



Appunti di acustica pratica N°3.- 20110531

## Inquinamento vibrotattile da vibrazioni trasmesse dal terreno che arrivano al recettore per via solida.-



[bruno.abrami@tin.it](mailto: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, 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.-** L'inquinamento da vibrazioni in ambiente di vita si configura in vari modi, se consideriamo l'effetto delle vibrazioni su di un recettore umano bisogna considerare almeno<sup>1</sup> i seguenti cinque casi:

- a) inquinamento costituito dal vedere oscillare i liquidi nelle bottiglie, oscillare bicchieri, lampadari, quadri o dal sentire vibrare i vetri delle finestre. Per questa tipologia non c'è soluzione possibile se non quella di mettere lo stucco ai vetri;
- b) inquinamento da rumore re-irradiato dalle strutture messe in vibrazione da sorgenti esterne o interne all'edificio. Per questa tipologia si applica il classico DPCM 14/11/97<sup>2</sup> e il DM 16/03/98<sup>3</sup>;
- c) inquinamento vibrotattile costituito dal percepire di "essere vibranti" con la superficie cutanea corporea, specialmente con la zona toracico-addominale. In questi casi la sorgente è la pressione sonora a basse frequenze, l'energia arriva al recettore per via aerea, per questa tipologia non c'è soluzione normativa ma abbattendo i livelli di pressione acustica si elimina la percezione;
- d) inquinamento vibrotattile costituito dal percepire con piedi o glutei o schiena il movimento vibratorio del supporto. In questi casi la sorgente è la vibrazione meccanica del supporto (pavimento, sedile, letto, ecc), l'energia arriva al recettore per via solida, questa tipologia di inquinamento vibratorio sarà oggetto degli presenti appunti.-
- e) falso inquinamento vibrotattile da soggetti affetti da patologie di interesse psichiatrico o neurologico che consistono dall'innescarsi di tremori alle gambe o alle braccia nei momenti di relax. Questi tremori vengono scambiati degli stessi come effetto di vibrazioni provenienti dall'esterno<sup>4</sup>, per questa tipologia verrà presentato un caso tipico.-

Molto spesso nei casi di inquinamento vibrotattile troveremo un misto di queste tipologie (reali) di inquinamento e sarà importante essere in grado di isolare il contributo di ognuna di esse tramite l'intervista ai recettori, tramite osservazione dell'ambiente, tramite auto-osservazione e tramite misura, al fine di compiere le giuste azioni diagnostiche e terapeutiche.- Chi scrive ha all'attivo circa 120 casi di inquinamento da vibrazioni investigati (dal 1993 ad oggi). Quello che verrà qui descritto e che esula dal contenuto delle norme deriva da osservazioni dirette fatte sul campo durante le misure o i monitoraggi.- La norma italiana di riferimento per l'inquinamento vibrotattile per via solida è la UNI9614<sup>5</sup> e suoi aggiornamenti, trae i suoi dati prevalentemente dalle ISO 2631-1&2 precedenti a quelle attuali.-

**2.- Il fenomeno originario dal punto di vista sociale.** - Popolazioni o singoli che percepiscono la propria abitazione come vibrante entrano in uno stato ansioso, in un primo momento perché associano l'esperienza a qualcosa di simile ad un terremoto, con timore del crollo dell'abitazione; in un secondo tempo (visto che non c'è crollo) al danneggiamento di tutta o parte della struttura. In questo secondo tempo inizia di regola una ispezione visiva della struttura, ispezione che può portare alla "scoperta" di lesioni filiformi o stacchi di intonaco o mattonelle a volte pre-esistenti l'inizio della esposizione a vibrazioni ma inosservate. Molte cause civili per danneggiamento di edifici da vibrazioni incominciano così. Se non si va alla causa civile, resta comunque il disagio di vivere in una casa che si "muove" cosa che spesso produce una reazione di auto-difesa che consiste nella produzione di "commenti avversi alla sorgente". Se questi commenti avversi arrivano nella giusta sede possono portare al fermo della sorgente per vie legali. Di fatto, lo scopo del rispetto dei limiti della UNI9614 è l'evitare la insorgenza di commenti avversi alla sorgente. Della cosa sono bene informate le grandi aziende costruttrici che fanno precedere ad ogni grande opera una indagine dello stato vibratorio dei recettori potenzialmente interessati, prima dell'opera, durante l'opera e a fine opera se questa è una conclamata sorgente di vibrazioni.-

Indire una causa civile per inquinamento vibrotattile per via solida, soprattutto per vibrazioni transienti, è sempre un grosso rischio, fondamentalmente perché è difficile trovare un CTU che sappia leggere e scrivere sull'argomento. Se c'è del rumore reirradiato dalla vibrazione è sempre meglio far causa per inquinamento sonoro, per il quale i CTU bene o male sanno come cavarsela. Il trucco sta' nel fatto che per togliere l'inquinamento sonoro re-irradiato bisogna eliminare le vibrazioni ben al di sotto della soglia di percezione vibrotattile.-

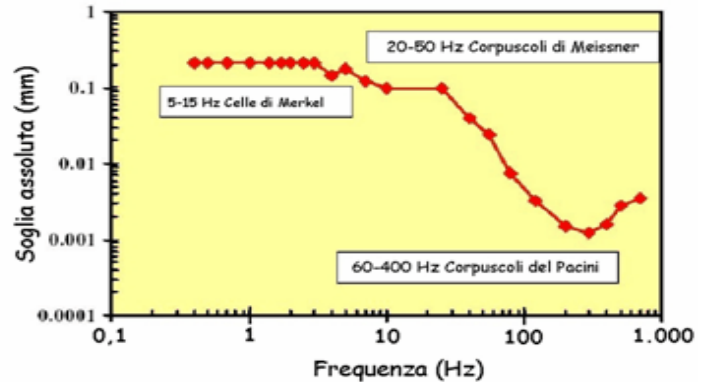
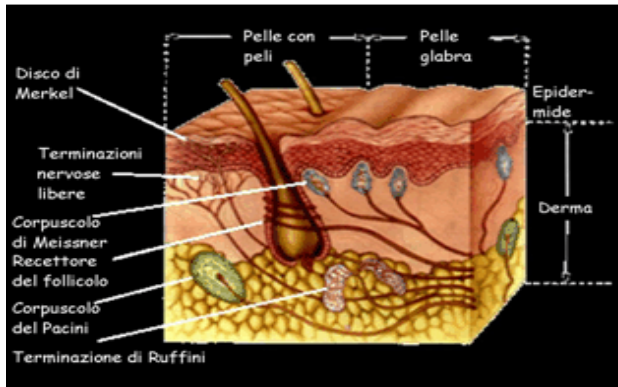
Se l'aspetto "evitare l'insorgenza di commenti avversi alla sorgente" è sicuramente il predominante a livello di applicazione della norma, c'è anche da considerare l'alterazione della qualità della vita del singolo recettore che subisce l'immissione vibratoria percettibile per via solida. Dobbiamo considerare tre gradi di alterazione in funzione dell'entità dell'energia vibratoria soprasoglia in giuoco:

- presenza di vibrazioni percettibili quando vi si orienta l'attenzione, ad esempio nei momenti di relax o prima di addormentarsi;
- presenza di vibrazioni che distraggono il recettore da attività in cui è concentrato, come il cucinare, studiare, lavorare, ecc;
- presenza di vibrazioni che fanno sobbalzare il mobilio, quando a carattere transiente, o lo fanno "camminare<sup>6</sup>" per la casa, quando a carattere continuo o semi-continuo come nel caso del transito di convogli ferroviari con le ruote "squadrate" da precedenti brusche frenate.-

Considerare questa gerarchia di effetti e segnalarla al Magistrato, nel corso di una causa civile, è importante perché consente allo stesso di capire l'entità del problema e prendere le necessarie contromisure. Contromisure che possono andare dal prescrivere l'isolamento della sorgente, al riconoscimento della riduzione del valore dell'immobile.-

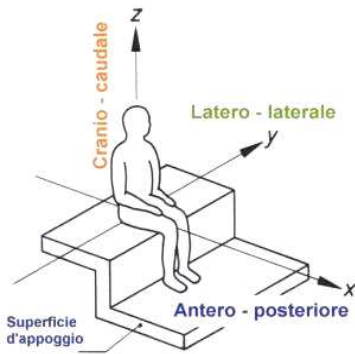
Vibrazioni ce ne sono sempre e dappertutto, da quelle indotte dalle maree sui continenti, a quelle indotte dai terremoti sottosoglia, a quelle indotte da traffico gommato e ferrato nelle città grandi e piccole. Affinchè la vibrazione diventi oggettivamente un problema per qualcuno, innescando l'allarme e la produzione di commenti avversi alla sorgente, questa deve superare la soglia di percezione vibrotattile per vibrazioni trasmesse per via solida.-

**3.- Il fenomeno originario dal punto di vista della percezione delle vibrazioni.-** La percezione delle vibrazioni avviene attraverso mecanorecettori nervosi specifici, disseminati nel derma con densità variabile. La densità di questi recettori è massima in corrispondenza dei palmi delle mani e dei piedi e nella zona toraco-addominale. Sono rispettivamente i dischi di Merkel, i corpuscoli del Meissner, i corpuscoli del Pacini.



Nella figura soprastante è visibile a sinistra la collocazione di questi recettori nel derma. E' evidente che nel momento che considereremo la soglia di percezione per via solida questa sarà funzione dell'impedenza meccanica puntuale del corpo umano nel punto di applicazione della forza. Prima di considerare questo aspetto vale la pena di considerare quello che accade per energia vibratoria trasmessa per via aerea. Nella figura in alto a destra vediamo la soglia di percezione cutanea per vibrazioni indotte a contatto solido sulla cute<sup>78</sup>, sulle ordinate abbiamo lo spostamento (efficace o di picco, non è dichiarato nel documento di origine) indotto per via solida cute, sulle ascisse le frequenze.- Anche la pressione acustica agendo sulla cute produce dei spostamenti e quindi stimolazione dei mecanorecettori specifici e quindi percezione di "essere vibranti". Secondo questo diagramma il campo delle frequenze suscettibile ad essere percepito come vibrazione per via solida si estende da qualche frazione di Hz fino a quasi 1.000 Hz. Nell'esperienza di chi scrive, per vibrazioni cutanee indotte per via aerea, questo accade in un campo di frequenze più ristretto, compreso fra 4 a 200 Hz per valori di pressione acustica a partire da 60-80 dB(Lin)<sub>ref.20µPa</sub>.- Per strano che possa sembrare non c'è traccia nella letteratura scientifica di questa via di percezione a livelli di pressione acustica così bassi, a dispetto dell'evidenza percettiva. Quel che si trova si riferisce sempre a eccitazioni superiori ai 100 dB(Lin)<sub>ref.20µPa</sub>.-

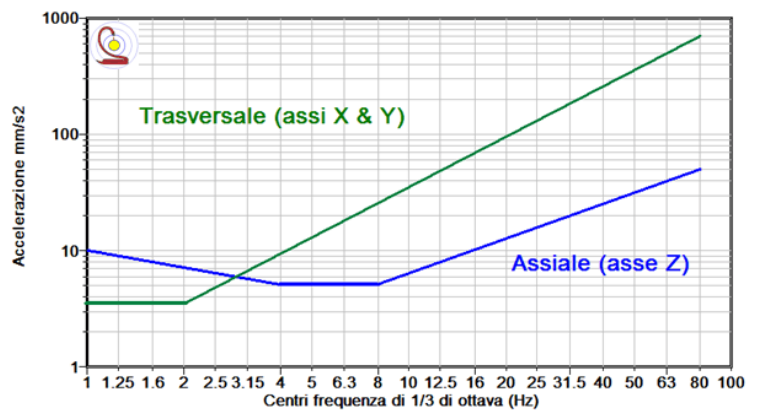
La conoscenza di questo aspetto è importante perché spiega al consulente che è possibile che un recettore si autodichiari a ragione esposto a vibrazioni, senza che vi sia presenza di vibrazioni trasmesse per via solida tattilmente percettibili<sup>9</sup> e misurabili come tali. Il primo segnale del trovarsi in uno di questi casi lo si ha dall'osservare se stessi, si vedrà che ci si sente vibranti, ma che la vibrazione non viene percepita attraverso i piedi o i glutei ma bensì attraverso la superficie cutanea, specialmente nella zona toraco-addominale. Credo che la presenza di questa ignorata<sup>10</sup> via di percezione è la causa principale per cui alcuni dei nostri addetti ai lavori parlano della imprevedibilità della soglia di percezione vibrotattile.-



**4.- La soglia di percezione per via solida.-** Se consideriamo la direzione in cui la vibrazione entra nel corpo umano, dobbiamo dire che la percezione per via aerea è direzione-indipendente, mentre quella per via solida è direzione-dipendente. Per definire questa dipendenza vengono presi a riferimento gli assi anatomici del corpo umano, come da figura a sinistra.- Se la forza entra nella direzione cranio-caudale sarà dominate la risonanza della massa viscerale (4-8 Hz); nelle direzioni latero-laterale e antero-posteriore sarà dominate la risonanza del sistema tronco-testa eccitati trasversalmente(1-2 Hz).- Se andiamo a cercare la soglia per via solida, ovvero quel valore minimo di vibrazione, che alle varie frequenze, dà origine

alla percezione dell'essere vibranti, ci aspettiamo di trovare almeno due soglie distinte per direzione di ingresso della vibrazione nel recettore.-

Le soglie di riferimento sono quelle pubblicate sulla UNI9614 & ISO2631-2-1989 e si possono vedere a destra.- Sulla base di queste soglie sono stati costruiti i filtri di ponderazione per consentire la misura della vibrazione come valore globale correlabile alla esperienza soggettiva (tipo il dB(A) nel campo sonoro). Usando i filtri di ponderazione la soglia cranio-caudale è di  $5 \text{ mms}^{-2} (W_Z)$  rms e quella trasversale è di  $3,6 \text{ mms}^{-2} (W_{X,Y})$  rms.



