



Analisi ed interpretazione delle misure. 20-09-09

La definizione dei tempi di riverberazione nelle stanze di abitazione

bruno.abrami@tin.it



B.Abrami

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

1.- Premessa.- Le note che seguiranno sono da intendersi legate alla specificità del comportamento dell'energia acustica in ambienti con volumi da circa 20 a circa 200 m³. La progressiva attuazione del decreto sui requisiti passivi acustici degli edifici ha moltiplicato la pratica delle misure e dei calcoli, senza che vi sia stato un parallelo approfondimento della teoria del fenomeno che guidi l'azione pratica. Le conseguenze di questo mancato approfondimento sono la bieca applicazione della norma ISO140-4 che ha come conseguenza una dispersione dei risultati delle misure, fra operatori, dell'ordine dei 10 dB. Sono indirizzate soprattutto a chi crede di conoscere alla perfezione l'argomento per la molteplicità delle misure fatte, ma non si è mai posto la domanda: "il metodo di misura e di interpretazione che uso è quello giusto?". Nelle pagine che seguiranno si vogliono evidenziare le criticità di queste procedure e proporre un approccio affidabile. Si daranno per scontate le nozioni di base dell'acustica, e quanto di teorico che va oltre le nozioni di base verrà richiamato per sommi capi, al solo scopo di evidenziare le criticità.

2.-Misure di fono isolamento e di calpestio.- In un ambiente confinato dove sia attiva una sorgente sonora si produce un campo acustico complesso costituito da una componente attiva (campo direzionodirezionale), una componente reattiva (campo diffuso-multidirezionale) e una zona di somma fra i due campi (a ± 10 dB uno dall'altro). La sorgente può essere tanto la classica sorgente isotropica quanto una parete divisoria o un solaio forzati a vibrare dalla sorgente isotropica o dalla macchina da calpestio. Nella stanza attigua (eccitazione per via aerea) o sottostante (eccitazione a calpestio) la parete divisoria o il soffitto vibranti generano un campo sonoro diretto che nasce e si propaga su di una sezione pari alla superficie della sorgente. Chiameremo ambienti riceventi quelli eccitati dalla vibrazione delle pareti divisorie e soffitti e ambienti trasmettenti quelli in cui sono attive le sorgenti isotropica o di calpestio.-

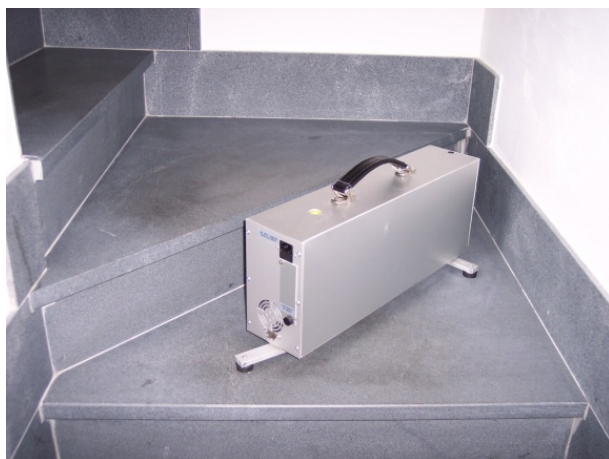


Figura 1: macchina da calpestio elettromagnetica SEM50, omologata dal PTB, e la sorgente isotropica DL304 con magneti al neodimio (leggera:9,5 kg).-

La presenza del contributo di un campo diffuso di valore variabile, da un locale abitativo all'altro, sul livello sonoro da misurare in ricezione, rende improponibile la misura del potere fonoisolante apparente normalizzato o del livello normalizzato di calpestio senza neutralizzare l'influenza della variabilità del

livello del campo diffuso. Per neutralizzare questa variabilità si è preso a riferimento un tempo di riverbero (T_0) di 0,5 secondi, caratteristico di un locale di abitazione di medie dimensioni arredato. Il livello misurato in ricezione viene quindi normalizzato ad un campo diffuso da 0,5 secondi sottraendo $10\log_{10} T_m/T_0$, dove T_m indica il tempo di riverbero misurato nell'ambiente ricevente. Affinché questa procedura abbia un senso è altresì necessario che sia il Livello in ricezione (L_R) sia il Livello di calpestio (L_n) siano misurati obbligatoriamente in campo diffuso. Lo stesso dicasi, per altri motivi del Livello in trasmissione (L_T).

3.-Calcolo del tempo di riverbero nei locali di abitazione.- Chi procede tramite calcolo adotta - di regola - la nota formula di Sabine, misura volume e superficie, calcola le unità assorbenti del locale e le inserisce nella formula. Questa formula da risultati attendibili solo per valori bassi di α e solo se siamo alla presenza di un campo riverberante dalle caratteristiche ragionevolmente vicine a quelle di un campo riverberante teorico:

- densità di energia per unità di volume [J/m^3] costante nel volume dell'ambiente;
- direzione di propagazione equiprobabile in tutte le direzioni;
- cammino libero medio fra una riflessione e l'altra [ℓ] costante a tutte le frequenze.

Se consideriamo un ambiente dotato del 50% di unità assorbenti il livello del campo riverberante decresce di 3,0 dB ad ogni riflessione. Ogni riflessione successiva avverrà - in media - dopo che il fronte considerato del campo avrà percorso il suo cammino libero medio. Il tempo di riverbero (T_{60}) è definito come il tempo impiegato dall'energia del campo riverberante per decrescere ad un milionesimo del suo valore iniziale o a -60 dB del livello della pressione sonora iniziale del campo. Ogni variazione di ℓ , ad unità assorbenti, volume e superficie costanti, determinerà una variazione del tempo necessario per arrivare a meno 60 dB.-

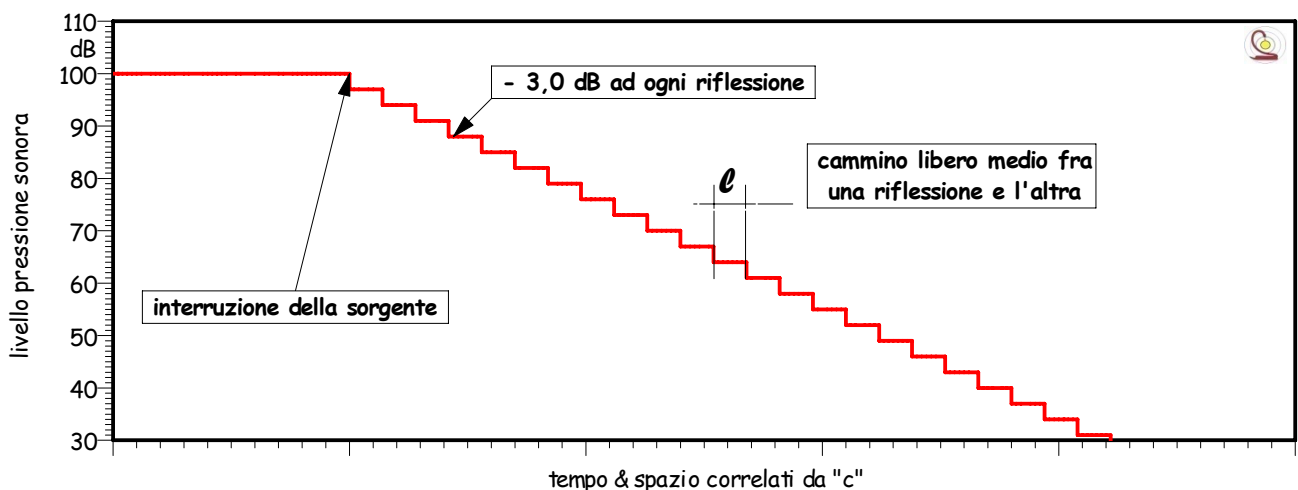


Figura 2: Schema del decadimento di un campo sonoro diffuso in un ambiente con il 50% di unità assorbenti.-

In un ambiente abitativo reale, però le cose sono alquanto differenti. Fintanto che la sorgente eccita il volume d'aria dell'ambiente con dell'energia a banda larga, tipo rumore rosa o rumore bianco, il volume vibra al ritmo impostogli dalla sorgente (regime di vibrazione forzata). Non appena la sorgente viene interrotta (regime di vibrazione libera) le condizioni di vincolo determinate dalle pareti rigide e dalla loro distanza reciproca danno luogo alla comparsa dei cosiddetti modi propri.

Un rumore bianco o rosa è costituito da un numero tendenzialmente infinito di componenti in frequenza, la cui natura viene espressa dicendo che l'intervallo Δf fra una componente e la successiva tende a zero. La comparsa dei modi consiste nella concentrazione della energia eccitante, da banda larga, ad un numero molto alto ma finito di singole componenti tonali o monofrequenza. Il passaggio da segnale casuale (quale è il rumore) a segnale deterministico (quale è una componente tonale) determina:

- L'aumento del libero cammino medio fra una riflessione e l'altra nel campo delle frequenze da circa 100 a circa 600 Hz (dipende dal volume del locale);
- la comparsa di ventri e nodi (onde stazionarie) alla distanza di un quarto di lunghezza d'onda.

I modi possono essere assiali, tangenziali o obliqui. Dei tre quello che porta la maggiore quantità di energia è il modo assiale (riflessione fra pareti parallele) e per semplicità inizialmente considereremo solo questo. Per prevedere quali saranno le frequenze dei modi assiali (come da figura sottostante) di un ambiente dobbiamo considerare le tre dimensioni la lunghezza (L_x), la larghezza (L_y), l'altezza (L_z) e la velocità di propagazione del suono [c].

