. In alcuni casi si sceglie di misurare anche la componente verticale al centro dei solai dei vari piani.- Se l'edificio copre un'area molto grande coinvolta nel fronte d'onda, allora sarà necessaria una misura contemporanea su più punti al basamento.-

6.- La strumentazione necessaria.- Prendendo a riferimento la velocità delle particelle come indicatore del danno è preferibile eseguire la misura con un velocimetro; si può usare anche un accelerometro, integrando il segnale di accelerazione ($v = a/2\pi f$), ma occorre che l'integratore sia di tipo digitale e non analogico. Un integratore analogico, alla presenza di vibrazioni impattive, potrà produrre dei valori di $pcpv_{max}$ due o tre volte più alti di quelli misurati con il velocimetro. Se le misure sono del tipo ante-opera, e sono fatte all'esterno, allora va scelto un accelerometro da minimo 100 mV/ms^{-2} e con una sensibilità ai transienti termici minore di $0,0001 \text{ ms}^{-1}/^{\circ}\text{C}$; un comune accelerometro¹¹ con una sensibilità ai transienti termici dell'ordine dei $0,1 \text{ ms}^{-1}/^{\circ}\text{C}$ produrrà un rumore termico, equivalente alla velocità di vibrazione, di $0,3 - 1,0 \text{ mms}$, o più, senza che vi sia nessuna sorgente di vibrazioni associata.-

Nella figura a destra possiamo vedere il velocimetro triassiale 3D Seismometer¹² con sensibilità dell'ordine dei 27 V/ms^{-1} e la terna accelerometrica Spectra393 fatta da singoli accelerometri da 1.000 mV/g ad alta immunità ai transienti termici, entrambi commercializzati da Spectra srl.-

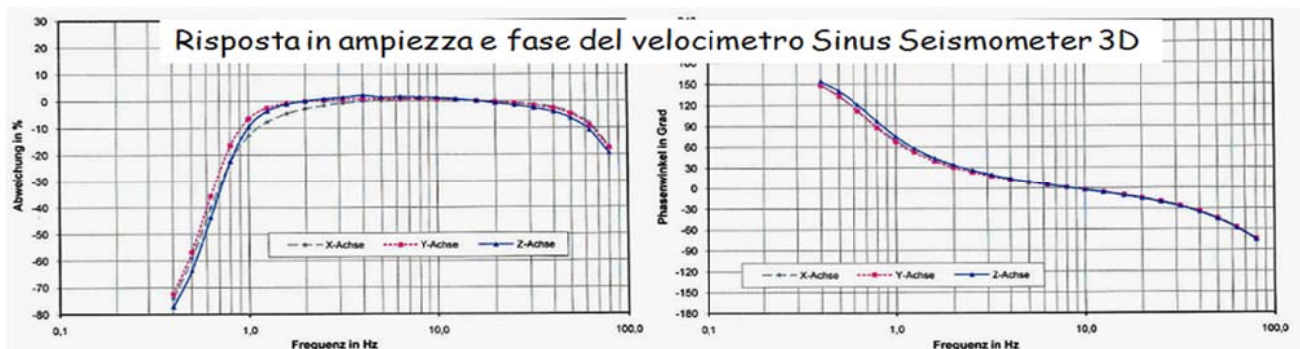


Velocimetro triassiale

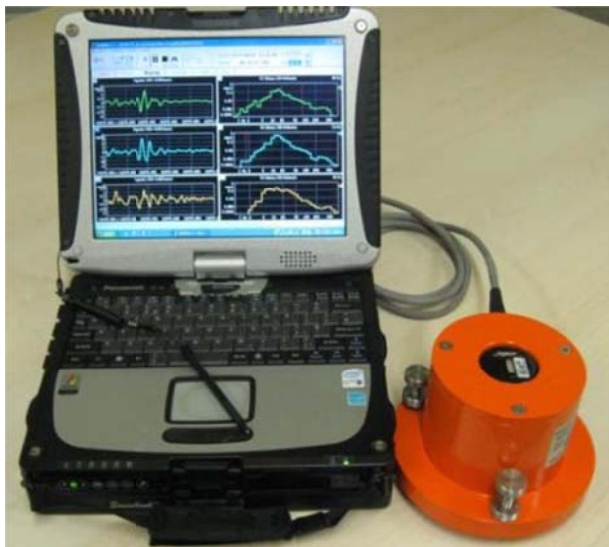


Terna accelerometrica a bassa sensibilità ai transienti termici

Le norme consigliano l'uso di trasduttori che coprono frequenze ed ampiezze tipiche di questi fenomeni, a volte esagerando, come quando chiedono campi di frequenze da 1 a 1.000 Hz ed ampiezze da $0,2$ a 500 mms^{-1} (BS 7385), più realisticamente sarà sufficiente coprire il campo di frequenza da 3-4 a 250-300 Hz e da $0,01$ a 50 mms^{-1} .-