Nella presentazione (ISO2631-2-1989) non vengono definite le condizioni di verifica della soglia, se non che si tratta di soglia per soggetti avvertiti, ovvero che attendono con attenzione di percepire una vibrazione. La soglia ha una dispersione dichiarata per l'asse Z da 4,5 a 5,5  $\text{mms}^{-2} (W_Z)$ .

Sono soglie che hanno dato buona prova di sé nel valutare l'entità dell'esperienza soggettiva di recettori esposti a vibrazioni reali trasmesse per via solida. Quanto a questo, l'esperienza di chi scrive prendendo in considerazione la sua casistica, è la seguente:

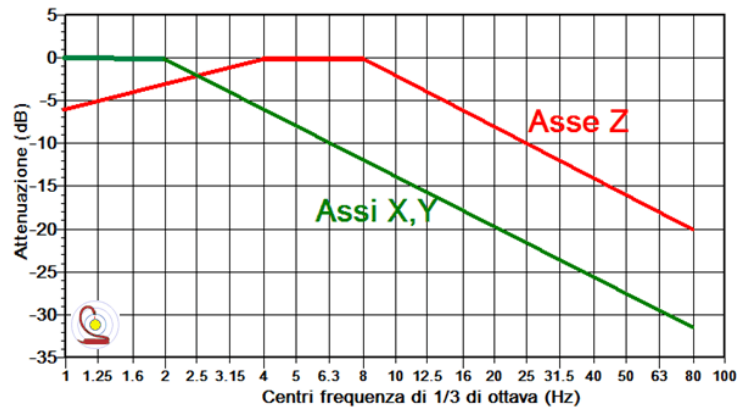
- considerato che, in media quando si fanno le misure sono presenti 3 persone;
- esclusi i casi di falsa esposizione (patologici di cui al punto "e" della lista iniziale);
- esclusi i casi di esposizione a vibrazione per via aerea;
- restano circa 100 casi di reale esposizione per via solida per un totale di 300 soggetti;

in 98 di questi casi non è mai accaduto che qualcuno dei presenti dichiarasse di non percepire le vibrazioni percepite dagli altri e misurate dal consulente come percettibili. Fanno eccezione:

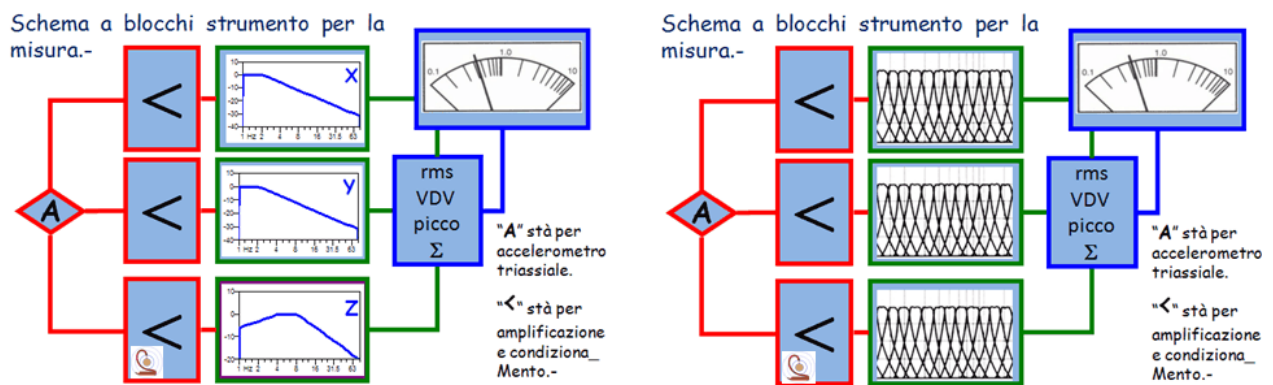
- a) un caso di vibrazioni impattive (sorgente un maglio, periodo 30-40 s) misurate come sopra soglia (MTVV da 10 a 15  $\text{mms}^{-2} (W_Z)$ ) ma soggettivamente impercettibili da tutti i presenti (tre persone). Cosa che, per me, è rimasta un mistero;
- b) un caso di vibrazioni impattive (sorgente una fustellatrice, periodo degli impatti 0,6 s) misurate come sotto soglia (3,5  $\text{mms}^{-2} (W_Z)$ ) ma soggettivamente percettibili da tutti i presenti (quattro persone)

Per vibrazioni impattive, con alto fattore di cresta, si assume (ISO2631-2-1989) che la soglia sia più alta senza che però venga dato un valore.

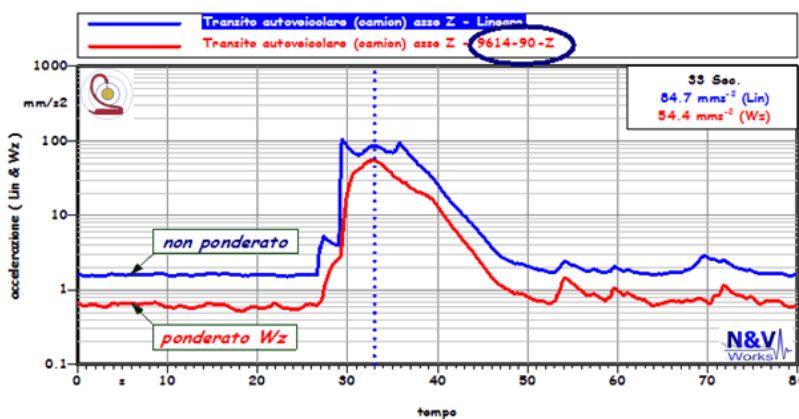
**5.- Filtri di ponderazione e strumenti per la misura.** - Vuoi dalle norme, vuoi dall'esperienza pratica, risulta una buona concordanza fra esperienza percettiva e misure globali ponderate, con il vantaggio di poter visualizzare la storia della esposizione. A destra vediamo i filtri globali  $W_Z$  per la direzione cranio-caudale e  $W_{X,Y}$  per le direzioni latero-laterale e antero-posteriore.-



Lo strumento di misura dovrà disporre di almeno tre canali, di ingressi ICP<sup>11</sup>, di filtri di ponderazione specifici ( $W_Z$  &  $W_{X,Y}$ ) o, in alternativa di filtri a terzi di ottava da 0,8 ad almeno 100 Hz. Acquisendo i dati in terzi di ottava occorrerà avere poi un software di post-elaborazione in grado applicare le ponderazioni per visualizzare la storia della vibrazione come da percezione.



Nella figura in alto a sx è visibile lo schema a blocchi di uno strumento con i filtri globali di ponderazione, a dx quello con i filtri a terzi di ottava. Nella figura sottostante è visibile un esempio di storia di vibrazioni prodotte da un transito autoveicolare gommato su asfalto in cattivissimo stato di manutenzione. In blu la storia da storia di spettri<sup>12</sup> non ponderati e in rosso quella da storia di spettri ponderati in post-elaborazione con il software Noise & Vibration Work.-



La attendibilità delle storie ricavate in post-elaborazione da spettri in terzi di ottava ha un limite quando si debbano valutare vibrazioni transienti con contenuto in frequenza dominate al di sotto di circa 8 Hz. Il ritardo del tempo di risposta dei filtri fa apparire le componenti minori a circa 8 Hz come se arrivassero in ritardo deformando il profilo storico e misurando un valore massimo inferiore alla realtà<sup>13</sup>. Dove il valore massimo è critico, come nelle valutazioni di eventi transienti dove si fa uso di MTVV<sup>14</sup>, è obbligatorio usare filtri di ponderazione globali in fase di acquisizione e la ponderazione temporale "Slow", campionando a max 0,25 secondi.

**6.- Criteri di lettura di una storia di vibrazione ponderata  $W_z$  da sorgenti continue.-** Prima di dire "siamo dentro - siamo fuori dai limiti" occorre capire se, in fase di misura, abbiamo preso quello che cercavamo, e questo si fa' leggendo la storia, che sia di rumore, che sia di vibrazioni.-

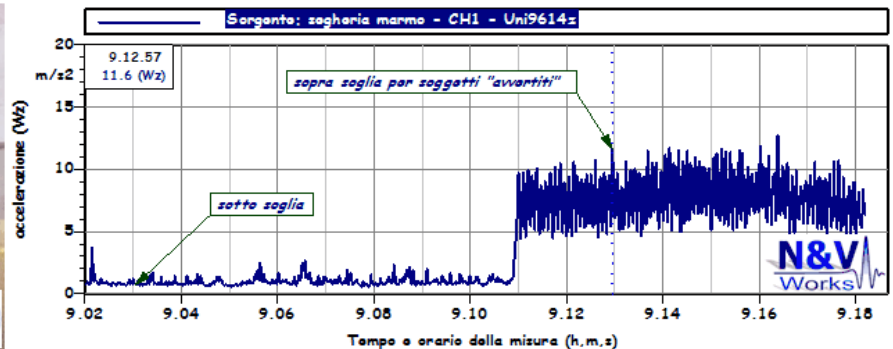
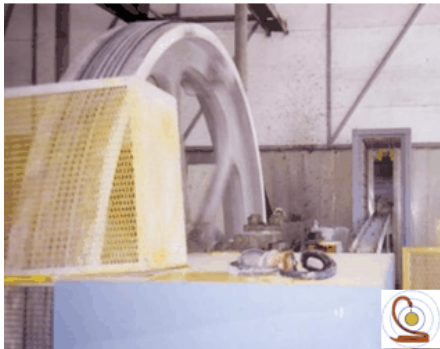
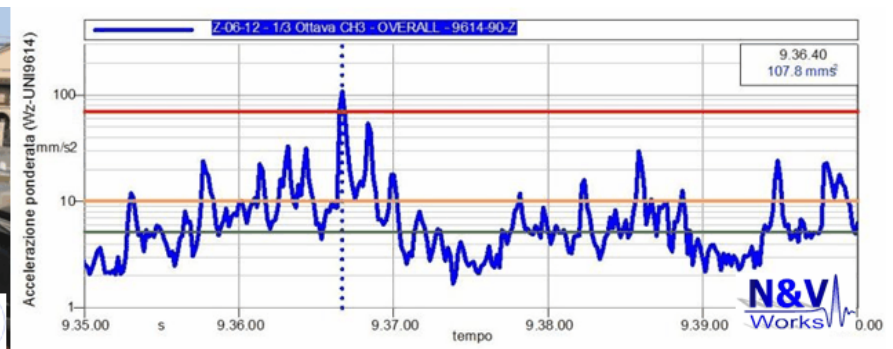


Figura sopra: la sorgente è una segheria di marmo, la misura è fatta al recettore, viene visualizzato l'asse Z in quanto dominante. Dalle 09.02 alle 09.11 la segheria è ferma, la vibrazione è sotto soglia e quindi impercettibile, dalle 09.11 incominciano a segare, sono in movimento 5 telai, la vibrazione diventa percettibile con la pianta dei piedi o da seduti, purchè vi si ponga attenzione, con qualche momento, come alle 09.16.20, nel quale l'attenzione viene richiamata a forza dall'evento vibratorio.-

**7.- Criteri di lettura di una storia di vibrazione ponderata  $W_z$  da sorgenti transienti.-** Figura sotto: la sorgente è impatti da pneumatici su "buca" nell'asfalto<sup>15</sup>, la misura è fatta al recettore. Le tre righe colorate rappresentano:

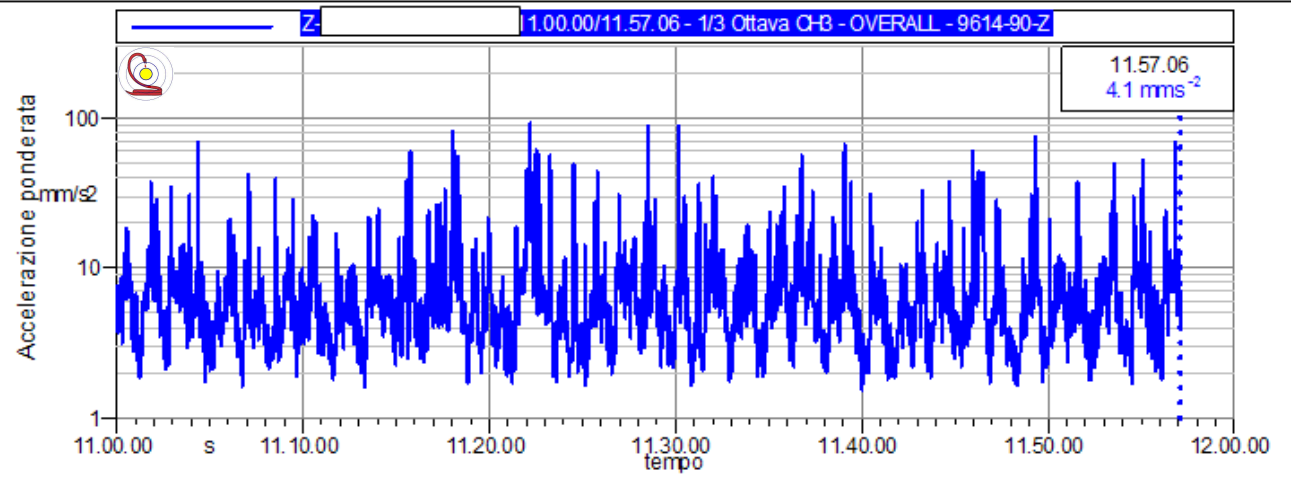


1. in verde: la soglia di percezione per soggetti avvertiti;
2. in giallo: la soglia superata la quale l'attenzione viene forzatamente rivolta all'evento vibratorio;
3. in rosso: la soglia superata la quale il mobilio incomincia a sobbalzare o a "camminare" per la casa a seconda della durata della vibrazione, al di sopra di quella soglia<sup>16</sup>.-