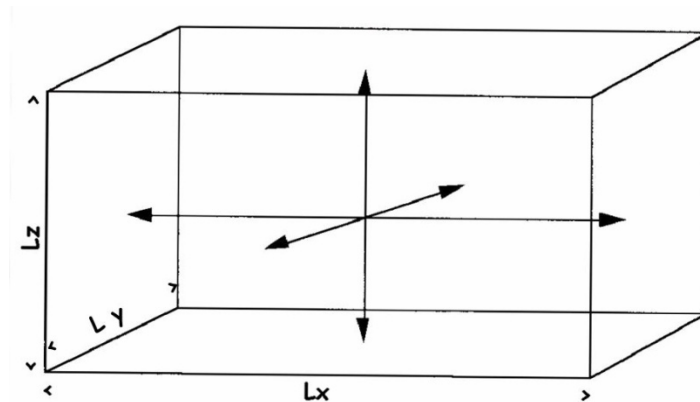


Figura 3: schema dei modi assiali.-

Per L_x di 4,64 metri, la frequenza per la quale avremo due massimi di pressione ai lati ed un nodo al centro (pari a mezza lunghezza d'onda), per $c = 340 \text{ ms}^{-1}$ sarà: $f_{1x} = 340/2 \cdot L_x = 36,6 \text{ Hz}$.- Il secondo modo (f_{2x}) di L_x sarà a 71 Hz con tre ventri e due nodi. Il cammino libero medio fra una riflessione e l'altra per i modi assiali della direzione L_x sarà pari a 4,64 metri cui corrisponde un tempo di propagazione, per $c = 340 \text{ ms}^{-1}$, di 13,6 millisecondi.-

Per L_y di 3,68 metri, la frequenza per la quale avremo due massimi di pressione ai lati ed un nodo al centro (pari a mezza lunghezza d'onda), per $c = 340 \text{ ms}^{-1}$ sarà: $f_{1y} = 340/2 \cdot L_y = 46,2 \text{ Hz}$.- Il secondo modo (f_{2y}) di L_y sarà a 92,4 Hz con tre ventri e due nodi.- Il cammino libero medio fra una riflessione e l'altra per i modi assiali della direzione L_y sarà pari a 3,68 metri cui corrisponde un tempo di propagazione, per $c = 340 \text{ ms}^{-1}$, di 10,8 millisecondi.-

Per L_z di 2,92 metri, la frequenza per la quale avremo due massimi di pressione ai lati ed un nodo al centro (pari a mezza lunghezza d'onda), per $c = 340 \text{ ms}^{-1}$ sarà: $f_{1z} = 340/2 \cdot L_z = 58,2 \text{ Hz}$.- Il secondo modo (f_{2z}) di L_z sarà a 116,4 Hz con tre ventri e due nodi.- Il cammino libero medio fra una riflessione e l'altra per i modi assiali della direzione L_z sarà pari a 2,92 metri cui corrisponde un tempo di propagazione, per $c = 340 \text{ ms}^{-1}$, di 8,6 millisecondi.-

Il cammino libero medio (ℓ) in un campo diffuso e in un ambiente sabiniano (ovvero, sommariamente, dove nessuna delle tre dimensioni è maggiore del doppio delle altre) è:

$$\ell = 4V/S \quad [m]$$

dove V è il volume dell'ambiente in m^3 e S è la superficie in m^2 . Per l'ambiente considerato ($4,64 \times 3,68 \times 2,92$) avremo un volume pari a $48,86 m^3$ e una superficie di $82,74 m^2$ ed un cammino libero medio pari a

$$\ell = (4 \times 48,86) / 82,74 = 2,4 m$$

Nel momento del regime di vibrazione libero del volume d'aria del locale avremo, con la comparsa dei modi, dei tempi di riverbero significativamente più lunghi di quelli calcolati.- Sempre restando all'ambiente dello schema precedente che ci offriva il 50% di unità assorbenti avremo, per i modi assiali un aumento del cammino libero medio con conseguente aumento dei tempi di riverberazione.-

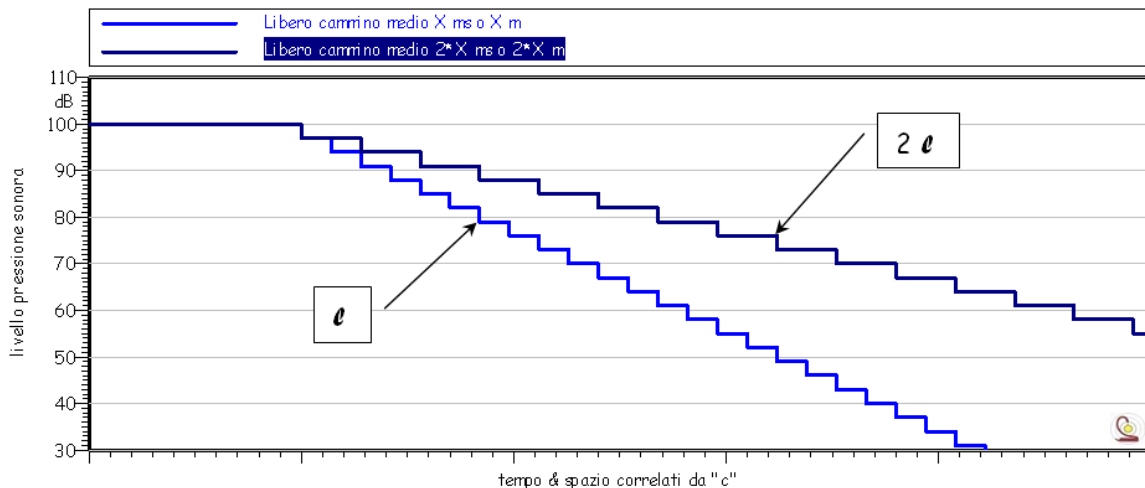


Figura 4: schema della variazione di T_{60} al variare del cammino libero medio ℓ .

Considerando il libero cammino medio e l'assorbimento medio è facile fare un calcolo del tempo occorrente affinché il livello del campo diffuso scenda a -60 dB. Per un ambiente con il 20% di unità assorbenti avremo un α medio di 0,2 cui corrisponde una riflessione dell'80% dell'energia incidente e una diminuzione del livello del campo di $0,9691$ dB ($10 \log_{10} 20/80$). Occorreranno quindi $60/0,961 = 61,9$ riflessioni per scendere a -60 dB del livello iniziale.

$$T_{60} = (\ell/c) * n_{-60} \quad [s]$$

Dove: (ℓ/c) è il tempo fra una riflessione e la successiva, e n_{-60} è in numero di riflessioni necessarie affinché il campo diffuso scenda di 60 dB.-

Utilizzando questa relazione possiamo ragionevolmente prevedere la differenza fra il T_{60} calcolato con Sabine ($\ell = 2,4 m$) e quello che misureremo a causa dei modi assiali.-

Sintesi delle considerazioni precedenti per alfa medio di 0,2				
	Campo multidirezionale	Modi assiali Lx	Modi assiali Ly	Modi assiali Lz
ℓ (m)	2,4	4,64	3,68	2,92
Tempo medio fra ogni riflessione (s)	0.0071	0,0136	0,0108	0,0086
T60 con il 20% di unità assorbenti (s)	0,437	0,845	0,67	0,531
	Calcolato	"Misurato"	"Misurato"	"Misurato"

Nei locali di volume superiore ai 100 m^3 c'è inoltre da considerare l'influenza dell'assorbimento atmosferico sul tempo di riverbero reale, ma essendo di entità minore non verrà qui considerata.- In ogni caso risulta evidente che il calcolo non può essere usato come sostitutivo della misura.

4.- Aspetti generali della misura di T_{60} nei locali di abitazione.- Per misurare il tempo di riverbero si utilizza un generatore di segnale che può essere o una sorgente multi direzionale di rumore rosa o un generatore di impulsi (pistola, palloncino, clappatore) o un segnale sinusoidale sweepato e un microfono con relativo sistema di analisi per misurare il decremento del campo diffuso. La chiave del successo sta nell'ottenere una dinamica "livello iniziale del campo diffuso meno rumore di fondo" abbastanza elevata e una pendenza del decadimento (dB/s) costante. Alle basse frequenze da 100 Hz a circa 400 Hz è improbabile (anche se non impossibile) ottenere una dinamica di 60 dB soprattutto a causa di:

- il rumore di fondo;
- dei punti nodali legati alla comparsa dei modi.

Il rumore di fondo può essere un problema nelle misure "sperimentali" quando si voglia sapere qualcosa dei materiali impiegati e si fanno misure con il cantiere in corso. Nelle misure di collaudo, nella fase immediatamente precedente la consegna, il cantiere non c'è più e il rumore di fondo è irrilevante nella maggioranza delle situazioni.-

Per quanto riguarda i punti nodali dei modi, invece, il problema c'è sempre e va tenuto in attenta considerazione quando si deve decidere per il posizionamento sia del microfono sia della sorgente. Abbiamo già considerato i modi per quanto riguarda la variazione di ℓ accennando al fatto che ogni modo è caratterizzato dalla comparsa di ventri e nodi distanziati di $\lambda/4$. Nella figura a seguire vediamo un esempio di campo sonoro, misurato in regime forzato nel terzo di ottava dei 100 Hz. Le suddivisioni all'interno della rappresentazione cromatica valgono 1 dB/divisione. E' evidente l'effetto distorsivo della supposta omogeneità del campo sonoro. Questo effetto distorsivo è dovuto ai modi e diventa ancora più marcato in regime libero quando l'energia della banda viene "assorbita" dalle componenti monofrequenza.

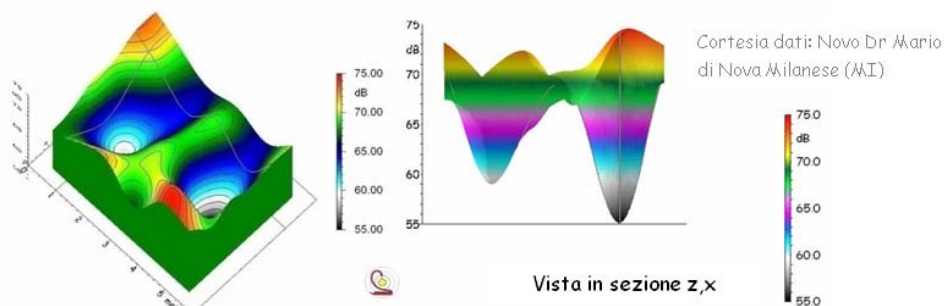


Figura 5: deformazione del campo sonoro nel terzo d'ottava di 100 Hz per effetto della interazione dei modi. -

La mappatura presentata in figura 5 è stata rilevata con un reticolo di 1 m in un ambiente ricevente di 6x4x2,8 m, sorgente: macchina da calpestio. Cortesia Dr Mario Novo di Nova Milanese. Mappa con reticolo da 1 m, elaborazione: opzione mappe di Noise & Vibration Works.