Il velocimetro 3D Seismometer è un velocimetro speciale, è compensato elettronicamente per una risposta in ampiezza e fase conformi alla DIN 4150-3 come da diagramma sovrastante; può essere fornito con limite superiore in frequenza fino a 315 Hz.- Sebbene un velocimetro sia un trasduttore auto-generante (legge di Lentz), l'elettronica di compensazione della risonanza richiede un'alimentazione che viene fornita da un classico ingresso ICP¹³.-



Per la acquisizione va usato un analizzatore con almeno tre canali, ma normalmente ce ne sono da 2, 4, 8, 16 ecc. L'analizzatore deve poter registrare la forma d'onda nel tempo (i valori istantanei senza ponderazione temporale) e lo spettro. Nella foto a sx vediamo l'analizzatore Soundbook¹⁴ di Spectra srl, a quattro canali.- Si tratta di un PC militare costruito solidale con un analizzatore di spettro da 2, 4 o 8 canali; le misure vengono gestite dal software SAMURAI¹⁵.- Nei tre riquadri a sx si possono vedere i valori istantanei della velocità della vibrazione prodotti da un impatto, dall'alto verso il basso, per gli assi X, Y & Z; nei tre riquadri a dx si possono vedere i rispettivi spettri a 1/3 di ottava da 0,8 a 800 Hz, o a scelta, a larghezza di banda costante

(FFT) o contemporaneamente nell'uno o nell'altro modo. Gli spettri di 1/3 di ottava della figura presentano ampiezze efficaci su scala logaritmica, avendo con questo il vantaggio di poter visualizzare insieme alla misura anche il rumore, potendo così tenere sempre sotto controllo una possibile sorgente di artefatti. Volendo vedere le ampiezze degli spettri in scala lineare si può passare, in corso di misura, alla scala lineare senza interferire con l'acquisizione. SAMURAI consente la registrazione audio e video sincrona alla misura vedi filmato a: <http://www.spectra.it/download/vibrazioni/Documentarelasorgentedivibrazioni.zip>

Alla fine della acquisizione il software SAMURAI consente di rivedere tutta o, a scelta, una parte della storia della misura come in un filmato, cambiando le scale, visualizzando, purché acquisite, anche altre funzioni, come lo spettro FFT, i livelli sonori, riascoltando sia gli eventi sonori che quelli vibratorii.-

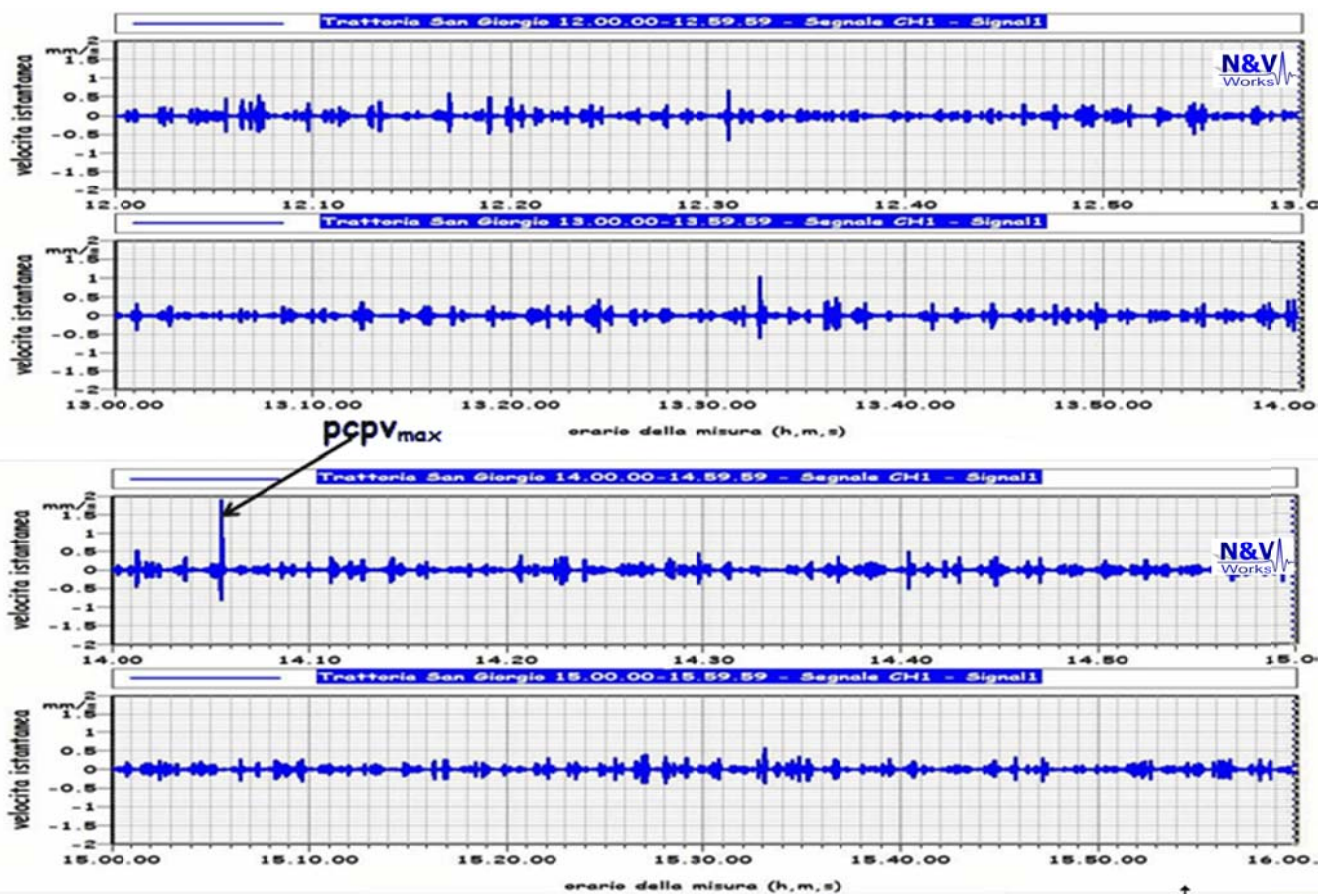
Un aspetto problematico di queste misure consiste nel fatto che quando abbiamo a che fare con sorgenti aleatorie come traffico gommato su asfalto sconnesso o demolizioni o scavi, o transito di trasporto su ferro dove lo stato di usura dei carrelli può variare sensibilmente da una motrice alla successiva, dando così origine ad eventi vibratorii sensibilmente diversi, occorre fare un monitoraggio che può durare anche molte ore.