Ritengo importante che il CTU di una causa civile, dopo aver fatto la misura, sappia riportare al Magistrato in cosa consista l'immissione non voluta e quali disagi induca sul recettore. Dal punto di vista dell'articolo 844c.c. il superamento della normale tollerabilità dovrebbe coincidere con il superamento della soglia di percezione perché non c'è alcun motivo per il quale chicchessia debba sentire vibrare la sua abitazione. Se non è possibile portare sotto soglia la vibrazione, per l'interesse prioritario della sorgente, allora è necessario che parta una procedura per il riconoscimento dell'abbattimento del valore dell'immobile.-

Può ritornare utile, a tal fine, nel caso di vibrazioni transienti, usare l'analisi statistica cumulativa della storia delle vibrazioni come  $W_{z,Slow,(t)}$  con la quale è possibile esprimere il risultato in termini di percentuale del tempo, diurno o notturno, durante il quale la forza della vibrazione è tale da richiamare con forza l'attenzione del recettore, o durante il quale viene prodotto sobbalzo o movimento del mobilio. Purtroppo non è facile trovare qualcosa (strumento o software che questo tipo di informazione, per cui in alcuni casi sono dovuto ricorrere alle lettura "manuale" della storia producendo un risultato tipo quello a seguire (semplificato nel numero degli eventi).-

Risultati del monitoraggio della accelerazione di vibrazione in funzione della sua percettibilità (inquinamento vibro tattile) dalle 11.00 - 11.59.59 del XX Settembre XXXX.-

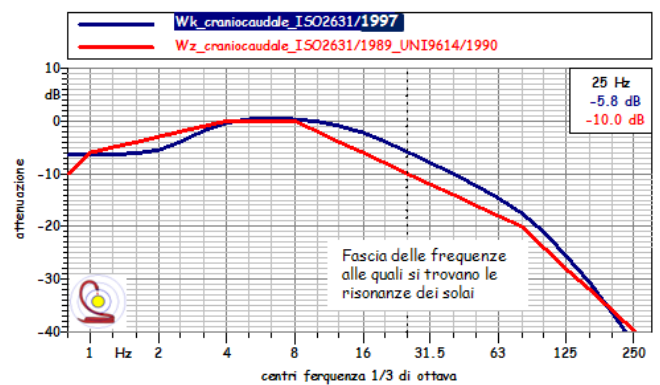
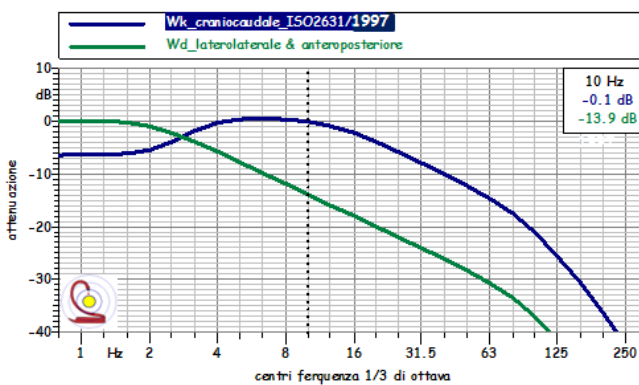
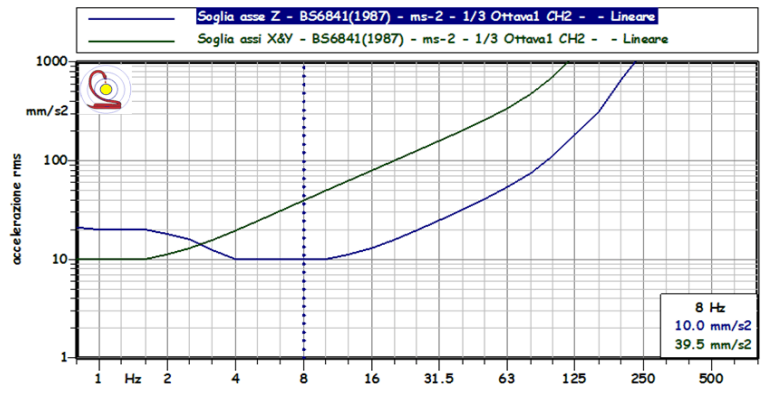


Numero progressivo di eventi che superano una soglia di 10 $\text{mm/s}^2$ e dimostrano un MTVV $\geq$ a 20 $\text{mm/s}^2$	MTVV ( $\text{mm/s}^2$ )	Durata sopra soglia (s)	Durata totale sopra soglia di 10 $\text{mm/s}^2$
1.	37.5	9*	
2.	28.6	3	
16.	26.3	4	
17.	26.9	3	
18.	33.6	3	
19.	82.5	6	
20.	61.3	6	
21.	55.7	4	
22.	30.7	7	
23.	21.5	4	
24.	93.2	23*	
25.	61.6	9	
26.	58.0	9	
27.	56.4	4	
28.	49.9	4	
29.	28.0	4	
30.	44.5	5	
31.	30.9	3	
32.	89.7	9	
33.	29.0	11*	
34.	88.9	7	
35.	30.0	4	
52.	60.7	10*	
53.	44.1	22*	
54.	28.7	4	
55.	24.7	4	
56.	31.2	4	
57.	76	7	
65.	24.0	7	
66.	69.1	5	
*Sequenza di eventi			388"
<p>Commento: dalle 11-11.57.06 ci sono stati 66 eventi in grado di richiamare l'attenzione di soggetti concentrati in altro per un tempo totale di 388 secondi o 6,8 minuti, inoltre 5 eventi hanno messo in vibrazione il mobilio.-</p>			

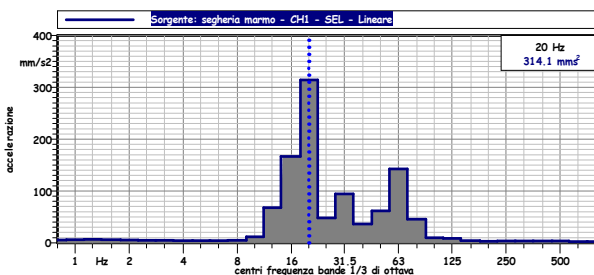
**8.- Complicazioni.....** - Nel 1997 la

ISO 2631-1&2 pubblica nuovi filtri di ponderazione per le misure di esposizione alle vibrazioni, indicati come  $W_k$  per asse Z &  $W_d$  per gli assi x,y; questi nuovi filtri sono riferiti ad un'altra soglia di percezione elaborata da Griffin & al. Recepiti per la prima volta dal British Standard Organization nella norma per l'esposizione alle vibrazioni in ambiente abitativo BS6841-1984.- Tutta la

strumentazione in commercio, prodotta da una decina d'anni a questa parte dispone dei soli filtri  $W_k$  &  $W_d$ , mentre la nostra UNI9614, dopo l'esperienza non soddisfacente della UNI11048, mantiene i filtri  $W_z$  &  $W_{x,y}$ .- Dalla soglia di percezione BS6841-1984 sono stati derivati i corrispettivi filtri di ponderazione globali chiamati ora  $W_k$  in sostituzione di  $W_z$  e  $W_d$  in sostituzione di  $W_{x,y}$  vedi la figura a sx.-

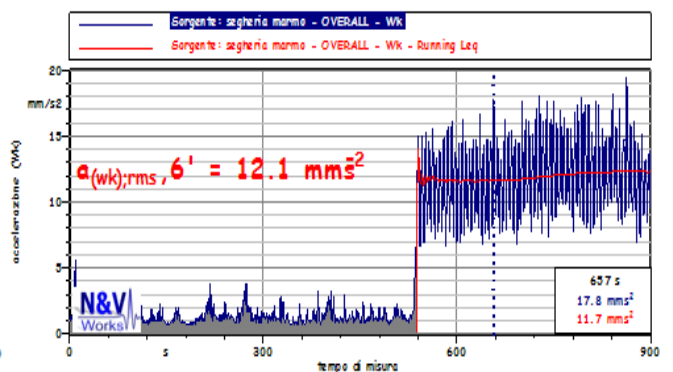
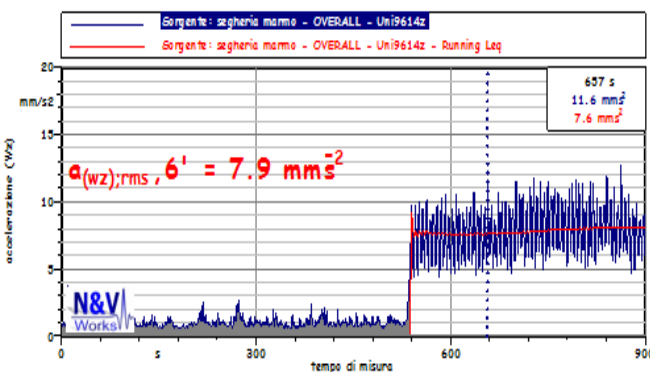


Nelle abitazioni, a causa della maggiore elasticità dei solai nella direzione normale al piano, corrispondente all'asse Z di un soggetto in piedi o seduto, è quasi sempre nettamente dominante l'asse Z, per cui vale la pena di fare il confronto solo fra  $W_z$  e  $W_k$ .- Il confronto (figura sopra a dx) è tale che esclude la intercambiabilità dei due filtri in quanto i risultati sono di una diversità incompatibile con la correlazione



agli effetti sugli esposti. Consideriamo il caso di pagina 6, vibrazioni indotte in una abitazione da una segheria di marmo; la acquisizione è stata fatta in terzi di ottava. Utilizzando il software Noise & Vibration Work è possibile applicare, in postelaborazione, entrambe le ponderazioni alla stessa misura. Nel figura a sx possiamo vedere lo spettro come SEL di tutta la misura,

così, tanto per vedere le frequenze in gioco. Nella figura in basso è possibile vedere il risultato delle due ponderazioni applicate alla stessa storia. E' chiaro come siano incompatibili, anche ricordando che la ponderazione  $W_z$  si riferisce ad una soglia di  $5 \text{ mms}^{-2}$  e l'altra,  $W_k$ , si riferisce ad una soglia di  $10 \text{ mms}^{-2}$ .-

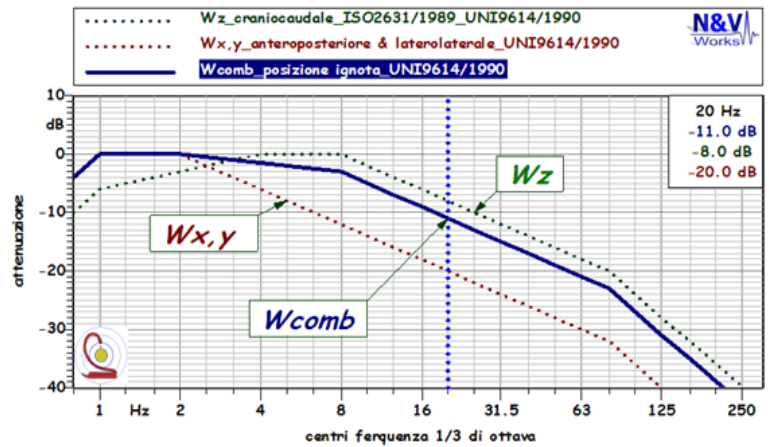




La conoscenza di questo fatto ha un suo senso pratico perché per noi vale ancora la UNI9614 e non poche volte assistiamo a misure fatte con strumenti dotati della sola  $W_k$  &  $W_d$ . Passando poi i risultati presi con  $W_k$  come fossero  $W_z$  e confrontandoli poi con le soglie della 9614!