La comparsa di nodi e ventri si può pensare come una variazione localizzata dell'impedenza acustica funzione di $\lambda/4$, in varie parti del volume dell'ambiente. Tale variazione esiste anche nel regime forzato (ma con dinamica minore rispetto al regime libero), tanto che una sorgente di rumore rosa, ragionevolmente lineare se misurata in campo libero o in ambienti con volume superiore a 200 m³, dimostrerà qua e là dei "buchi" quando attivata in ambienti di volume inferiore. Tanti più "buchi" quanto più piccolo l'ambiente.

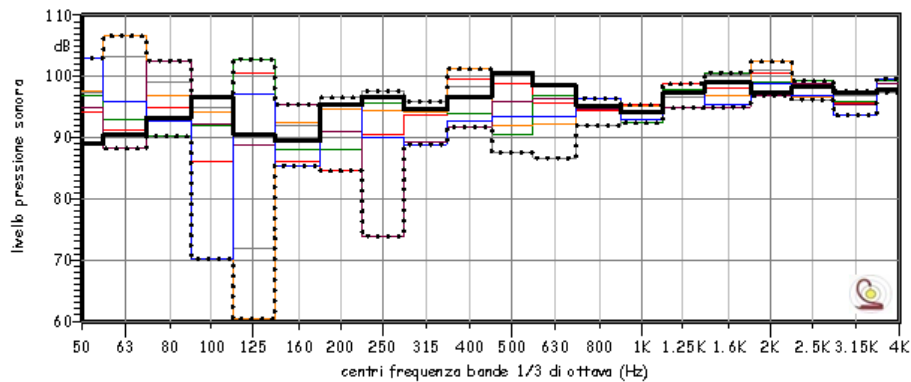


Figura 6: variazione dello spettro di una sorgente isotropica, in trasmissione, misurato in sette punti, per un volume di 48 m³.-

Nella figura 6 vediamo 7 spettri misurati in ambiente trasmittente in posizioni casuali ad altezza diversa uno dall'altro. Lo spettro nero continuo è l'unico "ragionevolmente lineare", gli spettri neri punteggiati delineano i massimi e i minimi della serie di 7 spettri. A 125 Hz abbiamo, fra minimi e massimi, una dinamica di 43 dB. A 250 Hz abbiamo una dinamica di 23 dB. Questi "buchi" vanno visti come la dimostrazione di variazioni locali dell'impedenza acustica del volume d'aria eccitato. La dinamica ventre - nodo dipende dalla quantità di smorzamento presente nell'ambiente, è molto alta per ambienti non arredati e diminuisce all'aumentare delle unità assorbenti; in campo libero il campo sonoro sarà "ragionevolmente lineare" in tutti i punti.

Ritornando alla figura 5, se mettiamo la sorgente nella posizione spaziale corrispondente al nodo da 55 dB in figura 5,dx; questa renderà un livello (a 100 Hz) - approssimativamente - inferiore di 10 dB a quello che produrrebbe se la mettessimo al centro dell'ambiente o in corrispondenza di uno spigolo (negli spigoli tutti i modi formano un ventre). Allo stesso modo se mettiamo il microfono nella posizione spaziale corrispondente al nodo da 55 dB in figura 5,dx; con un rumore di fondo a 100 Hz di 40 dB, avremo una dinamica di 5 decibel che diventerebbero 15 spostando il microfono al centro o vicino ad uno spigolo.-

Se ora consideriamo il caso di una misura reale di decadimenti, non fatta nell'ambiente di figura 5, potremo trovare risultati tipo quello che segue in figura 7 dove si rappresentano dei decadimenti misurati in due punti diversi dello stesso ambiente con la sorgente posizionata sempre nello stesso punto.-

Se si osserva alla posizione 1 secondo, risulta evidente una differenza di 31,3 dB a sorgente emittente attiva. Tale differenza va ascritta al differente posizionamento del microfono nel regime di nodi e di ventri del modo che ricade all'interno del 1/3 di ottava dei 125 Hz.- Come conseguenza del posizionamento del microfono in un nodo avremo, a rumore di fondo costante, una drastica riduzione della dinamica disponibile per valutare la pendenza del decadimento.

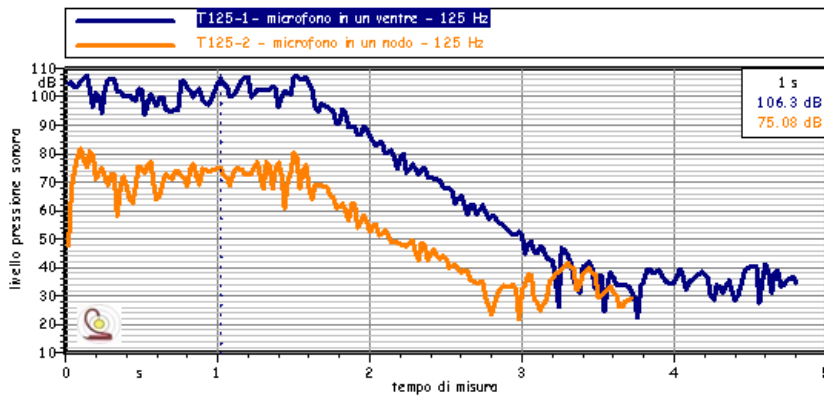


Figura 7: differenza di dinamica con microfono posizionato in un ventre e in un nodo, posizione della sorgente costante.-

5.- Definizione della frequenza di taglio - campo modale/campo diffuso.- Queste misure vengono fatte con filtri da 1/3 di ottava che hanno una larghezza di banda del 23% della frequenza centrale. In un ambiente abitativo i modi assiali, tangenziali e obliqui possono essere dell'ordine di qualche centinaio di migliaia con assoluta predominanza numerica dei modi obliqui. Dal punto di vista del come comportarci durante la misura, ci interessa sapere quale è la loro densità per terzo d'ottava e questo per il semplice motivo che nei terzi di ottava con molti modi possiamo considerarci in campo diffuso, dove abbiamo pochi modi (1 o 2 o 3) dobbiamo considerarci in un campo tendenzialmente mono-direzionale e con una forte dipendenza del livello misurato dalla posizione spaziale del microfono che potremmo chiamare, tanto per capirci, campo modale.

La formula della frequenza di Schröder viene utilizzata per definire da quale terzo di ottava - a scendere - abbiamo meno di tre modi per terzo di ottava. Al di sopra di questa frequenza, che possiamo anche chiamare frequenza di taglio, possiamo considerarci in campo diffuso, al di sotto di questa frequenza in un campo non diffuso con presenza di nodi e ventri dominante l'esito della misura, ovvero in un campo modale.

La frequenza di Schröder (f_s) viene definita come:

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \text{ [Hz]}$$

Dove: V è il volume del locale considerato [m³], e T è il tempo di riverbero dello stesso locale [s].

Considerando valori medi di tempo di riverbero per stanze di appartamento non arredate e di vari volumi, si può tentare di tracciare un diagramma dell'andamento della frequenza di taglio al variare del volume.

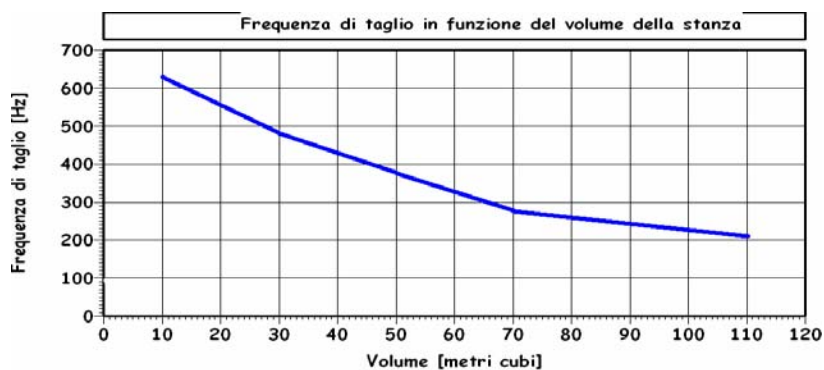


Figura 8: andamento della frequenza di taglio o di Shröder per vari volumi di ambienti.-

Da questo diagramma si può vedere molto bene come in un ambiente da 20 m³ avremo un campo diffuso solamente da 560 Hz in su, mentre in un ambiente da 70 m³ avremo campo diffuso da 280 Hz in su. Le conseguenze dell'aver trascurato questa legge fondamentale ha portato e porta a misure fatte negli stessi ambienti ma con risultati molto diversi. Nella figura a seguire vediamo il risultato di misure eseguite da 6 operatori diversi sulla stessa paratia. Gli operatori applicavano acriticamente la ISO140-4.- Si presenta il risultato $L_{Trasmissione} - L_{Ricezione}$.

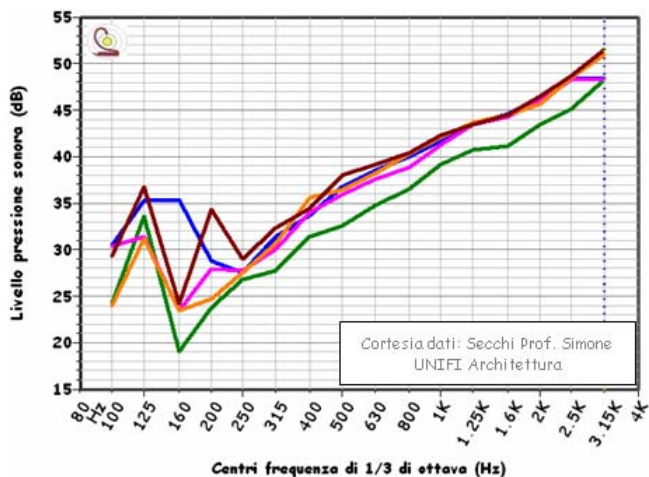


Figura 9: $L_{Trasmissione} - L_{Ricezione}$ così come risultano da 6 operatori che hanno applicato acriticamente la ISO140-4.-

Ora, a prescindere dall'operatore verde che deve aver avuto problemi del tipo instabilità della sorgente o sovrastima eccessiva dei tempi di riverbero, è evidente che la frequenza di taglio si colloca a 250 Hz, e che di conseguenza si trattava di un locale di circa 90 m³. Al di sotto della frequenza di Schröder la pessima ripetibilità della misura è dovuta a sottocampionamento, limitato ai 5 punti canonici prescritti dalla ISO140-4, ancorché disposti simmetricamente e su di uno stesso piano.-

6.- Ulteriori sorgenti di errore nella definizione dei tempi di riverbero.- Dalla stessa sorgente abbiamo anche la possibilità di confrontare i tempi di riverbero sulla base dei quali sono stati corretti i livelli in ricezione misurati dai sei operatori.