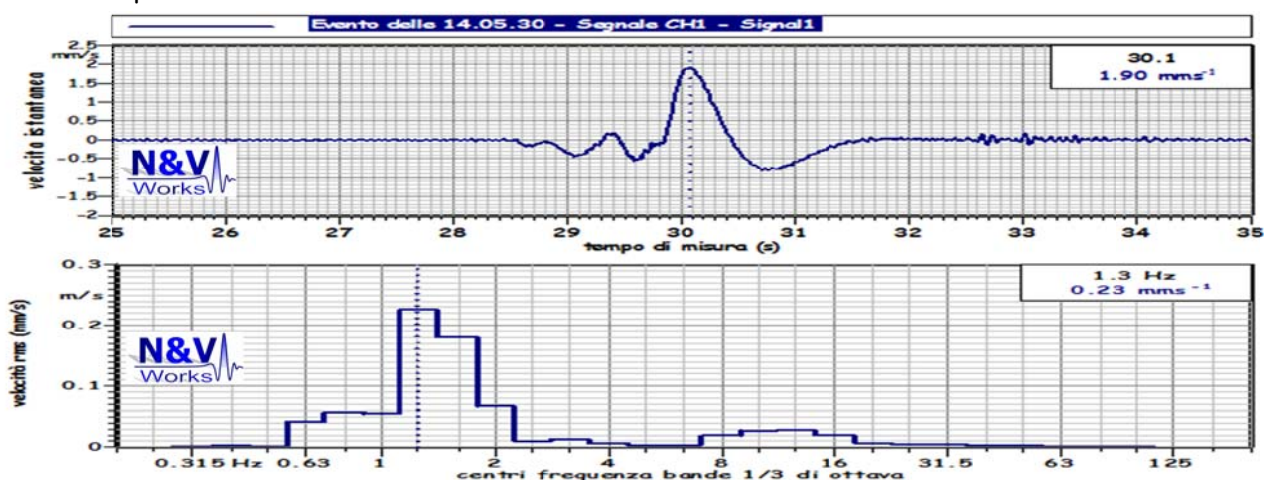
Nella figura sovrastante a sx possiamo vedere la sorgente della vibrazione (avvallamento dell'asfalto in corrispondenza di un tombino) a dx vediamo la postazione di misura.- L'energia dell'impatto dipenderà, in

prima luogo, se i mezzi pesanti prendono o non prendono la buca, in secondo luogo se la prendono in pieno o in parte, in terzo luogo con che velocità la prendono, in quarto luogo da quanto sono carichi. Ce n'è per tutti i gusti.- Terminata l'acquisizione, si può trasferire la misura sul software Noise & Vibration Work¹⁶ al fine di visualizzare la storia dei valori istantanei, dalla quale ricaveremo $pcpv_{max}$.- A seguire vediamo solo quattro ore tratte da un monitoraggio di otto ore, per vibrazioni indotte in una abitazione da traffico gommato su asfalto sconnesso.-