### 9.- Cosa fare quando non conosciamo la posizione del recettore.-

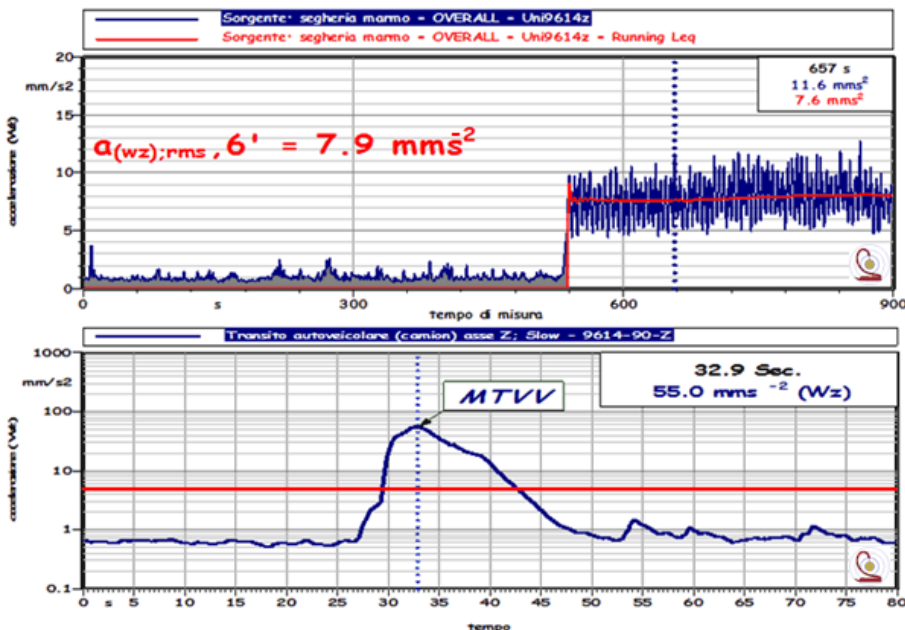
L'assunto dell'uso dei filtri dipendenti dalla direzione di ingresso della vibrazione è che si conosca la posizione del recettore. Cosa che avviene sempre nelle cause civili, l'attore ci indica il luogo dove maggiormente sente le vibrazioni e in che posizione (normalmente in piedi o seduto). Se aggiungiamo che l'asse Z è quasi sempre il dominante ci siamo semplificati notevolmente la vita. Diremo più avanti cosa pensare di quelli che sperimentano le vibrazioni sdraiati sul letto o sul divano.-



Nelle indagini sociologiche, quando si vuole stabilire che relazione c'è fra l'inquinamento vibratorio e la risposta di popolazioni specifiche (ad esempio i residenti lungo una linea ferroviaria), si assume di non conoscere la posizione in cui viene subito l'inquinamento e si adotta un filtro di ponderazione per posizione ignota. Questo filtro è una sorta di sintesi dei due noti chiamato nella UNI9614  $W_{comb}$ . - Usando il filtro "combinato" la soglia diventa  $3,6 \text{ mms}^{-2}(W_{Comb})^{17}$ .-

### 10.- La ponderazione temporale e come esprimere il risultato.-

Oltre ad applicare i filtri di ponderazione in frequenza conformi al caso investigato occorre anche decidere come esprimere il valore efficace della accelerazione. Se si usa una costante di tempo, ad esempio Solw, si annoterà  $a_{w,Slow(t)}$



indicando con questo "(t)" che si tratta di una progressione di valori nel tempo e quindi una storia (in blu nei grafici a sx). Se invece si vuol dare un valore unico, calcolato sulla storia, lo indicheremo come  $a_{w,rms,T}$  o accelerazione equivalente  $a_{w,eq,T}$ . T stà ad indicare il tempo di integrazione o di misura.

Per vibrazioni continue si userà  $a_{w,rms,T}$ , come da figura a sinistra in alto. Per vibrazioni transienti si userà  $a_{w,Slow(t),Max}$  o MTVV (Maximum Transient Vibration Value), come da figura a sinistra in basso. MTVV per definizione, come da ISO2631/1997 viene sempre misurato in Slow. In tutti i casi nei quali il valore ponderato in ampiezza massimo è un riferimento non si può utilizzare la ponderazione lineare-ripetitiva (short Leq) perché introduce una incertezza di 3,0 dB sul valore massimo. Traducendo 3,0 dB in termini lineari vuol dire che di uno stesso evento potremo leggere da 100 a 140  $\text{mms}^{-2}$  a seconda di come si piazza l'evento in rapporto al periodo di campionamento.-

**11.- Le indagini vibro-sociologiche<sup>18</sup>.**- Le indagini vibro-sociologiche vogliono stabilire la relazione fra l'ampiezza delle vibrazioni immesse e il disagio vissuto dai recettori. Si orientano su sorgenti che coinvolgono gruppi di individui, tipicamente per vibrazioni da traffico gommato o ferrato. Queste vibrazioni hanno carattere transiente e dimostrano una grande variabilità nei valori di MTVV. La procedura per quantificare l'immissione<sup>19</sup> consiste nel acquisire un certo numero di transiti<sup>20</sup>, di ogni transito si ricava il valore di MTVV che per semplicità chiameremo semplicemente  $a_{w,max}$ . Di questi  $a_{w,max}$  si calcolerà il valore medio  $\overline{a_{w,max}}$  e la deviazione standard ( $\sigma$ ). Da queste due grandezza si definirà  $a_{w,95}$  ovvero il valore massimo superato per il 95% del tempo di esposizione.

$$\overline{a_{w,max}} = \frac{\sum_{j=1}^N a_{w,max,j}}{N}$$

$\overline{a_{w,max}}$  = media dei massimi ponderati di accelerazione per ogni singolo passaggio, in  $mms^2$ .  
 $a_{w,max,j}$  = massima accelerazione ponderata per singolo passaggio, in  $mms^2$ .  
 N = numero dei singoli transiti che si fanno entrare nel calcolo.

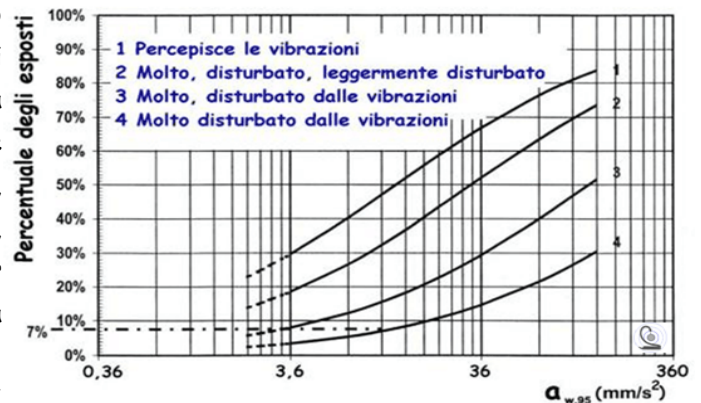
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^N (a_{w,max,j} - \overline{a_{w,max}})^2}$$

$\sigma$  = Deviazione standard degli N transiti

$$a_{w,95} = \overline{a_{w,max}} + 1,8 * \sigma$$

Accelerazione ponderata massima superata dal 95% dei transiti, in  $mms^2$

Oltre alla campagna di misure, in parallelo alla misura, viene somministrato un questionario agli esposti. Dal questionario si vuole apprendere le tipologie del disagio conseguente alla esposizione alle vibrazioni, e in quale percentuale le tipologie di disagio coinvolgono la popolazione, in relazione ai valori di  $a_{w,95}$ . Nella figura a sx (da ref.17&18) vediamo una rappresentazione, in forma cumulativa, delle semplici dichiarazioni: percepisco le vibrazioni, sono leggermente disturbato, sono disturbato, sono molto disturbato. Un limite di legge può esser concepito come quel limite che lascia una percentuale residua e nota di "molto disturbati"; nell'esempio riportato a sx abbiamo un limite di  $a_{w,95}$  di  $10,8 mms^{-2}$  che consente un residuo del 7 % della popolazione che continuerà a definirsi "molto disturbata".- E' da osservare che avendo utilizzato una ponderazione in frequenza tipo  $W_{Comb}$  la soglia si colloca a  $3,6 mms^{-2}$ .-



**11.- Un problema che ci portiamo dietro da anni.**- La UNI 9614 suggerisce un limite per vibrazioni da treni di  $30 mms^{-2}$  ma non definisce come misurarli, se  $a_{w,eq}$ , T o MTVV massimo o medio, o  $a_{w,95}$  (quest'ultimo lo cito per scherzo perché la sua formulazione è molto posteriore al riferimento [2] sotto riportato e alla nostra UNI9614).- In termini di  $a_{w,95}$  corrisponderebbe ad un residuo del 13% di molto disturbati.-

#### Da UNI9614... A 4. Valutazione delle vibrazioni prodotte da veicoli ferroviari

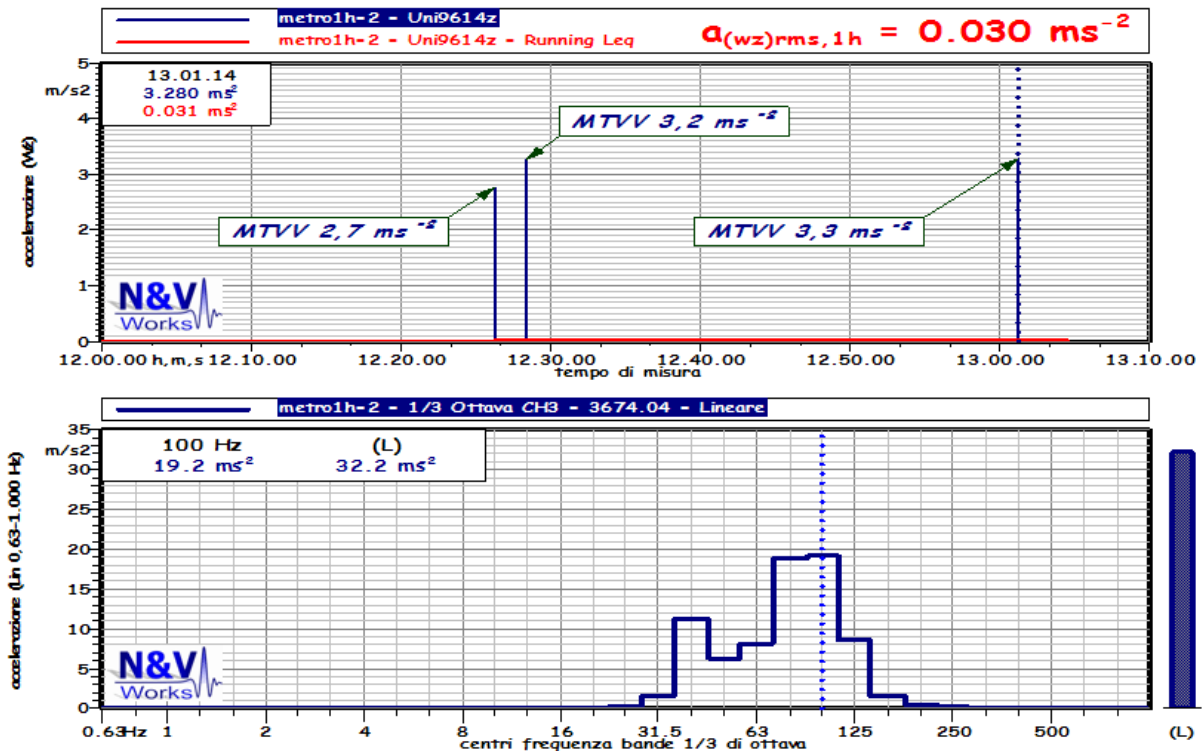
Nel caso di vibrazioni prodotte da veicoli ferroviari e immesse nelle abitazioni, i risultati di alcune sperimentazioni [2] indicano come riferimento i valori  $30,0 \cdot 10^{-3}$  (asse z) e  $21,6 \cdot 10^{-3}$  (assi x e y)  $m/s^2$ .

In mancanza di definizione da norma, questi  $30 mms^{-2}(W_z)$ , vengono sempre interpretati come accelerazione equivalente o efficace misurata per un periodo T che contenga più transiti (non è definito quanti). Il riferimento [2]<sup>21</sup> citato nel paragrafo A 4 di UNI9614 è rintracciabile<sup>22</sup> in rete per la modica cifra di € 400! Onde per cui.... ho deciso che se lo possono tenere!

Resta il fatto che molti CTU, consulenti e funzionari pensano possibile che quella soglia di  $30 mms^{-2}$  ( $W_z$ ) sia da considerare una accelerazione equivalente misurata su un certo numero di transiti.... perché "lo dice la norma" (in realtà la norma non ne dice nulla ed è proprio da qua che scaturisce il problema) e lo fanno

senza provare alcuna vergogna! **To credo, così, a naso, che per avere  $a_{W,eq,T} = 30 \text{ mms}^{-2} (W_Z)$ , dopo che sono passati i treni non resta in piedi una sola casa!** Vediamo un di esempio.-

Sono partito da una misura reale di vibrazioni prodotte da 10 transiti di metropolitana nell'intervallo temporale di 1 ora, la misura è fatta all'interno di una stanza di abitazione non molto grande (questo spiega frequenze di risonanza così elevate). Il valore di  $a_{W,eq,1h}$  è di  $1 \text{ mms}^{-2} (W_Z)$ . Utilizzando le funzioni di post-elaborazione di Noise & Vibration Work ho aumentato MTVV di tre transiti fino ad arrivare ad un  $a_{W,eq,1h}$  di  $30 \text{ mms}^{-2} (W_Z)$ .