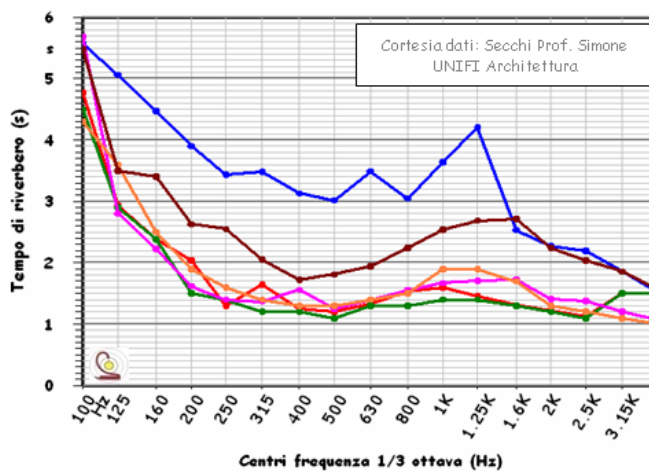


Figura 10: T_{60} misurati nello stesso ambiente dai 6 operatori.-

Nella figura 10 vediamo delle misure di T_{60} eseguite nello stesso ambiente da 6 operatori dei quali: due hanno accettato senza verifica i tempi risultanti automaticamente dal loro sistema di misura (i colori nei

due grafici - fig. 9 & 10 - non sono collegati agli operatori) e quattro hanno fatto delle operazioni di post-elaborazione sulle interpretazioni fornite dal sistema di misura.-

La tendenza di mercato è quella di proporre, e quindi fornire, strumenti in grado di definire automaticamente il valore dei tempi di riverbero attraverso algoritmi di regressione applicati ai decadimenti misurati. Non sempre questi algoritmi la prendono giusta, dipende fondamentalmente dalla scelta dell'algoritmo adatto (rumore interrotto o impulso) e da quanto il profilo del decadimento misurato si discosta dall'ottimale teorico. Occorre sempre andare a vedere che "ragionamento" ha fatto la macchina e, nel caso, correggere manualmente l'interpretazione. Dal grafico di figura 10 risulta evidente come 4 operatori hanno corretto in post-elaborazione i risultati della "interpretazione" dello strumento di misura e due non l'abbiano fatto. Vediamo a seguire dei casi pratici di errore.

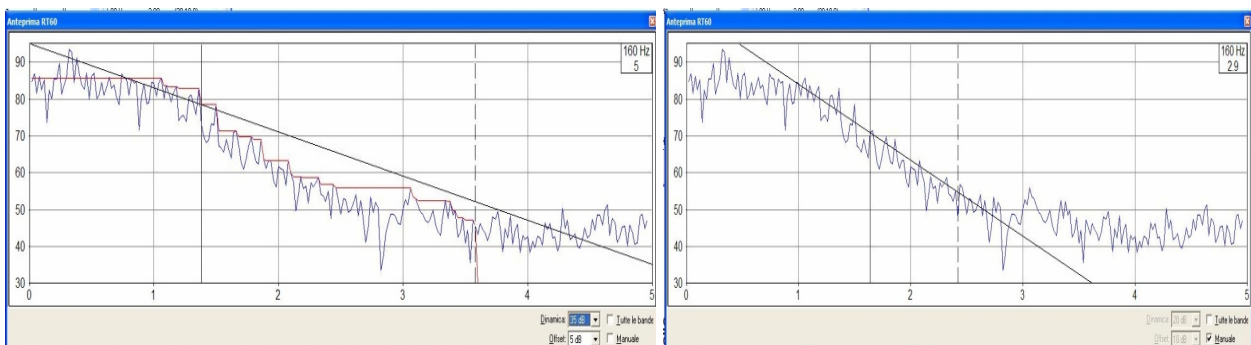


Figura 11: algoritmo "drop - down" che sbaglia l'attribuzione di T_{60} (sinistra) sua correzione manuale (destra). -

Nella figura 11 vediamo un esempio reale di interpretazione scorretta da parte di un sistema automatico (5 secondi) e sua correzione manuale (2,9 secondi).

A volte l'errore dell'algoritmo viene causato dalla presenza di qualche evento sonoro - anche moderato - che si somma al fondo vicino alla fine del decadimento o poco dopo o durante; a volte dalla poca dinamica disponibile e più frequentemente, sotto la frequenza di Schröder. Di un pacchetto di 12 misure di decadimento (4 posizioni sorgente per 3 misure per posizione) per 16 terzi di ottava si avranno normalmente da fare 5 - 20 correzioni. E quando parliamo di correzioni non parliamo di far diventare 1,7 s, un 1,9 s, ma di far diventare 1,7 s, un 5 o un 3 o un 8 secondi.

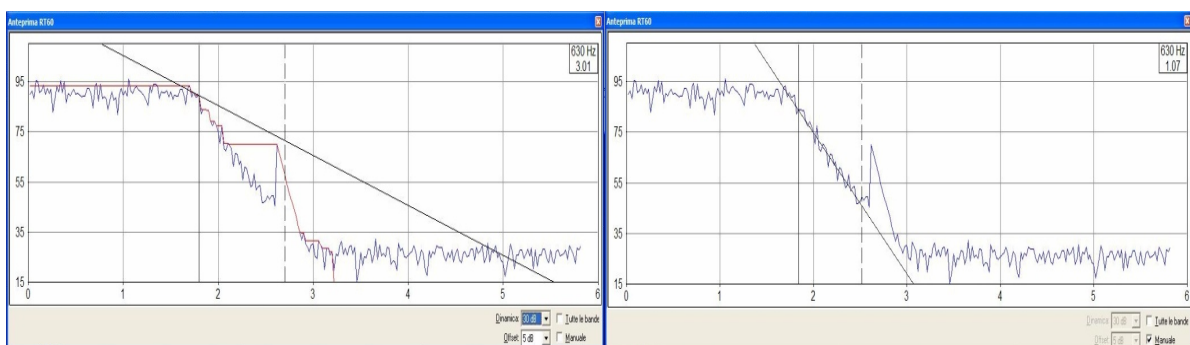


Figura 12: algoritmo "drop down" che sbaglia a causa evento anomalo sinistra, correzione manuale destra. -

Nella figura 12 vediamo un esempio reale di interpretazione scorretta (dovuta ad un evento sonoro anomalo) da parte di un sistema automatico (3 secondi) e sua correzione manuale (1,07 secondi). La correzione manuale consiste, come è evidente dalle figg 11 & 12 nel posizionare la retta di regressione in maniera che intersechi quanto più simmetricamente possibile le fluttuazioni del decadimento.

Il caso delle misure di T_{60} marrone e blu di figura 10, dove c'erano da correggere le interpretazioni a tutte le frequenze, può essere dovuto o ad una scelta scorretta dell'algoritmo - fra quelli disponibili - o a ad una sua impostazione scorretta (punto d'attacco e dinamica del calcolo), o a decadimenti pratici lontani dal teorico per cui non interpretabili automaticamente. Per quanto riguarda questo tipo di errore i responsabili principali sono sicuramente quei venditori che per vendere più facilmente la loro merce, proclamano: 'un solo click' per avere il risultato.

7.- Schematica per la lettura e l'interpretazione della morfologia dei decadimenti.- Per un corretto posizionamento della retta di regressione, funzionale alla definizione del valore esatto del tempo di riverbero, occorre conoscere una semeiotica dei decadimenti, occorre saper leggere dalla morfologia del profilo storico del decadimento la sua natura. Verranno qui dati alcuni spunti che ci riserviamo di estendere in seguito.-

Verrà trattato il solo aspetto legato alla misura con sorgente di rumore rosa interrotto. La morfologia del decadimento prodotto con altre sorgenti, palloncino, pistola, clappatore, swee-sine, differiscono per la sola parte del profilo che precede il decadimento il quale, poi, segue esattamente le stesse leggi quale che sia la sorgente.

I diagrammi a seguire sono delle simulazioni matematiche che tengono conto delle interazioni fra i campi sonori che condizionano la morfologia del decadimento. Abbiamo preferito questo approccio a quello di illustrare la semeiotica direttamente da misure reali perché, come vedremo, parlando della pratica delle misure, queste possono essere di difficile interpretazione.

Decadimento normale. - Lo schema della misura del decadimento è diviso in quattro aspetti, la fase della eccitazione, la fase del decadimento, la fase di somma (secondo le note leggi) fra campo diffuso e rumore di fondo, la fase del rumore di fondo. In prima analisi la fase della eccitazione ha un andamento stazionario perfettamente lineare e parallelo all'asse dei tempi, all'interruzione delle sorgente, se il microfono è in campo diffuso e non è in un nodo inizia un decadimento progressivo a pendenza (dB/s) costante (funzione di θ e di A), pendenza che diminuisce progressivamente quando il livello del campo diffuso arriva a ± 10 dB dal fondo. Quando il livello del campo diffuso scende a meno 10 dB dal fondo diventa dominante il rumore di fondo.