Storia dei valori istantanei, asse X (coassiale alla direzione del traffico).-

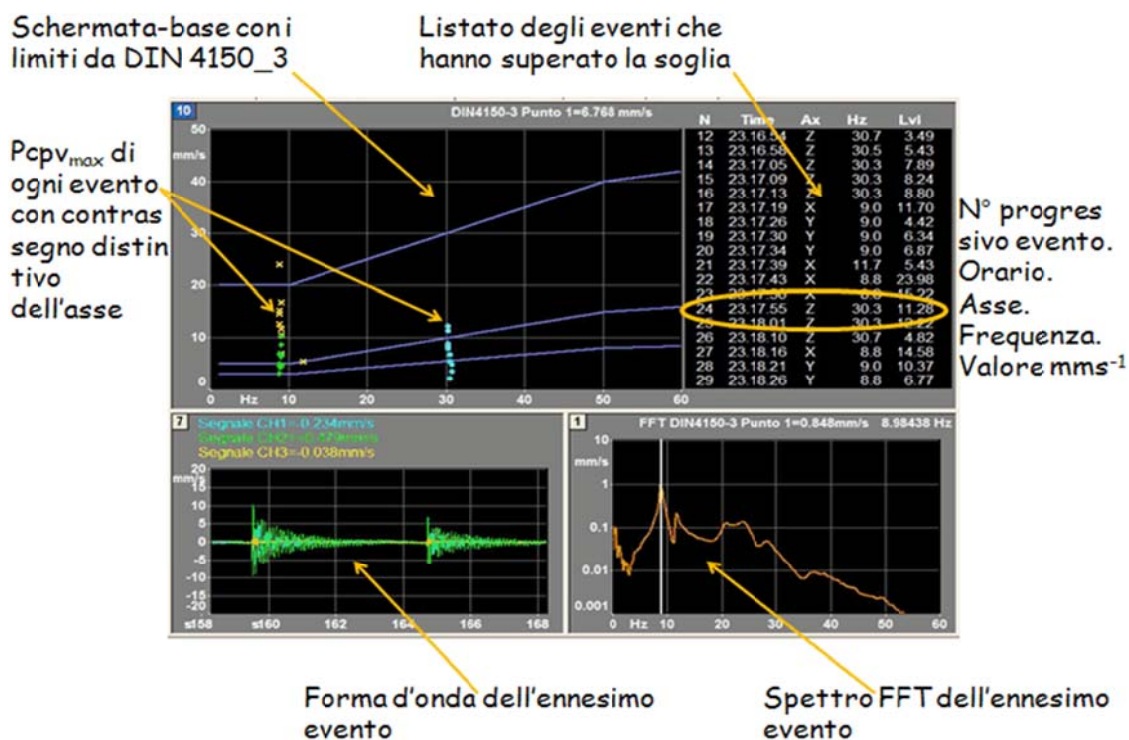


E' evidente come sia una procedura laboriosa, anche considerato il fatto che bisogna poi andare a vedere quale sia lo spettro dell'evento massimo avvenuto alle 14.05.30 circa.-



Nella figura soprastante vediamo un espansione (Zoom) dell'evento massimo e lo spettro corrispondente.-

Per rendere la visualizzazione dei risultati contemporanea alla acquisizione è stata fatta una opzione di SAMURAI chiamata Opt.DIN4150; l'opzione funziona a soglia definibile dall'utente. Quando un evento supera la soglia viene memorizzata la sua forma d'onda, identificato l'asse (X,Y o Z) massimo, eseguita la FFT con finestra di Hannings simmetrica sul picco massimo come richiesto da DIN4150-3, inseriti i dati nel listato storico del monitoraggio. Nella figura sottostante è visibile l'interfaccia utente così come appare sullo schermo di Soundbook.-



Gli eventi così registrati sono trasferibili su Noise & Vibration Work per possibili ulteriori elaborazioni o per una stampa della relazione tecnica.-



Una alternativa economicamente più conveniente a Soundbook è costituita dall'analizzatore a 4 canali "Apollo" della Sinus. Apollo rappresenta una evoluzione del sistema Harmonie, sia nelle prestazioni, sia nella modalità di comunicazione con il PC. Harmonie funziona solo con la porta PCMCIA, Apollo può essere usato con qualunque PC, anche i più recenti perché comunica via USB. E' gestibile sia da piattaforme a 32 bits che a 64 bits. Il software SAMURAI che pilota Apollo va

installato sul vostro PC, o su uno dedicato, e fornisce le stesse prestazioni di misura ed analisi fornite da Soundbook:

- conforme alle norme IEC651 tipo 1 e IEC804 gruppo I, IEC61672 classe 1, con opzione Human Vibration Meter & Analyzer conforme alla ISO8041;
- funzioni fonometriche con ponderazioni A,C,Lin e acquisizione parallela LAeq,t; F,S,I,Picco con dinamica di 120 dB/canale;
- analisi in frequenza contemporanea in FFT, 1/3 & 1/1 ottava, 1/n da 1/6 ad 1/48 di ottava;
- funzioni correlate fra i canali come la risposta in frequenza (FRF), la cross correlazione,ecc.