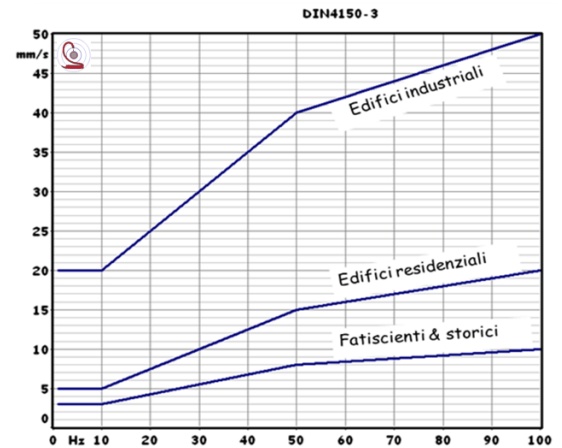


Vediamo che per avere  $30 \text{ mms}^{-2} (W_Z)$  con tre transiti in un ora dobbiamo arrivare a dei MTVV dell'ordine dei  $3 \text{ ms}^2$ ! Ora se con  $80 \text{ mms}^{-2} (W_Z)$  sobbalzano o si muovono i mobili, mi chiedo cosa accadrebbe con  $3 \text{ ms}^2 (W_Z)$ ! Ovviamente non dispongo di osservazioni sperimentali. Se ci fossero casi così, lo avremo saputo dai giornali. Se guardiamo lo spettro corrispondente all'ultimo MTVV vediamo il classico spettro con frequenza della componente "tonale" (una risonanza vista in terzi d'ottava assomiglia sempre ad una "tonale") corrispondente alla frequenza di incrocio dei filtri di terzi di ottava 80 & 100 Hz, ovvero: 89 Hz. A 89 Hz abbiamo un'accelerazione efficace, Slow massima, "apparente" di  $19,2 \text{ ms}^{-2}$ , ma il valore del segnale alla frequenza di incrocio<sup>23</sup> è attenuato di 3,0 dB. Ora,  $19,2 \text{ ms}^{-2}$  per 1,41 fanno  $27 \text{ ms}^{-2}$  ..... corrispondenti a  $2,7 \text{ g}_{rms}$  che, per 1,41, sono pari a **3,8 g di picco!!!!!!!!!!!!!!** Diceva bene l'Abrami, **con  $a_{W,eq,T}$  di  $30 \text{ mms}^{-2} (W_Z)$  passano i treni e vengono giù le case!**

Tanto per rigirare il coltello nella piaga, andiamo a vedere a cosa corrispondono questi valori dal punto di vista della DIN4150-3 valutazione del rischio di lesioni da vibrazioni agli edifici

	Misurato $a_{rms}$	Compensazione per frequenza di incrocio dei filtri	Valore di picco $a_{picco}$ $\text{ms}^{-2}$	Velocità di picco $a/\omega$ $\text{ms}^{-1}$
Operazione	$\text{ms}^{-2}/\text{frequenza Hz}$	$a_{rms} * 1,41$	$(a_{rms} * 1,41) * 1,41$	$a_{picco}/(6,28 * 89)$
Valori	19,2/89	27,0	38	0,068

Vediamo, dal grafico a destra, che con una velocità di  $68 \text{ mms}^{-1}$  di picco a 89 Hz, verrebbero sgretolati non solo gli edifici fatiscenti e residenziali, ma anche quelli industriali. Ergo, non è possibile che alcuno - che sapesse di cosa parlava - abbia mai pensato a quei  $30 \text{ mms}^{-2}(W_z)$  come una accelerazione equivalente su di un periodo che includa un certo numero di transiti ferroviari.- Avendo il valore di velocità di picco ( $68 \text{ mms}^{-1}$ ) lo possiamo trasformare nel suo valore efficace ( $v_{\text{picco}} * 0,707$ ) che è di  $48 \text{ mms}^{-1}$  cui corrispondono<sup>24</sup> circa 119,6 dB<sub>lps</sub> irradiati. Se togliamo 0,5 dB che è l'attenuazione del filtro "C"<sup>25</sup> alla frequenza di 89 Hz, avremmo 119,1 dB(C) Slow max di rumore re-irradiato dalla vibrazione, un boato. E più non voglio dire!



Resta quindi irrisolto l'enigma sul come interpretare quei  $30 \text{ mms}^{-2}$ : se come MTVV massimo, o medio o che altro? Forse adottando in toto la Norwegian Standard NS8176.E, per vibrazioni da autoveicoli, treni, tram, metropolitane si potrebbe dare una risposta normativa degna di questo nome al problema. La NS8176.E parte da un campionamento di MTVV di un certo numero di transiti, da questi ricava  $a_{w,95}$  e nella modalità della indagine socio - vibratoria ne illustra gli effetti sulla popolazione.-

**12.- Un caso di falsa esposizione alle vibrazioni.-** Ci sono soggetti che dichiarano di sentirsi vibranti quando si siedono in poltrona o quando si sdraiano sul letto, non che la cosa sia impossibile, ma questa dichiarazione deve metterci in allarme. La domanda che dobbiamo fare è la seguente: "...se lei si alza dalla poltrona o si alza dal letto, continua a sentire le vibrazioni?" Se la risposta è no, è molto alta la probabilità di trovarsi di fronte ad un caso di "suggestione isterica". Ci sono soggetti (nella mia casistica, di 4 casi, sono tutte donne over 50) che vivono in una condizione di stress<sup>26</sup> nel momento in cui si rilassano (quando si siedono in poltrona o si sdraiano sul letto) si innesca un tremore degli arti superiori o inferiori che loro scambiano per vibrazioni provenienti dall'esterno della abitazione. Se si alzano dal letto o dalla poltrona il tremore si ferma e loro dichiarano di non sentire più la "vibrazione". Vediamo il mio primo caso.



Sono stato chiamato per una consulenza da una coppia di signore (madre e figlia) di 75 e 50 anni. L'appartamento soprastante era stato abitato per anni da una anziana signora, trapassata la quale, è stato occupato da una famiglia giovane con figli e con una intensa vita sociale. L'edificio costruito negli anni 50 è un raro esempio di trasparenza acustica fra unità abitative adiacenti. Lo scopo della perizia era di dimostrare se c'erano gli elementi, quanto a superamento dei limiti di legge, per percorrere una via legale che liberasse le signore da intrusioni sonore e vibratorie.

Il "disturbante" stà all'ultimo piano. Per il rumore da vicinato l'unico esito della consulenza poteva essere : cambiate casa. Sulle vibrazioni c'era da dire qualcosa di più, ed è su quest'ultimo aspetto che concentreremo la nostra attenzione. Il soggetto di 50 anni dichiarava di sentire ogni notte delle vibrazioni continue per circa 10 - 15 minuti, non appena si sdraiava a letto e con particolare intensità verso le 04.00 del mattino, *vibrazioni che facevano vibrare la testiera del letto*. Di fronte alla mia obiezione che per produrre quell'energia occorreva aver installato del macchinario industriale nell'appartamento soprastante, il soggetto indicava in una lavatrice non meglio identificata la sorgente delle vibrazioni. Alla mia domanda se contemporaneamente alla percezione delle vibrazioni ci fossero anche dei fatti sonori si è

risposto negativamente. Alla domanda se nel momento che il soggetto percepiva le vibrazioni avesse osservato se queste continuavano alzandosi in posizione eretta con i piedi a contatto con il pavimento, la risposta è stata non aver mai provato. Al mio consiglio di fare questa prova prima di intraprendere delle misure che potevano essere costose, il soggetto ha risposto di voler procedere con le misure in ogni caso.

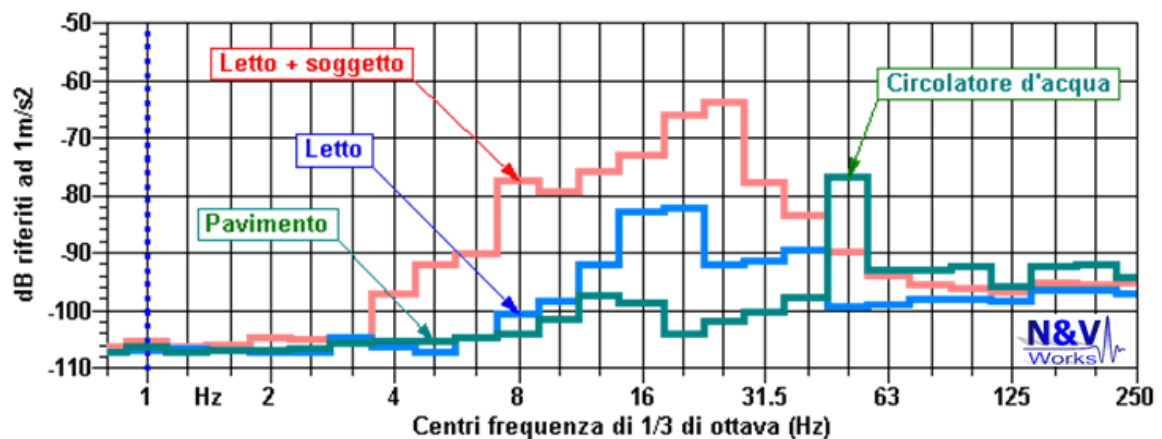
Dopo una notte - dalle 03.00 alle 05.00 - trascorsa ad osservare il rumore intrinseco del mio analizzatore e lo spettro del circolatore d'acqua del condominio e anche, devo dirlo, un po' incazzato, me ne sono andato, rincorso dal soggetto che si meravigliava come mai io non avessi misurato niente quando lei, poco, poco, le vibrazioni le aveva sentite. Alla mia offerta di lasciar perdere, non avrei fatto pagare niente ma... chiudiamola qua, il soggetto ha insistito per un'ulteriore prova. Evidentemente un qualche tipo di vibrazioni le sentiva davvero.

Abbiamo concordato la seguente strategia: abbiamo misurato la vibrazione di fondo sul pavimento e sul letto per verificare l'amplificazione dovuta ai modi di vibrare del letto, e la vibrazione sul letto con il soggetto sdraiato per verificare la vibrazione autoindotta da un corpo vivo.



A sinistra l'accelerometro per terra, in centro sul letto a destra sul letto con la persona in argomento. Sul comodino l'analizzatore Larson Davis Mod.2900.-

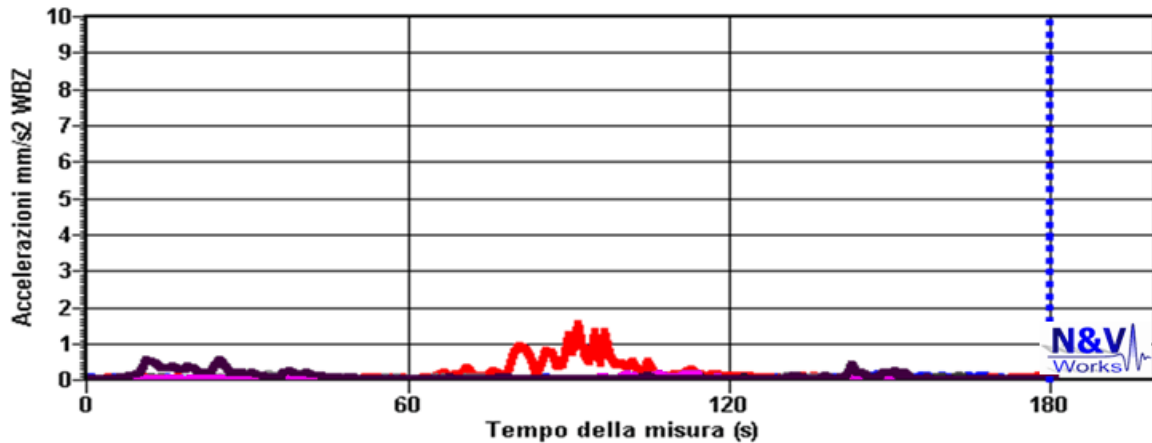
I risultati delle tre misure sono riportati nel grafico sottostante.- I valori non sono ponderati in alcun modo e sono dell'ordine da 1 mm/s<sup>2</sup> (-60 dB) a 0.01 mm/s<sup>2</sup> (-100 dB); il tempo di media è di 120 secondi, parliamo quindi di  $a_{Wz,eq,2'}$ .-



Lo spettro verde sono le vibrazioni sul pavimento, la componente a 50 Hz è controllata dal circolatore dell'acqua calda. Lo spettro blu sono le vibrazioni sul letto vuoto, si dimostra una amplificazione fra 16 e 20 Hz da 16-18 dB dovuta alla risposta del letto, si noti come l'effetto "filtro meccanico" di molla e materasso

ha eliminato la componente a 50 Hz. Lo spettro rosso sono le vibrazioni autoindotte dal soggetto. Si dimostra un livello massimo dell'ordine dei  $0.6 \text{ mms}^{-2}$  a 25 Hz. Sono tutti valori ampiamente al di sotto della soglia di percezione che per il soggetto supino è di  $3.6 \text{ mms}^{-2}$  ponderati.

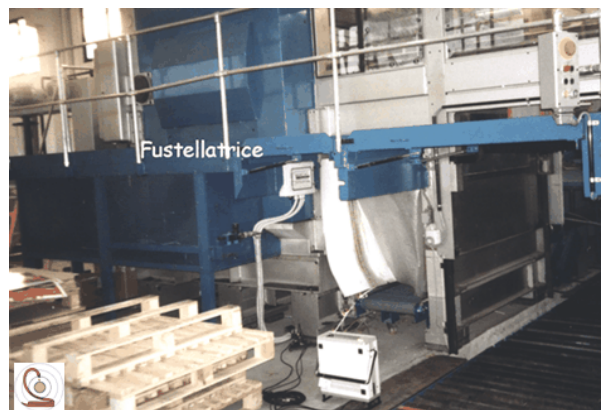
Si è poi concordato con il soggetto di posizionare l'accelerometro sul pavimento, vicino al letto, e di attivare, di sua iniziativa, nel corso della notte l'analizzatore Larson Davis 2900 ogni qual volta avvertisse delle vibrazioni. L'analizzatore è stato attivato per sei volte alle 23.40; 00.34; 01.46; 05.07; 05.16; 05.25; 05.56; con i seguenti risultati:



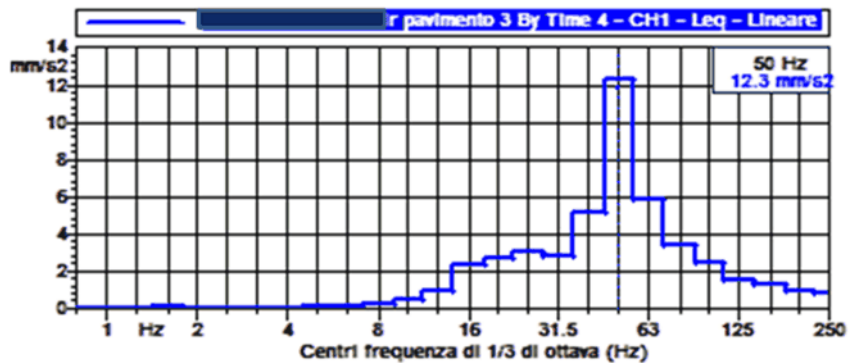
Si vedono sovrapposti i tracciati storici delle 7 registrazioni ponderate con il filtro  $W_z$  (con lo X & Y non si sarebbe visto neanche questo). La soglia della percezione si trova a  $3.6 \text{ mm/s}^2$ , è evidente che non ci sono vibrazioni ne continue ne percepibili.