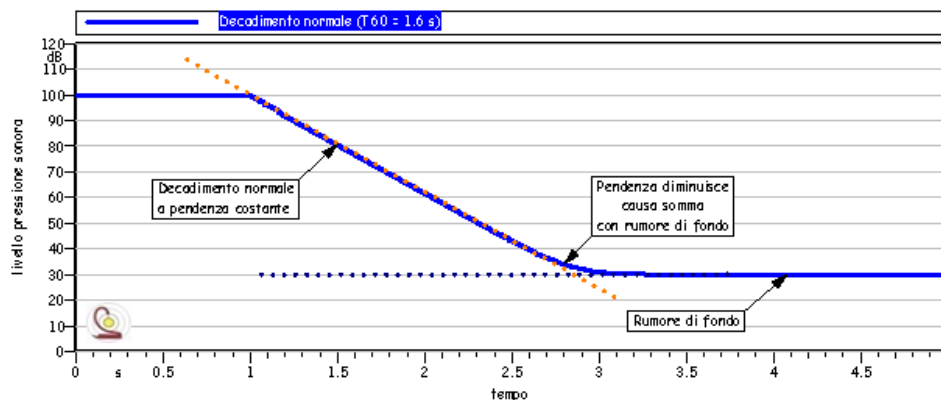


Figura 13: schema di un decadimento normale con variazione della pendenza in zona "somma con fondo".-

Nella figura 13 si può vedere la schematizzazione di un tipico profilo storico di decadimento con microfono posizionato in campo diffuso. Chi decide del valore del tempo di riverbero è la pendenza (linea punteggiata arancione, in questo caso di 37,5 dB/secondo) per 1,6 secondi di T_{60} . Nelle misure sul campo otterremo raramente una dinamica principesca come questa, che è simulata, ma dovremo accontentarci di valori più

contenuti. Una prima nota pratica che possiamo trarre dalla figura 13, per le regole di interpretazione, è che non si può utilizzare il tratto di pendenza a +10 dB dal fondo.

Decadimento con artefatto da campo diretto. - Con il microfono posizionato in campo diretto o a certe frequenze, posizionato in un campo generalmente diffuso ma in corrispondenza di un nodo per quelle frequenze, avremo una modifica significativa della morfologia del decadimento: all'interruzione della sorgente segue, in teoria, un crollo repentino ($-\infty$ dB/s) del livello da qualche decibel a qualche decina di decibel per poi proseguire con una pendenza normale appena incontrato il livello del campo diffuso.

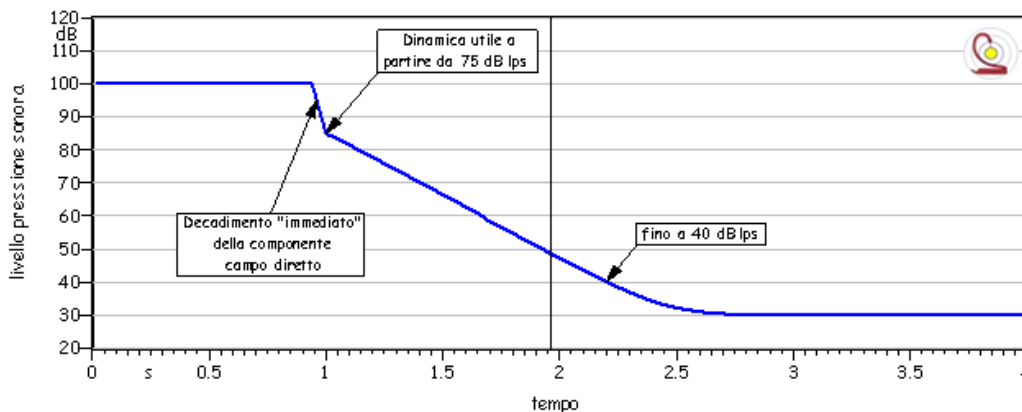


Figura 14: modifica del decadimento a causa del posizionamento del microfono in campo diretto o in un nodo. -

Al momento della interruzione della sorgente il campo diretto sparisce e il livello misurato cade "immediatamente" al livello del campo diffuso. "Immediatamente" perché in realtà avremo sempre a che fare con i tempi di risposta del sistema di misura, fra i quali, il tempo di integrazione, il periodo di campionamento e il tempo di risposta dei filtri, dominate alle basse frequenze, e per bassi valori di T_{60} . Ma di questo parleremo più avanti. Va da sé che il primo spezzone di decadimento, quello ad alta pendenza, non va utilizzato per la definizione di T_{60} . Va utilizzata solo la zona a pendenza costante, nella figura quella che va da 75 a 40 dB lps.

Decadimento con concavità finale. - Se si esegue la misura del tempo di riverbero con una porta aperta, e l'ambiente comunicante è significativamente più grande di quello in cui si fanno le misure, allora avremo a che fare con due valori di θ e quindi con due pendenze nel decadimento.

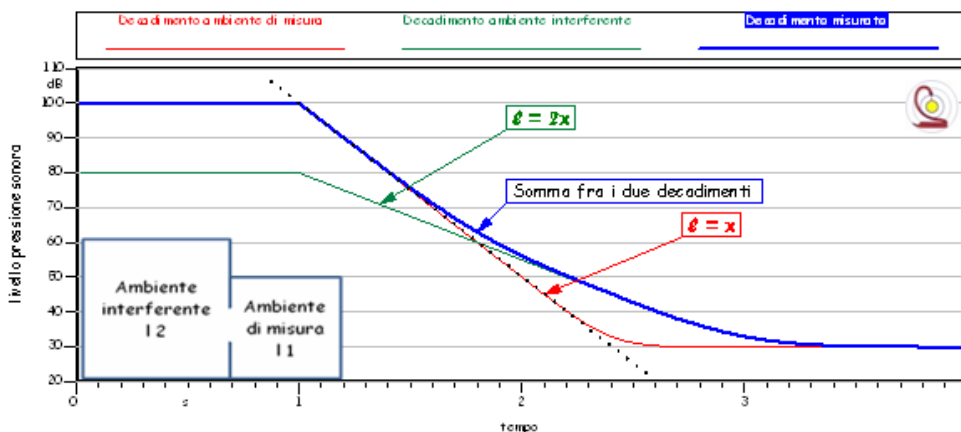


Figura 15: doppia pendenza risultante da due ambienti accoppiati con diverso θ .

I due campi diffusi, che seguono ritmi di decadimento diversi, quando si troveranno a ± 10 dB uno dall'altro si sommeranno dando luogo ad un decadimento concavo, che proseguirà quando il campo a riverbero più

lungo si sommerà con il fondo. Questo sommarsi dei campi fra loro e del campo con ℓ maggiore con il fondo, porta la dinamica utile (a pendenza costante) nel caso schematizzato in figura 15 da 60 a poco più di 20 dB!

Tuttavia sarà ancora possibile definire il tempo di riverbero dell'ambiente minore (con la porta aperta) utilizzando i 20 dB buoni di dinamica. Questo tempo di riverbero verrà indicato come T_{20} .-

Ovviamente, se vogliamo caratterizzare il locale in cui viene fatta la misura, va chiusa la porta e rifatta la misura, anche perché la superficie della porta aperta varrà circa un paio di unità assorbenti e su ambienti abitativi non arredati questo ha il suo peso.

Ci sono poi altre situazioni che possono portare a questo tipo di decadimento e sue varianti ma sono specifiche degli ambienti industriali e di spettacolo e non verranno qui considerate.

Decadimento concavo. - Più complicato a considerarsi il caso in cui si abbiano un numero limitato di modi di diverso ordine (assiali, tangenziali, obliqui) nello stesso terzo d'ottava. Se si ha un solo modo - ad esempio - assiale, avremo solamente un picco nel tempo di riverbero ma un decadimento che segue le note leggi. Se abbiamo più modi, ognuno con valori di ℓ diversi e quindi con un loro T_{60} , avremo più processi di decadimento a velocità diverse che si sommeranno fra loro. Nel caso schematizzato in figura 16 a seguire vediamo una situazione in cui, nello stesso terzo di ottava, abbiamo due modi assiali, dodici modi tangenziali e ignoriamo per semplicità di calcolo i modi obliqui, che sono sicuramente molti di più ma hanno un contenuto di energia circa 10 dB inferiore ai modi tangenziali e partono da un livello a regime stazionario, di circa -15 dB dal livello dominante.

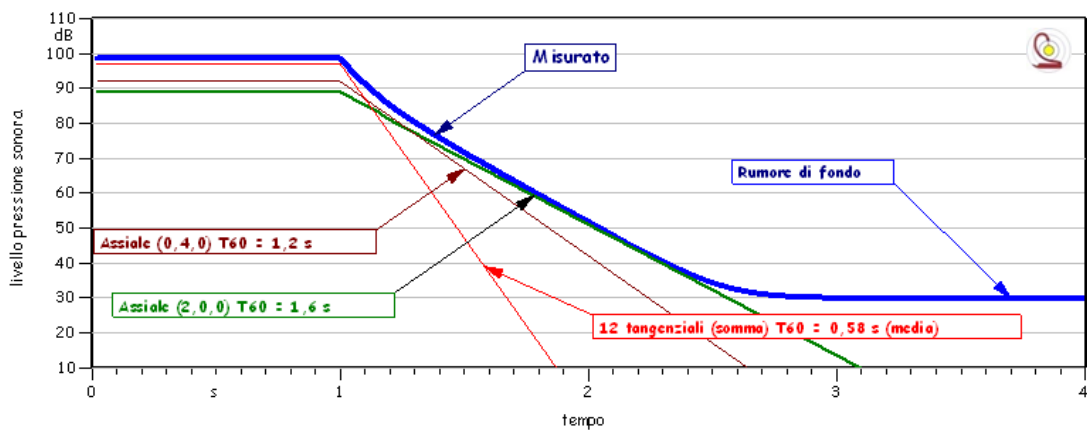


Figura 16: curvatura del decadimento causata dalla interazione di modi di diverso ordine presenti in uno stesso terzo di ottava.-

Si può osservare come, a differenza del caso di figura 15, qui abbiamo una concavità del decadimento che coinvolge tutta la dinamica rendendo molto difficile il riconoscimento della pendenza e quindi del tempo di riverbero, va detto peraltro che spostando il microfono anche di poco la combinazione dei modi dominanti cambia (è un campo di onde stazionarie multiple) e si possono ottenere decadimenti utilizzabili.

Una morfologia di decadimento simile, ma utilizzabile, la possiamo trovare, nei terzi di ottava medio alti (circa 400 - 4.000 Hz), a causa della combinazione dei modi. Ad esempio nel terzo di ottava dei 2.500 Hz, in una stanza da 50 m³ avremo 35 modi assiali, circa 3.300 modi tangenziali e circa 60.000 modi obliqui. La somma dei modi obliqui sarà dominante ($10 \log_{10} 60.000 = 47$ dB da sommare al livello medio). Il decadimento sarà controllato dai modi obliqui nella sua fase iniziale, poi da quelli tangenziali seguiti da

quelli assiali. Dato che i cammini liberi medi sono progressivamente a scendere avremo una pendenza forte per i modi obliqui, seguita da una minore per quelli tangenziali e da una ancora minore per quelli assiali.