7.- Fissaggio dei trasduttori.- Un capitolo particolare merita il fissaggio dei trasduttori. Il principio generale è che affinché la misura sia tale, in teoria, il trasduttore deve muoversi solidariamente con la superficie vibrante a tutte le frequenze (tutte sono tante...). Per ottenere questo risultato occorrerebbe quanto meno incollare il trasduttore o mettere giù un tassello per avvitarlo.... la padrona di casa ci caccerebbe a scopate. Mi ricordo di un caso di lesioni da cedimento del terreno di fondazione in cui mi sono trovato perché mi era stato chiesto un parere. Non c'era una padrona di casa ma un padrone, evidentemente meno sensibile a fattori estetici. La sorgente era traffico gommato su superstrada, da poco allargata, con asfalto in ottimo stato di manutenzione. Basterebbe questa citazione dello stato dell'asfalto per dire che non ci potevano essere vibrazioni tali da pregiudicare alcunché. Il "consulente" che aveva fatto le misure aveva coscientemente bucato due pareti e pavimento, con tasselli da 12, almeno tre buchi per punto di misura, per fissare il velocimetro come da teoria¹⁷. La conseguenza era che le vibrazioni da traffico (impercepibili) non avevano prodotto alcun danno mentre il "consulente" aveva sderenato tutti i muri! Il livello del responso del "consulente" era coerente con i buchi nel muro:"sebbene le vibrazioni misurate presentano valori sensibilmente inferiori alla soglia di rischio (parliamo di $0,0XX \text{ mms}^{-1}$ di $pcpv_{max}$ misurati) non si può escludere che siano all'origine delle lesioni dell'edificio (n.d.a. tutte morfologicamente riconducibili a cedimenti del terreno di fondazione a seguito delle opere di sbancamento per l'allargamento della superstrada).-



Vuoi che non possiamo sderenare un appartamento per fare delle misure, vuoi che molte volte le dobbiamo fare in campagna, occorre trovare dei sistemi di fissaggio compatibili con lo scopo. Il primo punto da considerare è che non ci interessano "tutte" le frequenze ma solo quelle comprese nel campo da 0,8 a 200 Hz, e questo ci facilita la vita. Il secondo punto è che attendendo dei valori elevati di velocità e quindi di accelerazione non possiamo posizionare i velocimetri a gravità senza appesantirli con un basamento metallico da almeno 5 - 7 Kg o con un sacchetto ripieno di pallini da caccia dello stesso peso.

In primo luogo negli appartamenti. Se il pavimento è a piastrelle o a parquet (va verificato che il parquet non sia scollato) si può usare un nastro biadesivo sottile o la cera d'api. La cera va riscaldata con le mani applicata ai piedini della base e applicata alle piastrelle a pressione.



Ovviamente le piastrelle o il parquet non devono essere riscaldati, in questi casi è meglio il nastro biadesivo sottile. Anche il velocimetro può vincolarsi con cera d'api, se il pavimento lo consente. Se la pavimentazione è ricoperta di moquette vengono dati in dotazione dei puntali che consentono di bypassare lo strato elastico e arrivare a contatto rigido, anche in questi casi conviene caricare il velocimetro con il peso citato.-



I puntali arrotondati e a cono, dati in dotazione al velocimetro 3D Seismometer servono per metterlo a "bolla" per garantire il funzionamento ottimale degli equipaggi mobili dei tre velocimetri contenuti nel contenitore cilindrico.- Nella foto a sinistra sono visibili le due "bolle" da utilizzare insieme ai puntali regolabili per mettere in piano il velocimetro.-

Nelle misure in "campagna", su terreni incoerenti, abbiamo a che fare con il consolidamento e la saturazione del terreno; gli strati superficiali sono normalmente secchi e poco compatti e quindi poco adatti a trasmettere le vibrazioni. Appoggiando il trasduttore in superficie misureremo valori più bassi di quelli "visti" dalle fondamenta degli edifici, occorre quanto meno uno scavo cubico di minimo 50 centimetri di profondità (prescritto in tutte le norme), ma è meglio arrivare alla terra bagnata, sul fondo dello scavo si fisserà il trasduttore.-

In alternativa si può usare un profilato ad "L" in acciaio, appuntito da un lato, e con una basetta saldata all'estremità opposta (lo chiamerò "puntazza" in omaggio al mio passato triestino¹⁸). Il profilato ad L fornisce la base per attaccare gli accelerometri X & Y con un magnete, la basetta assolve lo stesso compito per l'accelerometro Z. In un caso abbiamo usato un profilato della una lunghezza di un metro¹⁹ che



si è poi rivelato difficile da piantare e ancora di più da estrarre. A piantarlo non c'è stato verso di portare la basetta al livello del terreno, come da intenzione originale; le mazzate deformavano il profilato ma questo non procedeva più di un millimetro, ad estrarlo abbiamo bagnato di sudore due camicie, la mia e quella dell'amico e collega Marco Pincelli (vedi nota 18). Occorre provvedere ad un occhiello o ad una sporgenza sulla quale poter far leva per l'estrazione.-

Credo che una lunghezza di un metro sia eccessiva alla esperienza successiva ho usato "puntazze" non superavano i 70 centimetri. La basetta va portata a livello del terreno per evitare amplificazioni da risonanza. Una volta piantata la "puntazza" si possono fissare gli accelerometri con il magnete, tutti e tre o uno per volta a seconda di quanti canali di acquisizione si dispone e di cosa si vuol fare.-



Nel caso illustrato si trattava di valutare le vibrazioni impartite da traffico ferrato su una casa che sarebbe stata costruita dove c'era un campo di granoturco. L'accelerometro messo vicino alla scarpata ferroviaria ci diceva cosa partiva, e quello messo dove ci sarebbe state le fondamenta cosa arrivava, disponendo di un analizzatore a soli due canali (Larson & Davis Mod.2900) non c'era altra scelta che misurare la funzione di trasferimento un asse alla volta, attendendo il transito di almeno tre treni.-