Nonostante la mia raccomandazione di provare ad alzarsi in piedi quando sperimentava le vibrazioni, il soggetto non ha voluto esperire il tentativo, ritengo per la paura di scoprirsi portatore di patologia di interesse neurologico. E' evidente il fatto che il soggetto chiamava vibrazioni un tremore che la prendeva agli arti quando si sdraiava e durante la notte tanto da svegliarla. Consultato poi un psichiatra, di mia iniziativa, è risultato essere questa una sindrome abbastanza frequente in alcuni soggetti adulti che vivono, per una ragione o per l'altra, in condizioni di stress.

**13.- Un caso di vibrazione percettibile ma non misurabile come tale.-** Il caso b) del paragrafo 4, ovvero quello della fustellatrice<sup>27</sup>, si presentava così: la vibrazione presso il recettore risultava tattilmente percettibile senza esercitare una particolare attenzione, ed era accompagnata da una percezione di vibrazione cutanea (via aerea). La fustellatrice funzionava per otto ore al giorno, produceva di continuo impatti con un periodo di circa 0,6 secondi. I due recettori che avevano promosso l'intervento lamentavano un senso di malessere e nausea che cessava nell'ora di pranzo quando la fustellatrice veniva fermata. A dire il vero la nausea prendeva anche me e il mio collaboratore dopo 10 - 15 minuti all'interno del locale recettore. L'incarico da parte della proprietà della fustellatrice era di risolvere il problema, bisognava dimostrare se era un problema di rumore o di vibrazione e dare le indicazioni per eliminarlo.-



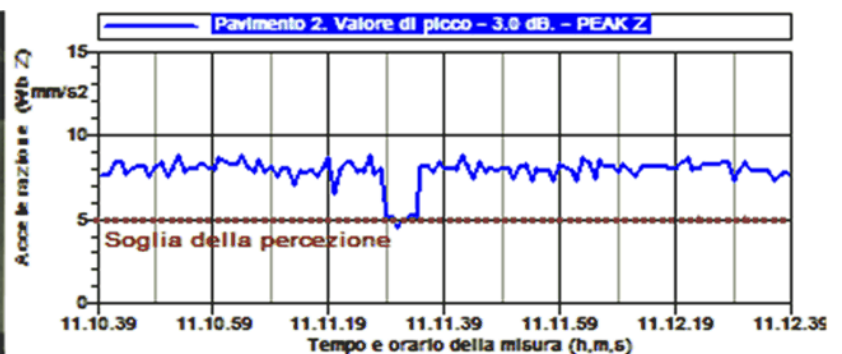
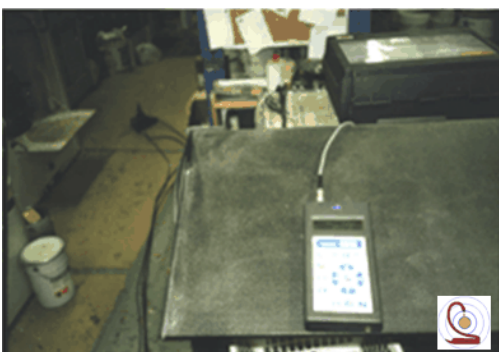
La misura di  $a_{Wz,rms}$  al recettore dava  $3,5 \text{ mms}^{-2}$ , quindi sotto soglia, mi aveva messo in crisi... vibrazione distintamente percettibile con i piedi (lasciamo perdere per il momento la via aerea) e... $3,5 \text{ mms}^{-2}(W_Z)$ !?!? Che fare? Mi venne in soccorso la ISO2631-2-1989 che in un annesso dichiarava più o meno: "in alcuni casi di vibrazioni impattive può ritornare utile eseguire la misura come picco ponderato, togliendo 3 dB ( $a_{Wz,picco} * 0.707$ ), per riportarsi al valore efficace, e confrontare il risultato con la soglia normalizzata di  $5 \text{ mms}^{-2}(W_Z)$ . Già, ma come misurare un picco pesato...??? Mi venne in aiuto lo HVM100 che era appunto in grado di misurare un picco pesato... ma  $W_k$  e non  $W_Z$ . Occorreva vedere che tipo di spettro c'era al recettore, per capire se passare da una misura fatta con ponderazione  $W_k$  ad una simulata  $W_Z$  fosse possibile, e possibilmente semplice.-



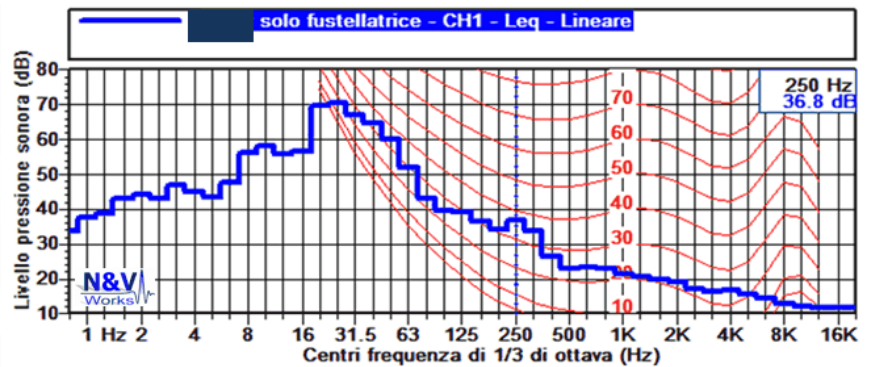
Lo spettro sul pavimento del recettore consisteva in una componente mono-frequenza (tonale) da 50 Hz dominante, bastava togliere<sup>28</sup> 3,8 dB al risultato del picco ponderato  $W_k$  per ottenere un verace  $W_Z$ !

La domanda "se fosse possibile", ed è possibile solo se abbiamo una componente mono-frequenza dominante, non è oziosa, perché il valore di picco è determinato dai rapporti di fase delle componenti in frequenza. Informazione che va completamente persa quando abbiamo in mano uno spettro di valori efficaci in terzi di ottava, dove l'informazione di fase non c'è più. Una postelaborazione in frequenza fatta su di uno spettro a banda larga non consentirà mai di arrivare al relativo valore di picco.

La cosa dette buona prova di sé perché il risultato della misura, facendo una doppia postelaborazione con Noise & Vibration Work (- 3,8 dB per passare da  $W_k$  a  $W_Z$ , altri -3 dB per passare al valore efficace convenzionale voluto dall'annesso) è stato questo:



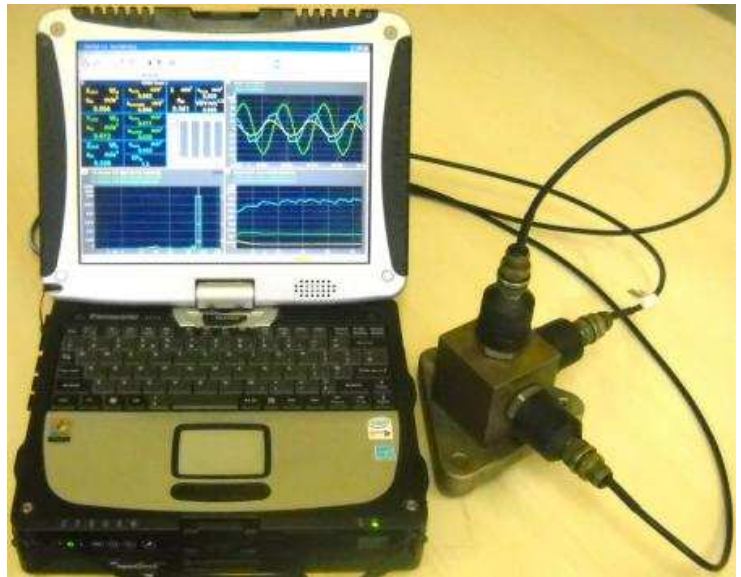
Restava il problema della percezione delle vibrazioni per via aerea, che, a sensazione, erano all'origine del senso di nausea e delle quali era ovviamente responsabile il rumore reirradiato da tutta la struttura (pareti, soffitto e pavimento vibranti); nella figura sottostante vediamo lo spettro di rumore re-irradiato dalle vibrazioni.-



Certo, la posizione del fonometro non è la più "canonica", ma volevo solo avere un'idea a quale tipo di spettro si riferisse quella percezione di vibrazioni per via area che dava un così forte senso di nausea. Vediamo che sono sufficienti livelli dell'ordine dei 70 dB<sub>lps</sub> a 20-25 Hz per percepirsi vibranti a livello toraco-addominale.-

### 13.- La strumentazione per la misura.-

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 storia dei valori globali ponderati. Lo spettro non è una indicazione di norma ma serve per identificare la sorgente quando questa non sia evidente. E comunque ci serve la storia degli spettri per calcolare in post-elaborazione i valori di  $W_{Z,X,Y}$  come da UNI9614 (fin che c'è, attualmente magg.2011, è in revisione). Nella foto a dx vediamo l'analizzatore Soundbook®<sup>29</sup> a quattro canali con

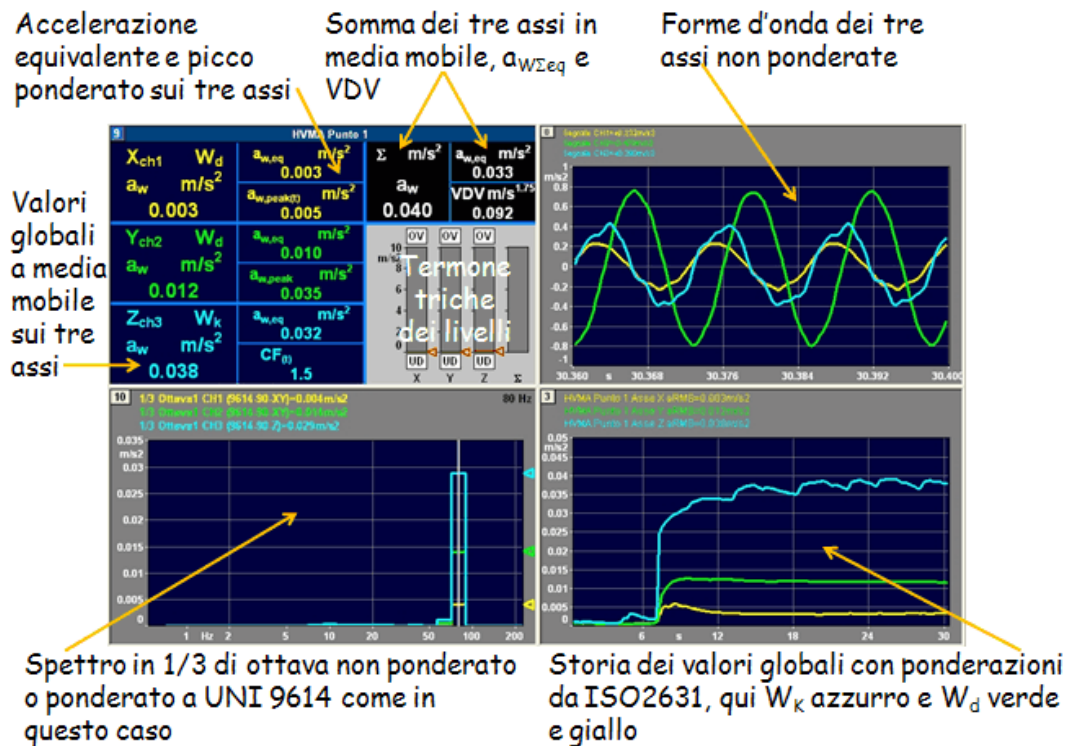


l'accelerometro triassiale per esterni Terna393 di Spectra srl.- Si tratta di un PC militare costruito solidale con un analizzatore di spettro da 2, 4 o 8 canali; le misure vengono gestite dal software SAMURAI<sup>30</sup>.- SAMURAI consente la registrazione audio e video sincrona alla misura vedi filmato 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, purchè acquisite, anche altre funzioni, come lo spettro FFT, lo spettro 1/n, i livelli sonori, riascoltando sia gli eventi sonori che quelli vibratorii. La schermata visualizzata è l'interfaccia utente della opzione di SAMURAI HVMA<sup>31</sup> (Human Vibration Meter and Analyzer).

L'opzione HVMA è stata fatta per avere direttamente i valori globali in modo da non dipendere da una postelaborazione dello spettro e dagli errori di "trascinamento" dei filtri a bassa frequenza (rif.13); con le ponderazioni di ISO2631, la somma dei tre assi, e a scelta o contemporaneamente le analisi in frequenza in FFT e/o da 1/3 ad un 1/48 di ottava, nella figura sottostante vediamo l'interfaccia utente.-





Nella figura lo spettro è su scala lineare ed è il tipico spettro prodotto da un motore che va a 3.000 rpm o 50 Hz, è ponderato UNI9614; difatti ne ricaviamo un  $W_z$  da 29  $\text{mms}^{-2}$ , da spettro; e una  $W_k$  da 39  $\text{mms}^{-2}$  dalla storia dei valori globali. Volendo si può visualizzare la storia ricavata dagli spettri come storia ponderata UNI o ISO. HVMA contiene molte altre potenzialità di analisi, vi invitiamo a contattarci se volete approfondire le sue applicazioni.



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, è gestibile sia da piattaforme a 32 bits che a 64 bits. Il software SAMURAI che pilota Apollo va

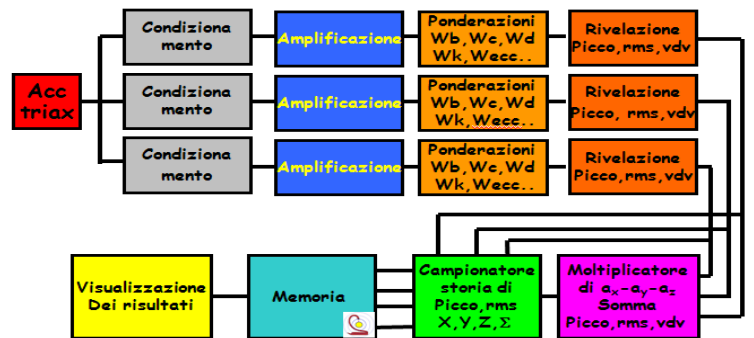
installato sul vostro PC, o su uno dedicato, e fornisce le stesse prestazioni di Soundbook:

- conforme alle norme IEC651 tipo 1 e IEC804 gruppo I, IEC61672 classe 1, con opzione Human Vibration Meter & Analyzer 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.