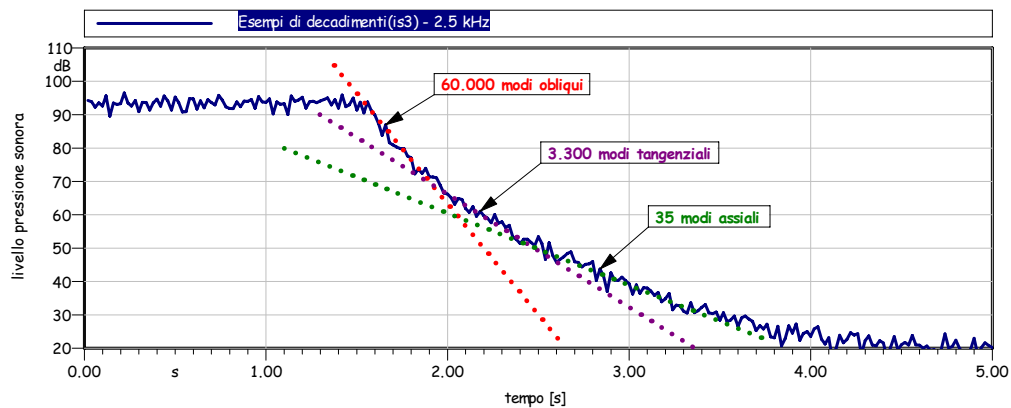


Figura 17: decadimento controllato in sequenza dai tre gruppi di modi.-

8.- Influenza del sistema di misura sul valore di T₆₀.- Abbiamo accennato al fatto che il sistema di misura ha una sua influenza sulla pendenza del decadimento in relazione al fatto che, con microfono in campo diretto, dove ci aspetteremmo una pendenza infinita ($-\infty$ dB/s) troviamo invece una pendenza finita. Questo fatto dipende:

- dal periodo di campionamento,
- dal tempo di integrazione,
- dal tempo di risposta dei filtri.

Del periodo di campionamento parleremo quando si tratterà della esecuzione pratica delle misure. A differenza dal paragrafo precedente gli esempi a seguire sono misure reali per ognuna delle quali verrà specificato sia il tempo di integrazione sia il periodo di campionamento.-

Il tempo di integrazione.- Uno degli errori più comuni consiste nell'utilizzo della costante di integrazione "Fast" per fare la misura dei tempi di riverbero.

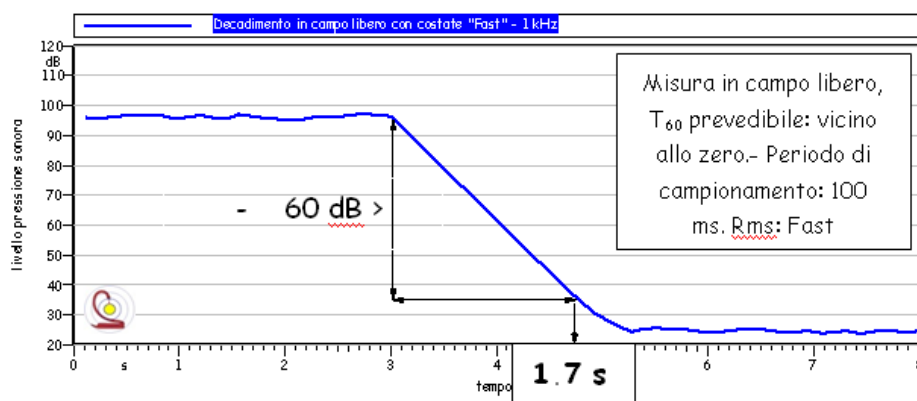


Figura 18: artefatto nelle misura di T₆₀ causato dall'uso di un tempo di integrazione improprio.-

La costante "Fast" come noto implica una tecnica di integrazione a media mobile con costante di tempo (τ) pari a 125 ms. Vediamo cosa si misurerà in campo libero (camera anecoica) dove il tempo di riverbero è zero in teoria e per quanto possa essere diverso da zero, non è comunque misurabile con filtri a 1/3 di ottava.

Dalla misura presentata nella figura 18 si può vedere come usando la costante di integrazione "Fast" dove non c'è riverbero si misurerà sempre e comunque 1,7 secondi per ogni 1/3 d'ottava. Si misurerà cioè il decadimento della media mobile $\tau = 125$ ms. Se il T_{60} da misurare è minore di 1,7 secondi si misurerà comunque 1,7 secondi; se è poco superiore a 1,7 si misurerà qualcosa di più vicino alla realtà. La regola generale è che il tempo di risposta del sistema deve essere almeno la metà del T_{60} da misurare. Con la costante "Fast" potremo quindi fare misure di T_{60} a partire da circa 3,4 secondi.

Quello che avrebbe dovuto per altro mettere in guardia è che, se si va poi a vedere la distribuzione in frequenza dei T_{60} misurati, questi saranno tutti uguali e il loro profilo molto distante da ciò che ben si potrebbe prevedere tenuto conto di $A(f)$ e di quanto capita sotto la frequenza di Schröder.

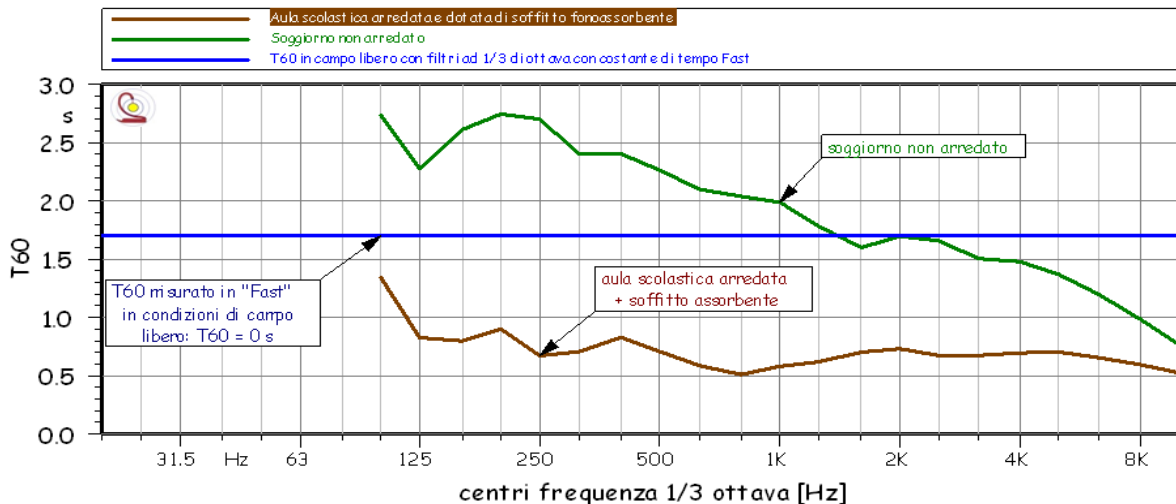


Figura 19: confronto fra misure di T_{60} reali e una misura controllata dalla costante "Fast" in campo libero. -

Nella figura 19 possiamo vedere la differenza del "profilo in frequenza" di T_{60} reali, misurati con tempo di integrazione di "20 ms lineare ripetitivo" e campionamento a 20 ms, rispetto ad una misura di T_{60} con tempo di integrazione "Fast" eseguita in campo libero ma praticamente uguale a quella che troveremmo in ambienti con $T_{60(f)}$ inferiori a 1,7 secondi. Utilizzando la costante Fast nell'aula scolastica misureremmo 1,7 s a tutte le frequenze, utilizzandolo nel soggiorno misureremmo 1,7 s circa dalla frequenza centrale di 1.600 Hz in poi.

Il tempo di risposta dei filtri.- Un filtro passa-banda ha un tempo di risposta che è inversamente proporzionale alla sua larghezza di banda. Per filtri a banda percentuale costante, come sono i filtri a 1/3 di ottava, avremo tempi di risposta lunghi in corrispondenza alle frequenze centrali (f_c) basse (per f_c 100 Hz abbiamo 23 Hz di larghezza di banda e 2300 Hz per f_c 10.000 Hz) e brevissimi a frequenze centrali alte. Nella figura 20 vediamo in parallelo il segnale inviato all'ingresso di un filtro (come valori istantanei $p(t)$) e sotto la risposta del filtro nel tempo come valori efficaci misurati con tempo di integrazione esponenziale di 20 ms e campionato ogni 20 ms.

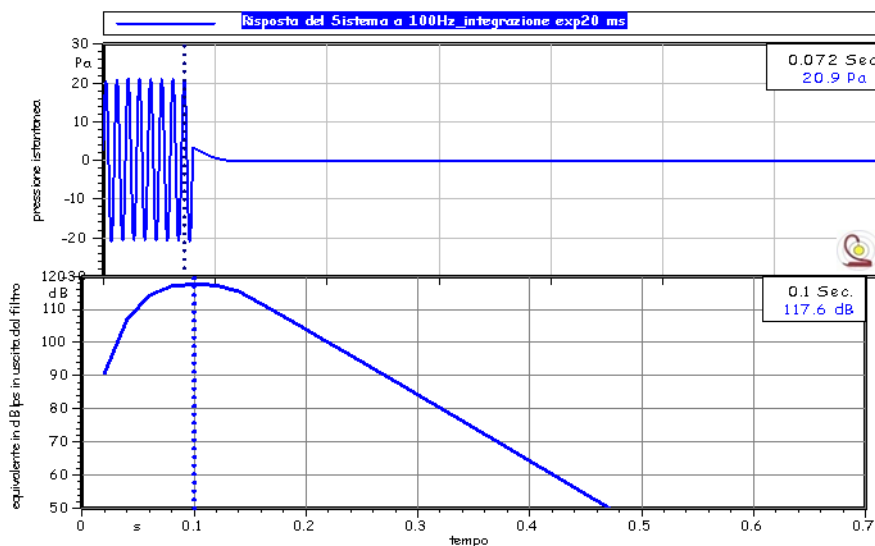


Figura 20:risposta nel tempo, per un segnale sinusoidale, di un filtro a 1/3 di ottava con f_c 100Hz. -

In realtà dovremmo parlare di voltaggio di entrata e voltaggio di uscita ma la cosa sarebbe difficile da seguire per chi non ha familiarità con l'elettronica e abbiamo optato per un linguaggio noto al fonometrista, rispettando le equivalenze. Il segnale in ingresso consiste di 7 cicli sinusoidali a 100 Hz con pressione di picco di 20,9 Pa, cui corrispondono 14,776 Pa efficaci che convertiti di dB riferiti a 20 μ Pa fanno 117,6 dBpls. La presentazione della storia del valore efficace in uscita dal filtro mostra un artefatto da campionamento (20 ms) per cui invece di iniziare al tempo t_{0s} inizia al tempo $t_{0,02s}$. Questo artefatto ha reso necessario lo sfasamento dei due diagrammi per mantenere l'evidenza visiva della sincronia.