Cercare di battere la puntazza fino a che la basetta sia a livello del terreno vuole evitare che la parte emergente dal terreno produca delle risonanze che amplificherebbero la vibrazione misurata. Nei frangenti pratici nei quali ci possiamo trovare.... la puntazza sporge e siamo a 200 km da casa.... Si può verificare la frequenza di risonanza (trasversale, quella verticale non esiste) semplicemente pizzicando con un dito la parte sporgente, con l'accelerometro messo su X o Y e leggere direttamente sull'analizzatore la frequenza di risonanza che, in questo caso era a 280²⁰-300 Hz, ben al di sopra del campo di nostro interesse che va da 0,8 a 100 - 150Hz.-

8.- Norme comportamentali per produttori e recettori di vibrazioni.- Chiunque intraprenda una attività suscettibile a immettere vibrazioni tattilmente percettibili nelle abitazioni, deve essere consapevole del fatto che queste vibrazioni desteranno grande preoccupazione nei residenti. Preoccupazione che prende la forma del timore che l'edificio venga lesionato dalle vibrazioni. Per evitare la insorgenza di azioni auto-difesa il responsabile dell'impresa deve cercare di contemperare la sua esigenza con quella dei residenti. Va comunicato l'inizio dell'attività, va comunicata la richiesta e l'ottenimento della autorizzazione da parte delle autorità territoriali competenti ad immettere vibrazioni entro un certo limite da specificare, ad esempio prendendo a riferimento la norma UNI9916. La cosa che non eliminerà la

percettibilità tattile delle vibrazioni, mantenendo quindi nello stato di apprensione i residenti, ma darà una veste ufficiale che potrà stemperare alquanto lo stato di apprensione.-

I proprietari di abitazioni esposte a vibrazioni trasmesse attraverso il terreno da attività di cantiere o da altre sorgenti, devono essere consapevoli del fatto che alcune lavorazioni o sorgenti possono immettere vibrazioni e che, nonostante queste siano tattilmente percettibili, raramente assumono valori tali da produrre danni alla proprietà. Se però si prevede che questa condizione di esposizione sia intollerabile in termini di inquinamento tattile, rumore re-irradiato e timore di danni alle strutture allora si può procedere con i seguenti passaggi:

- Chiedere all'Autorità Comunale di imporre al cantiere un piano di monitoraggio e verifica in corso d'opera, normalmente è sufficiente scrivere una lettera indirizzata all'assessorato competente per l'ambiente esprimendo i propri timori.-
- Se si pensa che le vibrazioni possano produrre lesioni agli edifici occorre predisporre un piano di verifica che consiste nei seguenti passi: 1) indagine visiva dello stato degli edifici con documentazione fotografica delle lesioni pre-esistenti accompagnata da una caratterizzazione delle vibrazioni di fondo all'interno degli edifici in termini di velocità di picco delle particelle, questa misura darà un quadro della naturale sollecitazione dell'edificio ad opera dei suoi abitanti; 2) monitorare in corso d'opera la velocità di vibrazione consigliando variazioni di approccio - se possibile - per quelle fasi che portano i valori vicino alle soglie di UNI9916; 3) ispezione visiva degli edifici una volta terminata l'opera con eventuale documentazione fotografica delle nuove lesioni se ci sono.-
- Nel caso restino inascoltate le istanze dei residenti conviene chiedere assistenza legale e tecnica rivolgendosi a professionisti del settore.-

Riferimenti.-

¹ R.J.Steffen, Structural vibration and damage, Building Research Establishment, 1974.-

² D.Asprone, E.Cadoni,A.Prota, G.Manfredi, Dynamic behavior of a Mediterranean natural stone under tensile loading, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 46(2009)514-520. Elsevier.-

³ Albertini C, Cadoni E, Labibes K. Mechanical characterization and fracture process of concrete at high strain-rates. In: Gjörv, Sakai, Banthia, editors. Concrete under severe conditions, vol. 2. London: E&FN Spon; 1998.p. 735-744.

⁴ Il fenomeno di rottura a fatica negli acciai - che il più noto - è condizionato al superamento di un valore di sollecitazione, al di sotto di quel valore ci può essere esposizione a miliardi di cicli senza rottura; da quel valore al carico ultimo (che applicato una sola volta porta a rottura), per ogni valore della sollecitazione esiste un numero finito di cicli cui il materiale può essere sottoposto prima di arrivare a rottura. Nell'alluminio e leghe non esiste il limite per la non rottura a fatica. Nei materiali edili (vedi rif.3, 5 & 6) esiste qualcosa di simile agli acciai, ma la sollecitazione per arrivare alla rottura a fatica deve essere dell'ordine di grandezza del 60-90% del carico di rottura a trazione. Nei marmi meno resistenti il carico ultimo a trazione è dell'ordine dei 10 Kg_p/cm². Se si va a calcolare la sollecitazione infrastrutturale di un edificio di tre - quattro piani che vibra, al basamento, da 0,5 a 1,0 ms⁻² lineari, (che è un valore che corrisponde a vibrazioni forzatamente percettibili da soggetti residenti non allertati) si trovano valori dell'ordine di qualche grammo_p/cm². Se anche si considerano possibili risonanze con fattore di merito massimo di 20 dB (10 volte) arriviamo a qualche decina di grammi_p/cm²; sono valori di sollecitazione che non possono dar luogo a fenomeni di rottura a fatica in nessun materiale.