Una alternativa minimale può essere il vibrometro per l'esposizione umana a alle vibrazioni Larson Davis HVM100<sup>32</sup> (Human Vibration Meter). E' uno strumento essenziale, non dispone di analisi in frequenza, ma per valutare il rischio da vibrazioni in ambiente di lavoro, o il disturbo da vibrazioni in ambiente di vita, non c'è nessuna indicazione a conoscere il contenuto spettrale; questo è sintetizzato nei valori globali ( $W_{k,d,h}$ ) finalizzati alla dimostrazione dell'equivalente percepibile delle vibrazioni. Va ricordato che i filtri di ponderazione utilizzati per il rischio di esposizione hanno origine dalle soglie di percezione, e questo vale sia per  $W_d$  &  $W_k$  sia per  $W_h$ <sup>33</sup>. HVM100 è in grado di campionare a 1 campione/secondo e memorizzare in continuo gli assi X,Y,Z &  $\Sigma$  per 6,6 ore. Volendo estendere il tempo di monitoraggio si può utilizzare l'opzione "autotransfert" di Noise &

Vibration Work. Con questa opzione HVM100 deve lavorare insieme con un PC perché i suoi dati vengono inviati al disco rigido del PC, a questo punto il tempo di misura disponibile dipende solo dalla quantità di spazio libero del disco rigido.- Dallo schema a blocchi semplificato, a destra, si può vedere come HVM100 consista di tre canali indipendenti di misura per ognuno dei quali ci sono i quattro stadi di elaborazione del segnale proveniente da un accelerometro:



- condizionamento, ovvero scegliere l'ingresso ICP o di carica;
- amplificazione, per rendere il segnale gestibile nelle operazioni seguenti;
- ponderazione in frequenza, per avere un segnale finalizzato allo scopo della misura;
- ponderazione in ampiezza, con rivelazione del valore efficace e di picco nel periodo di campionamento, calcolo della accelerazione equivalente, calcolo della media alla quarta potenza o  $rm_{quad}$  o VDV;
- Moltiplicatore, applica le ponderazioni di ampiezza prima di fare la somma vettoriale, ad esempio:  $a_{\Sigma} = [(a_y * 1,4) + (a_x * 1,4) + (a_z * 1)]^{0,5}$ ;
- campionatore della storia, che oltre ai tre assi e la loro somma vettoriale può campionare in contemporanea anche i valori di picco massimo ponderato fra un campione e il successivo;
- memoria, dove vengono memorizzati i valori finali della misura ( $a_{Weq,T}$ , massimi, minimi sulla ponderazione temporale e sui picchi, ecc) e i campioni della storia con un'autonomia di 6,6 ore campionando ad 1 secondo;
- visualizzazione dei risultati, limitata ai valori di uno degli assi per volta, in qualunque formato di quelli calcolati dallo stadio di rivelazione, ad esempio nella figura in alto si vede  $a_{WZeq,2}$ ;

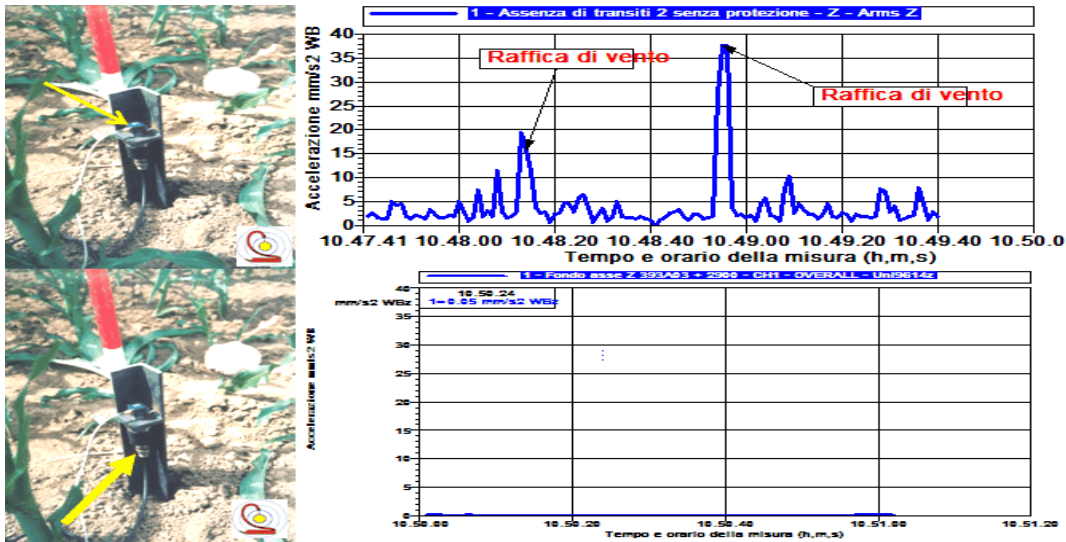
Tutte queste funzioni vengono svolte anche dalla opzione HVMA di Soundbook che vi aggiunge la possibilità di avere una storia di spettri ponderata a UNI9614, una memoria sterminata, l'analisi in frequenza 1/3 di ottava, FFT, & 1/n, contemporanee o indipendenti, e una interfaccia utente (la schermata di visualizzazione) che consente di tenere sotto controllo dell'operatore tutte le funzioni misurate durante la misura. HVM100 non ha le ponderazioni  $W_{X,Y,Z}$  della UNI9614 ma bisogna usare  $W_k$  con una sovrastima di circa 3 dB sui valori che misureremmo, nella stessa circostanza, con  $W_z$ . Mentre non c'è nessuna differenza fra  $W_d$  e  $W_{X,Y}$ .- Quindi, purché dichiarato e concorde, si può fare la misura con  $W_k$  e dare come  $W_z = W_k * 0,707$ .-

**14.- Tipologia e posizionamento e degli accelerometri.-** Se le misure sono fatte in casa va bene qualunque accelerometro che abbia almeno 100 mV/g, meglio 1.000 mV/g. Un accelerometro ICP da 100 mV/g tende (può dipendere dallo strumento di misura) ad avere un rumore elettrico equivalente alla vibrazione dell'ordine dei<sup>34</sup> 1-3  $\text{mms}^{-2} W_Z$ , mentre noi andiamo a vedere se abbiamo superato o meno i 3,6  $\text{mms}^{-2}(W_{X,Y})$  o i 5  $\text{mms}^{-2}(W_Z)$ . Con 1.000 mV/g abbiamo un rumore 10 volte più basso e va sicuramente meglio, sia per riconoscere gli eventi che per le misure ante-opera. Va poi fatta una distinzione

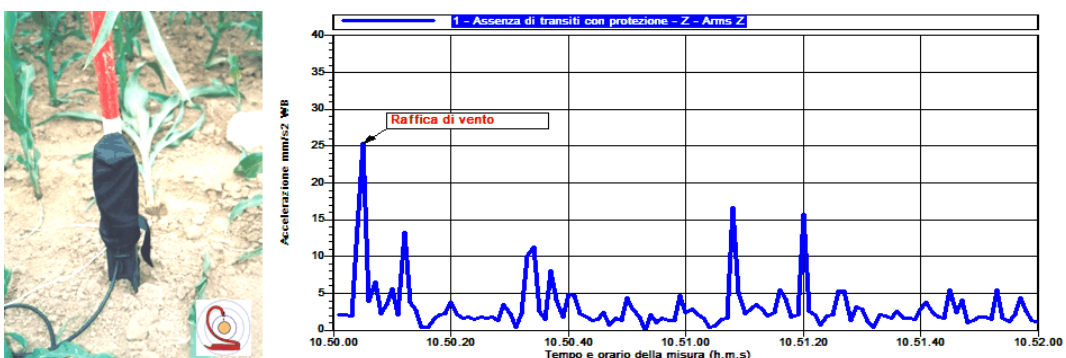
Typical Base Strain Sensitivity (at 250  $\mu\epsilon$  in base plane): 0,01  $\text{ms}^{-2}/\mu\epsilon$   
 Typical Temperature Transient Sensitivity (3Hz LLF): 0,1  $\text{ms}^{-2}/^\circ\text{C}$   
 Specifications obtained in accordance with ANSI S2.11-1969

importante: misure fatte in casa o comunque al chiuso e misure fatte all'aperto. Il motivo è che il cristallo piezoelettrico è sensibile ai transienti termici. Se piazziamo un comune accelerometro

all'aperto, se è nuvoloso e non c'è vento, e non passano vicino mezzi pesanti questo farà il suo dovere, ma se vanno via le nuvole e incomincia dell'irraggiamento solare, o c'è del movimento dell'aria (brezza o spostamento dell'aria causato dai mezzi pesanti) allora incomincia la processione dei numeri del Lotto. Un accelerometro con una TTTS<sup>35</sup> da 0,1  $\text{ms}^{-2}/^\circ\text{C}$  ci darà un segnale di 100  $\text{mms}^{-2}$  per un transiente termico di 1  $^\circ\text{C}$ , mentre noi andiamo a cercare se è superata o meno la soglia dei 3,6 o 5  $\text{mms}^{-2}(W_{X,Y\&Z})$ . Vediamo un caso sperimentato in corso di misure ante-opera.



Nella figura soprastante vediamo due accelerometri montati a magnete sullo stesso supporto, quello sopra, azzurro, un comune accelerometro triassiale, quello sotto, nero con connettore MIL, ad alta insensibilità ai transienti termici. Notare dalle foto che c'è irraggiamento solare. Le due misure sono state fatte contemporaneamente, l'accelerometro comune ci "dice" che c'è una vibrazione di fondo da 1 a 11  $\text{mms}^{-2}(W_Z)$  con due eventi per un MTVV rispettivamente di 20 & 37  $\text{mms}^{-2}(W_Z)$ ; l'accelerometro ad alta insensibilità ai transienti termici ci dice che la vibrazione di fondo è minore di 1  $\text{mms}^{-2}(W_Z)$  e che non ci sono eventi. Proteggere l'accelerometro serve a poco, quasi niente. Vedere sotto, misura con accelerometro "protetto".



Per quanto riguarda la scelta dell'accelerometro occorre prima scegliere la sensibilità, e questa deve essere di minimo 1.000 mV/g o 100 mV/ms<sup>-2</sup>, poi decidere se si vuole fare comunque le misure su tre assi (questa scelta è molte volte obbligatoria in quanto imposta dai capitolati) o si crede sia sufficiente un asse, in fine se si devono far misure solo all'interno delle abitazioni o anche all'esterno. Se si vuole poter operare sia in interni che all'esterno allora sarà obbligatorio scegliere un accelerometro ad alta immunità dai transienti termici.-



Nella figura a sx vediamo la soluzione Spectra per l'alta immunità ai transienti termici, costituita dalla Terna393 da 1.000 mV/g, ogni elemento della terna può essere usato per impieghi mono-assiali come da figura a dx, un singolo sensore è alto 56 mm e pesa 230 grammi.



Una soluzione triassiale più economica, solo per interni, sempre da 1.000 mV/g è il triassiale Spectra 356, da 20 mm di lato e 25 grammi di peso, può esser montato con nastro biadesivo, o con cera o con la basetta metallica. A destra è la soluzione mono assiale Spectra 352 da 1.000 mV/g, alto 30 mm e dal peso di 25 grammi. Entrambi questi sensori non possono essere



utilizzati per misure all'esterno.-

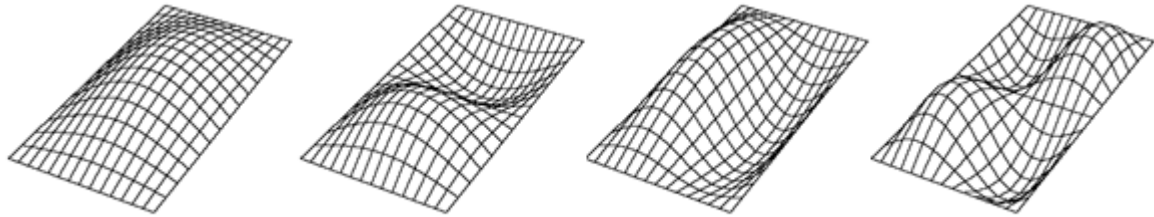
Per il fissaggio degli accelerometri nelle abitazioni si può usare indifferentemente nastro biadesivo sottile o cera d'api. Se c'è moquette bisognerebbe bucarla o avere dei "piedini conici" tipo il Seismometer<sup>36</sup> 3D o più semplicemente fare le misure altrove.



In linea di principio, fino ad un metro al secondo quadro di accelerazione lineare si può usare il posizionamento a gravità, purchè il sensore o il gruppo basetta-sensore pesi almeno 3-4 chili. Questo approccio si mangia circa 1 dB (- 11%) sopra gli 80 Hz, ma sarà utile soprattutto su superfici irregolari e quando c'è poco tempo per imbastire l'impianto di misura.-



La scelta sul dove posizionare l'accelerometro va fatta in collaborazione con il recettore: ci si fa indicare in quale posto dell'ambiente interessato lui/lei percepisce la vibrazione più forte, e là si fa la misura. Se non c'è un "testimone", allora bisogna evitare di posizionare il sensore in un nodo dei modi tipici di un solaio.