Chiarito questo, si vede molto bene come il filtro impiega 100 ms per rendere in uscita i 117,6 dBpls efficaci del segnale di ingresso. Alla interruzione del segnale, dopo sette cicli, il filtro restituisce l'energia accumulata nel ritardo dando luogo ad un decadimento che viene indicato come il tempo di riverbero del filtro. In questo caso, a 100 Hz e per questa tipologia di filtro, il decremento di 60 dB si realizza in 290 ms o 0,29 s per quelli cui i millisecondi sono antipatici. Abbiamo usato una integrazione esponenziale per "spianare" il decadimento. Vediamo ora la risposta di alcuni filtri distanziati di un'ottava, con eccitazione da rumore rosa interrotto e integrazione 20 ms lineare ripetitivo con campionato a 20 ms.

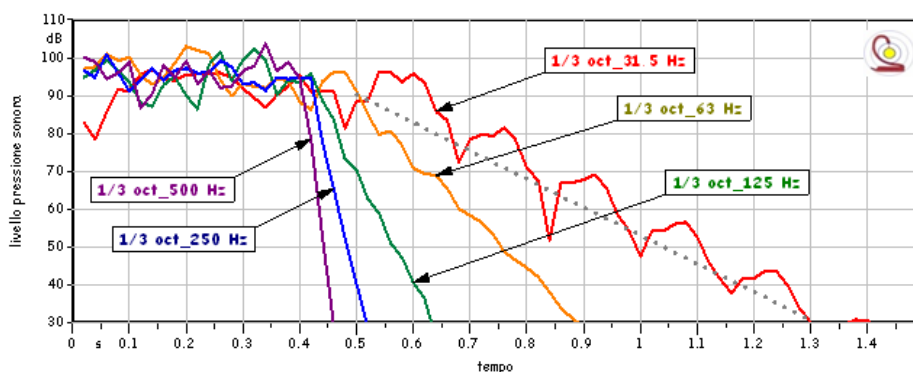


Figura 21:risposta nel tempo di alcuni filtri a 1/3 di ottava al rumore rosa interrotto. -

Il tempo di riverbero elettrico dei filtri si valuta e si definisce come quello acustico, attraverso la valutazione della pendenza a -60 dB, come in figura 21 a 31,5 Hz. Nella figura 22 vediamo un esempio del risultato di questa valutazione. Il periodo di campionamento è di 20 ms per cui quando arriviamo a valori inferiori ai 60 ms abbiamo meno di tre campioni per ricostruire la pendenza la quale diventa funzione del periodo di campionamento più che delle leggi dell'acustica.

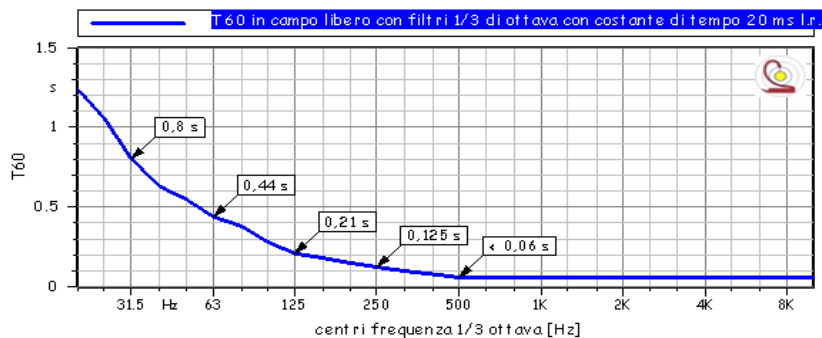


Figura 22: T₆₀ dei filtri a 1/3 di ottava con integrazione a 20 ms lineare ripetitiva. -

Per chiarire in modo definitivo l'influenza del metodo di integrazione sulla definizione dei tempi di riverbero riportiamo in uno stesso diagramma l'andamento dei T₆₀ misurati con costante "Fast" e con costante 20 ms lineare ripetitiva, a solo scopo didattico, da 1 Hz a 10.000 Hz. Il grafico presenta la sola risposta elettrica del sistema che ha valori uguali a quelli che potremmo misurare in campo libero con T₆₀ reale uguale a zero. A causa della entità della dinamica dei valori il grafico verrà presentato con asse dei tempi (Y) logaritmico.

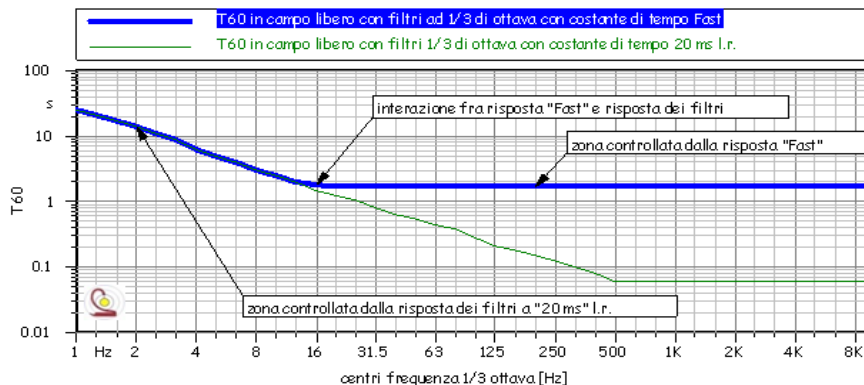


Figura 23: risposta elettrica dei filtri ad 1/3 di ottava con due costanti di tempo. -

Nel campo di frequenza da circa 20 Hz a 10.000 Hz la risposta in Fast è dominante. Nella ottava dei 16 Hz quando la risposta dei filtri diventa dell'ordine di grandezza dei 1,7 s questa interagisce con la risposta Fast, nelle ottave successive, a scendere, è dominante il tempo di riverbero elettrico dei filtri e la risposta in Fast misura esattamente il tempo di riverbero dei filtri.-

Per evitare gli errori di misura connessi con questo aspetto la norma ISO3382 stabilisce un limite minimo al T₆₀ misurabile tenuto conto della influenza della risposta dei filtri e del tempo di integrazione adottato. Questo limite viene espresso come il minimo valore del prodotto larghezza di banda (B) del filtro per tempo di riverbero misurato (T) al di sotto del quale la misura non è accettabile:

$$BT > 16 \text{ per } T \geq 2T_{\text{система}}$$

Dove: B è la larghezza di banda del filtro che per filtri a terzi di ottava sarà 0,23fc; T_{система} è il tempo di riverbero combinato del filtro e del rivelatore di valore efficace. Per misure nelle quali non è richiesta una grande accuratezza (leggi ripetibilità della misura) è sufficiente un prodotto BT superiore a 12.-

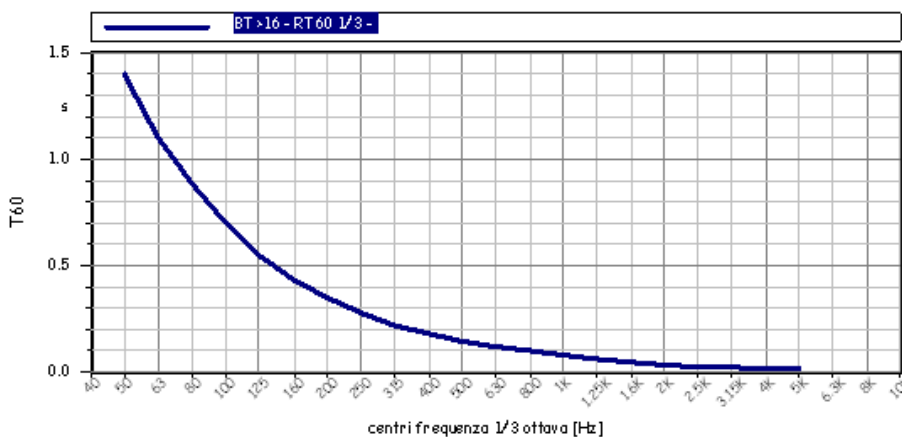


Figura 24: limiti inferiori per la misura di T_{60} con comuni filtri da 1/3 di ottava come $BT \geq 16$.-

9.- Impostazione della misura.- Dovendo impostare uno strumento (fonometro o analizzatore che sia) e sorgente per l'acquisizione della storia dei decadimenti, occorre decidere se usare rumore rosa o bianco, scegliere periodo di campionamento e tempo di integrazione. Del tempo di integrazione abbiamo già detto quanto occorre, passiamo quindi a trattare della scelta del tipo di rumore.

Rumore bianco o rumore rosa? La differenza empirica fra i due è che lo spettro di rumore bianco "visto" da filtri ad 1/3 di ottava presenta una pendenza di livello a salire di 3 dB/ottava mentre il rumore rosa è piatto. La differenza di livello per un rumore bianco fra 100 Hz e 16.000 Hz è di 23,4 dB. Questo vuol dire che regolando il mio misuratore per non andare in saturazione misurando rumore bianco butto via 23,4 dB di potenza utile per le frequenze basse dove invece ne ho tanto bisogno. Quindi: **rumore rosa**.