Nella figura sottostante vediamo i carichi di rottura a trazione e taglio per alcuni materiali da costruzione. Bisogna poi dimostrare che una vibrazione produca sollecitazioni non dico superiori (ci vogliono i terremoti) ma almeno confrontabili.

Tipo di roccia	Caratteristiche	Fr flessione	Fr trazione	Fr compressione	Modulo elasticità	Peso specifico
Marmo Bianco (Carrara)	Calcere metamorfico microcristallino puro	140 kgp/cm ²	80 kgp/cm ²	1800 kgp/cm ²	7.10 ⁵ kgp/cm	2,7 t/m ³
Marna (Sentino - Valdorbia)	Calcere marnoso a grana fine compatto	120 kgp/cm ²	70 kgp/cm ²	1100 kgp/cm ²	5.10 ⁵ kgp/cm	2,7 t/m ³
Scaglia Rossa (Monte Subasio)	Calcere molto marnoso a grana fine fragile	40 kgp/cm ²	20 kgp/cm ²	300 kgp/cm ²	4.10 ⁵ kgp/cm	2,5 t/m ³
Travertino (Gole del Forello)	Calcere a grana fine molto puro e poroso	60 kgp/cm ²	30 kgp/cm ²	500 kgp/cm ²	2.10 ⁵ kgp/cm	2,4 t/m ³
Granito (Rosso del Sud Africa)	Con abbondante matrice quarzosa	200 kgp/cm ²	90 kgp/cm ²	2000 kgp/cm ²	5.10 ⁵ kgp/cm	2,8 t/m ³
Tufo Peperino (Pitigliano)	Roccia omogenea ma molto incoerente	50 kgp/cm ²	30 kgp/cm ²	400 kgp/cm ²	3.10 ⁵ kgp/cm	1,9 t/m ³
Cemento C 20/25	Secondo norme EC 2			200 kgp/cm ²		

⁵ R. Gasch, Assessment of dynamic stressing of structural members. VDI-Berichte, 113, 1967,pp77-81. BRS translation LC1649

⁶ I.L.Korchinskii; G.V.Becheneva, Strength of building materials under dynamic loads. Moscow, Izdatel'stro literatury po Sroitel'stru, 1966

⁷ Per danno estetico da vibrazioni : formazione di fessurazioni filiformi sull'intonaco, stacchi dell'intonaco, stacchi di coperture (piastrelle).



Per danno strutturale da vibrazioni: la formazione di fessurazioni che interrompono la continuità di una parete o di una giunzione verticale o orizzontale. Il danno strutturale è visibile, nella maggior parte dei casi, da entrambi i lati di una parete. Molte volte i due lati della fessura sono sfasati nella direzione normale al piano di alcuni millimetri. La lesione strutturale da vibrazioni prodotte da attività umane non intacca l'equilibrio statico di un edificio.

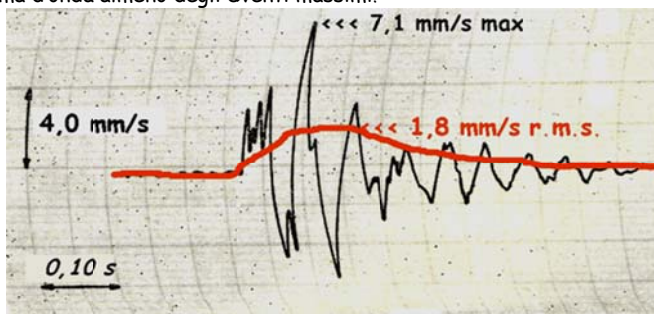


⁸ Un edificio storico non è necessariamente considerabile come fatiscente, dipende ovviamente dallo stato di usura; ci sono edifici storici che presentano resistenza a vibrazioni molto elevata

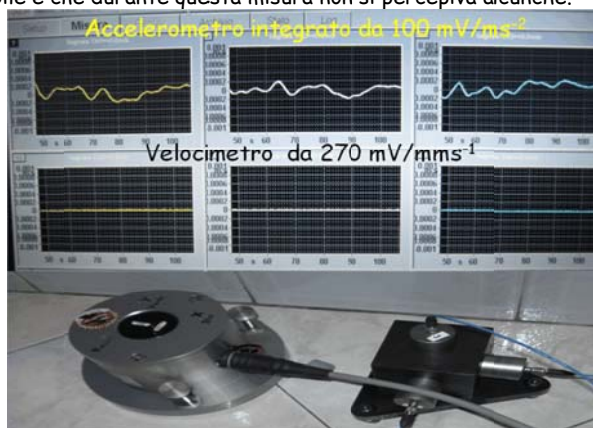


⁹ R.Gasch, Applicability of vibration measurement for determination of dynamic stresses in structural members. Doctoral Thesis. Tec. Univ. Berlin, Faculty of Mech. Eng.1968