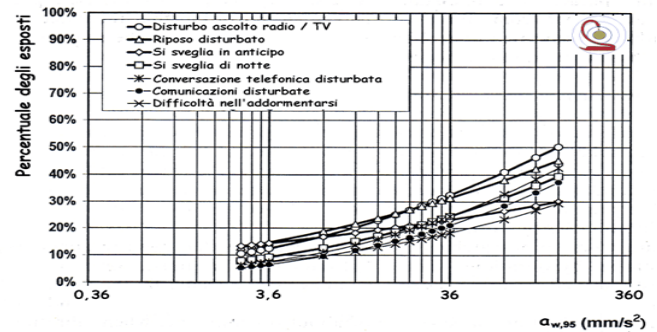
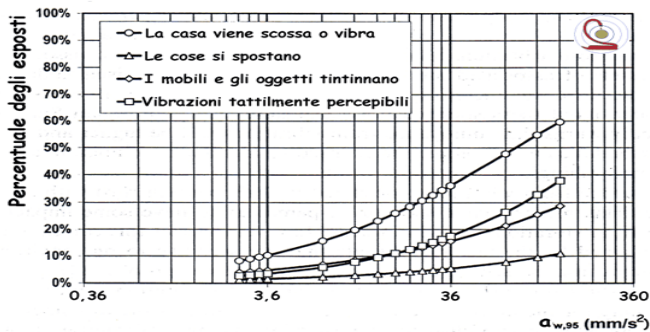


Modi di vibrare tipici di un solaio: I°, II°, III° & IV° modo

Ad esempio mettendo il sensore al centro dell'ambiente si prenderà sicuramente il primo modo, ma il centro sarà un nodo per i modi immediatamente successivi al primo, che andranno se non persi molto sottovalutati. Se si divide il solaio in quattro quadranti, allora il centro di uno dei quadranti può essere il punto di osservazione migliore.

## Riferimenti

<sup>1</sup> Nel riferimento 18 si può trovare una lista più esaustiva degli effetti delle vibrazioni sui recettori



<sup>2</sup> Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore

<sup>3</sup> Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico

<sup>4</sup> Quattro casi su 120 nella casistica di chi scrive.-

<sup>5</sup> Esiste anche una "norma sperimentale" La UNI11048-2003, il cui merito maggiore è quello di non volersi sostituire alla UNI9614, ma solo di affiancarla, creando così una gran confusione.-

<sup>6</sup> Nella casistica di chi scrive 8 casi su 120. Se il solaio non è perfettamente in piano il mobilio si sposta lentamente anche per valori inferiori ai 70-80  $\text{mm/s}^2$  ( $W_z$ )

<sup>7</sup> R. T. Verrillo, "Investigation of some parameters of the cutaneous threshold for vibration," Journal of the Acoustical Society of America, vol. 34, pp. 1768-1773, November 1969

<sup>8</sup> Jones, L.- Human factors and haptic interfaces. (senza data) [www.ima.umn.edu/talks/workshops/6-14-15.2001/jones/jones/.pdf](http://www.ima.umn.edu/talks/workshops/6-14-15.2001/jones/jones/.pdf)

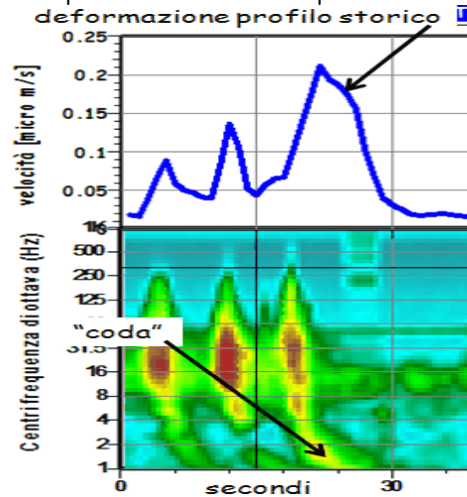
<sup>9</sup> Nella casistica di chi scrive 10 casi su 120

<sup>10</sup> A parte i riferimenti 7&8 che hanno un carattere molto generale, non si trova gran ché nella letteratura scientifica di questo aspetto della percezione delle vibrazioni in ambiente di vita (soglie, livelli, frequenze, ecc), o quanto meno, io non sono stato capace di trovarne in questi ultimi anni. I riferimenti 7&8 li avevo trovati proprio nel contesto di un caso di esposizione a vibrazioni cutanee per il quale cercavo una qualche spiegazione scientifica. Peraltro il fenomeno, quando c'è, è osservabilissimo e ognuno se lo può auto-dimostrare attraverso l'auto-osservazione.-

<sup>11</sup> L'ingresso ICP sta ad indicare che dall'analizzatore proviene la alimentazione in CC per il preamplificatore contenuto nell'accelerometro

<sup>12</sup> Occorre produrre una storia di spettri ponderati "Slow" in ampiezza campionati a 0,5 secondi. Se le vibrazioni hanno carattere impattivo e si usa MTVV ( vedi rif.14) allora occorre campionare a 0.25 secondi.

<sup>13</sup> Si può vedere in basso, come sonogramma, la "coda" prodotta dal ritardo dei filtri, sopra, la deformazione del profilo storico costruito come somma di potenza dei campioni di spettro. Ponderazione temporale: Slow.-



<sup>14</sup> Maximum Transient Vibration Value, ovvero valore massimo di una vibrazione transiente

<sup>15</sup> Vedi all'indirizzo <http://www.spectra.it/download/vibrazioni/Documentarelasorgentedivibrazioni.zip>

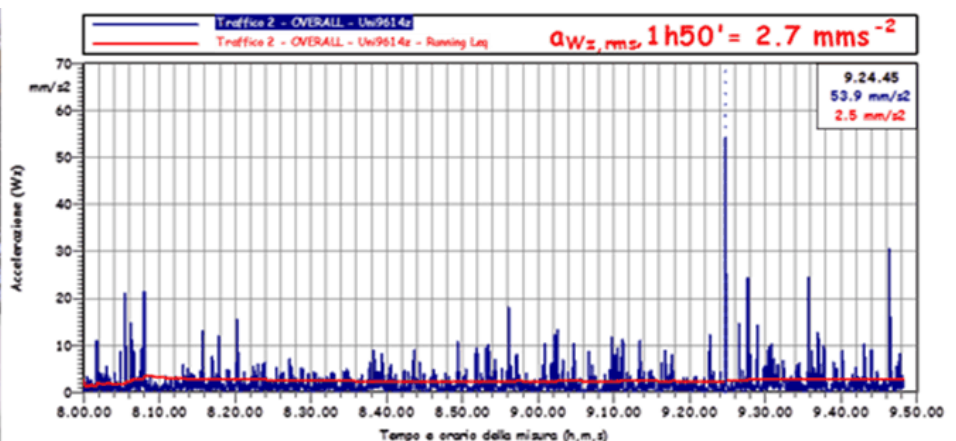
<sup>16</sup> La soglia di "sobbalzo" dei mobili dipende ovviamente anche dallo spettro lineare nel senso che se la risonanza dominante della soletta è intorno ai 12- 40 Hz avremo sobbalzo o spostamento dei mobili intorno agli  $80 \text{ mms}^{-2}$  ( $W_z$ ) se la risonanza è intorno agli 60 - 100 Hz potremo avere sobbalzo o spostamento anche per valori globali ponderati più bassi

<sup>17</sup> Wcomb. È tratta dalla UNI9614. La ISO 2631-2 2003 usa una ponderazione in frequenza indicata come  $W_m$ , al par.4.4 dice che la  $W_m$  è uguale alla precedente  $W_B$  o  $W_{comb}$  della 9614

<sup>18</sup> NT ACOU 106 Noise - Assessment of annoyance caused by vibrations in dwellings from road and rail traffic by means of socio-vibrational and social surveys Approved 2001-05, 21 pages

<sup>19</sup> Chi desidera approfondire può consultare il Norwegian Standard NS8176.E: "Measurement of vibration in building from landbased transport and guidance to evaluation of its effect on human beings". Questa norma ricava I suoi dati dal riferimento 18

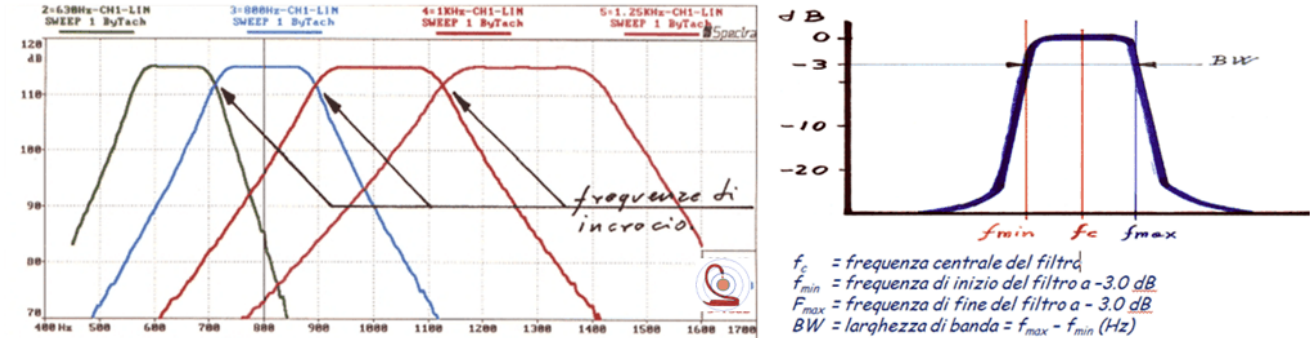
<sup>20</sup> Si può vedere dalla figura sottostante come vibrazioni da traffico su asfalto in cattivo stato di manutenzione diano valori di MTVV molto variabili, qualcosa di simile avviene per transiti ferroviari.-



<sup>21</sup> Vibrations transmises par le sol - Vibrations provoquées le batiments par la circulation ferroviaire. Analyses des rapports de mesures effectuées sur divers réseaux. ORE, Question D 151, Rapport 5. Utrecht 1983

<sup>22</sup> <http://www.uic.org/etf/rapporttechnique/rapporttechnique-resultat.php?codeCommite=D+151&reportno=&motcle=>

<sup>23</sup> Le frequenze di incrocio dei filtri passa-banda, si trovano a -3,0 dB dalla zona lineare (0,0 dB) della banda passante compresa fra  $f_{min}$  &  $f_{max}$ . Questo per far sì che la somma di potenza di uno spettro dia lo stesso risultato del segnale di ingresso anche per segnali con frequenza corrispondente ad una delle frequenze di incrocio. Un segnale con 100 dB di livello (qualsiasi riferimento) e frequenza corrispondente ad una delle frequenze di incrocio verrà letto dai due filtri, che hanno quella frequenza di incrocio, come 97 dB l'uno e 97 dB l'altro, ma  $97 \text{ dB} + 97 \text{ dB} = 100 \text{ dB}$ .



<sup>24</sup> ISOTR 7849 Estimation of airborne noise emitted by machinery using vibration measurements

<sup>25</sup> Se vogliamo conoscere quello che viene percepito, l'ordine di grandezza della sonorità sperimentata, occorre usare la ponderazione per livelli elevati, sopra gli 85 dB(B) si passa al dB(C).

<sup>26</sup> Entra nella condizione di "stress" un soggetto che si trova in una situazione comunque spiacevole, dalla quale vorrebbe uscire ma non può uscirne

<sup>27</sup> La fustellatrice è una macchina che produce le linee di piegatura delle scatole di cartone

Confronto fra i filtri di ponderazione per l'asse Z Wz (ISO2631-1-1978) & Wk (ISO2631-1-2003)					
Frequenza (Hz)	Wk-2001 (dB)	Wz-1978 (dB)	Frequenza Hz	Wk-2001 (dB)	Wz-1978 (dB)
0,80	-6,4		20,00	-3,9	-7,8
1,00	-6,3	-6,1	25,00	-5,8	-9,9
1,25	-6,3	-5,1	31,50	-7,9	-12
1,60	-6,1	-4,2	40,00	-10,0	-14
2,00	-5,5	-3,2	50,00	-12,2	-16
2,50	-4,0	-2,1	63,00	-14,6	-18
3,15	-1,9	-1,1	80,00	-17,5	-20,1
4,00	-0,3	-0,2	100,00	-21,0	
5,00	0,3	0	125,00	-25,5	
6,30	0,5	0	160,00	-30,7	
8,00	0,3	-0,1	200,00	-36,3	
10,00	-0,1	-1,6	250,00	-42,2	
12,50	-0,9	-3,8	315,00	-48,1	
16,00	-2,2	-5,7	400,00	-54,1	

<sup>28</sup> Per info più dettagliate vedi: <http://www.spectra.it/SOUNDBOOK-DESCR.htm>

<sup>29</sup> Per info più dettagliate vedi: <http://www.spectra.it/SOUNDBOOKPREMULTIMEDIA.htm>

<sup>30</sup> <http://www.spectra.it/SOUNDBOOK-HVMA.htm>

<sup>31</sup> <http://www.spectra.it/LD-HVM100.htm>

<sup>32</sup> Vedi ISO2631 e ISO5349

<sup>33</sup> Va verificato cercando una zona lontana dal traffico e da sorgenti di vibrazione in generale.-

<sup>34</sup> Typical Transienti Temperature Sensitivity. E' importante capire che non si tratta di variazione della sensibilità con la temperatura (che è comunque una caratteristica di ogni accelerometro) ma bensì di un pseudo-segnale generato nel cristallo piezoelettrico da una migrazione di cariche prodotta da una **variazione brusca della temperatura** o transiente termico

<sup>35</sup> <http://www.spectra.it/SINUS-VELOCIMETRO-TRIAX.htm>