¹⁰ Alcuni "consulenti", non disponendo della possibilità di misurare i valori istantanei non ponderati nel tempo (forma d'onda), misurano i valori rms massimi chiamandoli "picco", senza indicare il tempo di integrazione utilizzato, senza neanche avere il pudore di metterci sopra un fattore di cresta qualsiasi! I valori rms massimi sono: a) dipendenti dal tempo di integrazione scelto; b) sempre e comunque molto più bassi dei rispettivi valori di picco. Nella foto vediamo un evento vibratorio con valore di picco massimo di $7,1 \text{ mms}^{-1}$, contro un rms, massimo 50 ms l.r., di $1,8 \text{ mms}^{-1}$ per lo stesso evento, con un fattore di cresta di 3,94 o 11,9 dB. Bisogna sospettare di quelle relazioni che non riportano la forma d'onda almeno degli eventi massimi!



¹¹ Nella foto vediamo il confronto fra il segnale di un comune accelerometro triassiale da 100 mV/ms^{-2} integrato (sopra) e quello fornito da un velocimetro triassiale (sotto), il fondo scala è di 1 mms^{-1} l'accelerometro integrato "legge" valori di picco di $0,4 \text{ mms}^{-1}$ che non esistono come vibrazioni, ma sono un artefatto prodotto della sensibilità ai transienti termici anche in ambiente chiuso!!!! Si trattava di un ante opera, la misura è contemporanea, i sensori sono posizionati come da foto. Notare che $0,4 \text{ mms}^{-1}$ sono un valore tattilmente distintamente percepibile e che durante questa misura non si percepiva alcunché.



¹² Per info più dettagliate vedi: <http://www.spectra.it/SINUS-VELOCIMETRO-TRIAX.htm>

¹³ L'ingresso ICP è un ingresso coassiale, tipo BNC, che riceve il segnale dal trasduttore e gli fornisce, per la stessa via, la tensione di alimentazione per l'elettronica interna al trasduttore

¹⁴ Per info più dettagliate vedi: <http://www.spectra.it/SOUNDBOOK-DESCR.htm>

¹⁵ Per info più dettagliate vedi: <http://www.spectra.it/SOUNDBOOKPRESMULTIMEDIA.htm>

¹⁶ Per info più dettagliate vedi: <http://www.spectra.it/SOFT-NOISEWORKS-caratteristiche.htm>

¹⁷ Ma non come da norma, perché tutte le norme vietano il posizionamento dei trasduttori in prossimità delle lesioni. In prossimità delle lesioni si misurano valori di vibrazione più elevati per l'abbattimento dell'impedenza meccanica, valori comunque scorrelati dal valore della vibrazione eventualmente origine del danno

¹⁸ A Trieste si chiama puntazza il paletto di ferro zincato usato per la messa a terra dell'impianto elettrico di un edificio

¹⁹ Ho chiesto all'amico Marco Pincelli di Medolla (MO) - pgm@pgmacustica.it - l'autorizzazione a pubblicare questa nostra esperienza e lui mi ha risposto con la seguente nota, tralascio le prime righe.: "ma se metti la mia faccia metti anche una mia spiegazione che ritengo non banale del come si è dovuto procedere per portare a casa dati ragionevolmente sani. Innanzitutto la puntazza era lunga 130 cm e non 100, il terreno era coltivato e non battuto, con culture che richiedono che lo strato fertile (quindi mosso e su cui non potevamo portare a casa dati attendibili) sia di spessore tra i 60 - 70 cm, in quanto era stato precedentemente arato. Quindi se mi fossi limitato ad una lunghezza della puntazza a 70 cm non avrei raccolto dati altrettanto accurati. Per quanto riguarda l'affidabilità

delle misure effettuate in questo modo, sono state più volte ripetute anche in condizioni diverse, soprattutto in cantieri Alta Velocità FS sulla tratta Parma - Fidenza e la condizione di misure effettuate a minore profondità non erano risultate così ripetibili come quelle fatte in questo modo. In merito alla risonanza del codolo superiore sopra al livello del terreno, ritengo che se lo spessore della puntazza è di 5-6 mm con un'ala di 5 cm, lo smorzamento fornito dal terreno è sufficiente a limitare al massimo ogni effetto di risonanza, anche se il codolo resta fuori per 10 o 15 cm, in ogni caso eventuali fenomeni di risonanza di quel tratto e se vi fossero resterebbero al di sopra delle frequenze di pertinenza. Per quanto riguarda l'estrazione della puntazza e le camicie sudate!!!, basta Colpire lateralmente la puntazza facendogli assumere il gioco necessario per l'estrazione è cosa semplice che nel tempo ho rifatto e usando il garbo necessario posso dire che le puntazze usate in quel frangente sono ancora quelle e sono rimaste sane".

²⁰ Il limite della risposta lineare di un sistema ad un grado di libertà è dato dalla frequenza di risonanza $f_r - 3$ dB, nel nostro caso $280 \cdot 0,707 = 179,96$ Hz