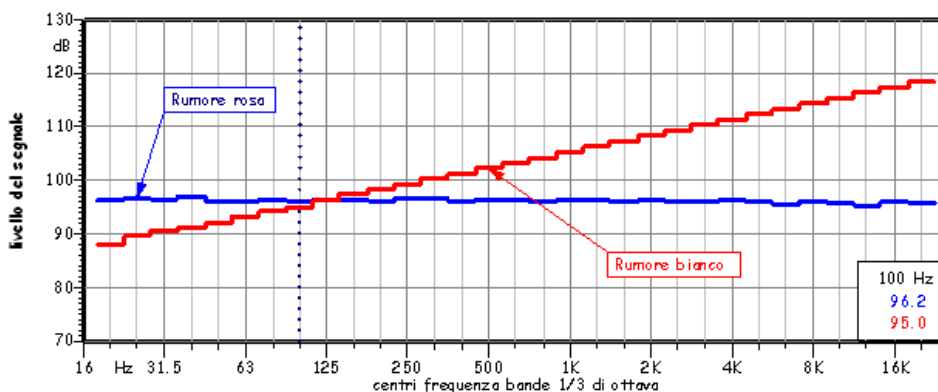


Figura 25: rumore bianco o rumore rosa?

Definizione del periodo di campionamento.- Il rivelatore di valore efficace dello strumento di misura produce con continuità i suoi valori (quelli che leggeremmo sul visore dello strumento), possiamo dire che produce una storia di livelli con una risoluzione temporale infinitesima. Per memorizzare una sequenza di valori occorre prendere singoli "pezzi" di ciò che esce dal rivelatore e mandare questi "pezzi" in memoria. Qualcuno colto direbbe che occorre "discretizzare" o "campionare" i livelli in uscita dal rivelatore.

L'intervallo temporale che separa un "pezzo" dal successivo viene detto "intervallo di campionamento o, meglio, "periodo di campionamento". Quando poi si va a rivedere il risultato della misura campionata occorre un minimo di software, che può essere interno o esterno allo strumento di misura, per ricostruire la storia partendo dai campioni e collegandoli fra loro nel modo più plausibile. La scelta del periodo di campionamento è funzionale alla fedeltà con la quale verrà ricostruita la storia dei livelli campionata. Nella figura 26 la storia punteggiata in grigio è quella da ricostruire con il campionamento.-

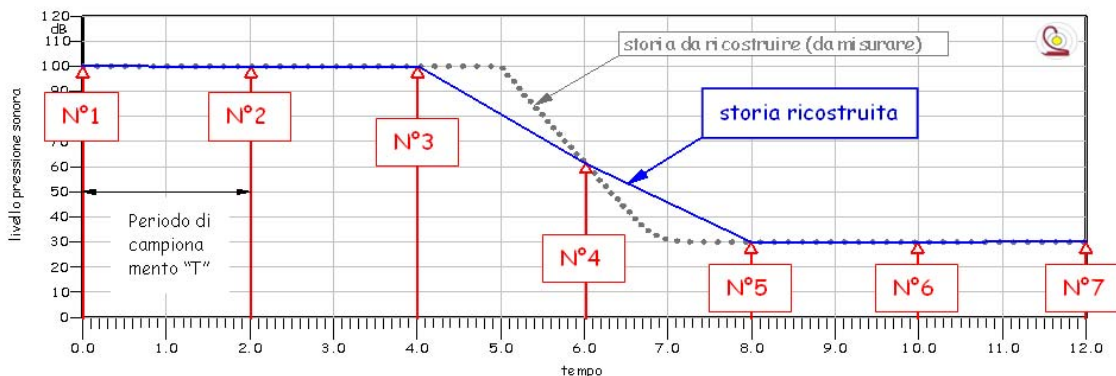


Figura 26: scelta scorretta del periodo di campionamento

Assumiamo che il periodo di campionamento sia di 2 unità di tempo (μ s; ms, s). I campioni N°1,2&3 porteranno a casa 100 dB cadauno; quello N°4, 60 dB; i N°5,6&7, 30 dB cadauno. La storia ricostruita dai campioni (blù) dimostrerà una distorsione o una mancanza di fedeltà da sotto-campionamento nella ricostruzione della storia da misurare.-

Occorre perciò scegliere con oculatezza quel periodo di campionamento che ci consente di ricostruire la storia con la fedeltà necessaria. Per misurare i tempi di riverbero negli ambienti abitativi, dobbiamo tenere conto che i T_{60} vanno da circa 0,5 a circa 3 secondi e che quello che ci dà da pensare sono ovviamente i 0,5 secondi, ma anche le rapide ed estese fluttuazioni del livello a basse frequenze. Come regola generale il periodo di campionamento deve essere almeno $T_{60}/20$.

Facciamo un po' di conti con 0.6 s, così tanto per avere numeri "tondi". Un T_{60} da 0,6 secondi vuol dire una pendenza di (0,6/60) 1dB ogni 10 millisecondi ovvero 10 dB ogni 100 millisecondi. Tenuto conto che, specie alle frequenze basse, se non ci sono modi assiali dominanti, è di regola difficile ottenere pendenze libere da interferenze maggiori di 20 - 30 dB, vuol dire che abbiamo a disposizione un segnale "buono" che dura da 200 a 300 ms. Un buon compromesso consiste nel prendere 5 campioni ogni 10 dB di decadimento e quindi un campionamento da 20 ms.

Periodo di campionamento e tempo di integrazione sono strettamente collegati, nel senso che è inutile (ai fini della fedeltà) campionare a 20 ms se uso la costante "Fast" o se uso un lineare ripetitivo da 100 ms. Se scelgo un campionamento da 20 ms userò un lineare ripetitivo da 20 ms, se scelgo un lineare ripetitivo da 10 ms camperò a 10 ms, ecc.

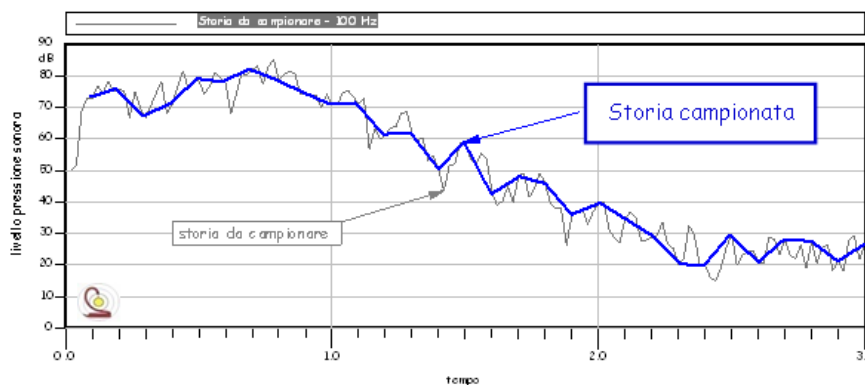


Figura 27: esempio di distorsione di una storia da campionamento insufficiente.-

Nella figura 27 è possibile vedere un esempio di distorsione di una storia causata da una velocità di campionamento insufficiente. La pendenza reale non è più riconoscibile. La storia grigia, è campionata a 20 ms con lineare ripetitivo da 20 ms.

La misura.- La misura consiste nell'eccitare il volume con una sorgente la quale deve essere multi direzionale per eccitare tutti i modi, assiali, tangenziali ed obliqui, e posizionata in uno spigolo perché negli spigoli tutti i modi hanno un massimo e si ottimizza il trasferimento di energia al volume; se la sorgente è posizionata in un nodo di un modo assiale, a quella frequenza non avremo energia sufficiente per una buona dinamica.

La sorgente può essere attivata da un telecomando o dipendere dallo strumento di misura (cosa ottima per la misura del tempo di riverbero ma pessima per le misure di fono isolamento). Il microfono va messo ad una distanza tale da assicurarsi di essere in campo diffuso (i due terzi del volume dell'ambiente escludendo quel terzo del volume in cui è posizionata la sorgente). Ovviamente non abbiamo modo di sapere se il microfono si trova in un nodo a qualche frequenza, questo lo sapremo solo quando andremo a vedere il risultato. Si attiva la sorgente, atteso il tempo necessario per il saturarsi del campo diffuso (un paio di secondi circa) si arresta la sorgente e si registra (storia di campioni) il decadimento fino all'estinguersi delle componenti più basse dello spettro, si lascia passare qualche secondo, per avere un buon campione del rumore di fondo a bassa frequenza e si arresta la misura.

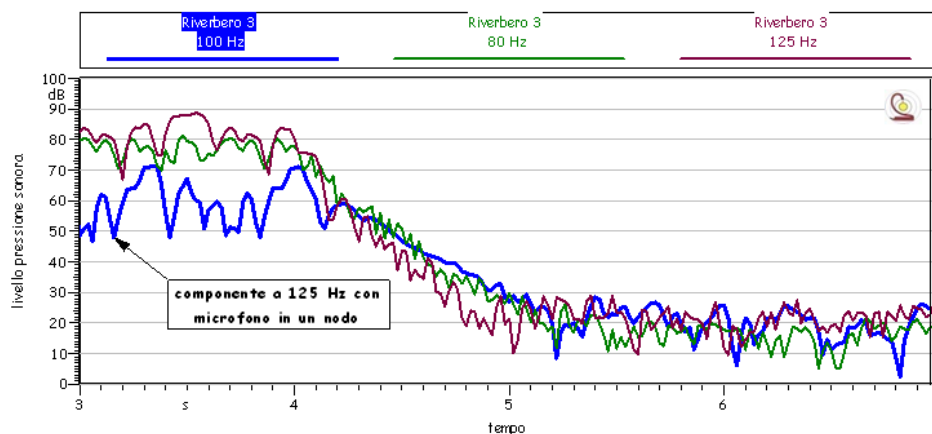


Figura 28: componente a 125 Hz con - 20 dB di dinamica a causa di microfono in un nodo. -

Ripetendo più volte la misura con microfono e sorgente in posizione fissa si osserverà che la morfologia del decadimento, soprattutto sotto la frequenza di Schröder, può variare sensibilmente. Il motivo è da ricercarsi nei rapporti casuali di fase fra i modi contenuti in un terzo d'ottava al momento della interruzione della eccitazione come da figura 29 dx.

Con la stessa posizione sorgente si procederà ad almeno tre misure spostando ad ogni misura posizione ed altezza del microfono, evitando simmetrie. La sorgente verrà poi spostata allo spigolo successivo ripetendo l'operazione quattro volte.

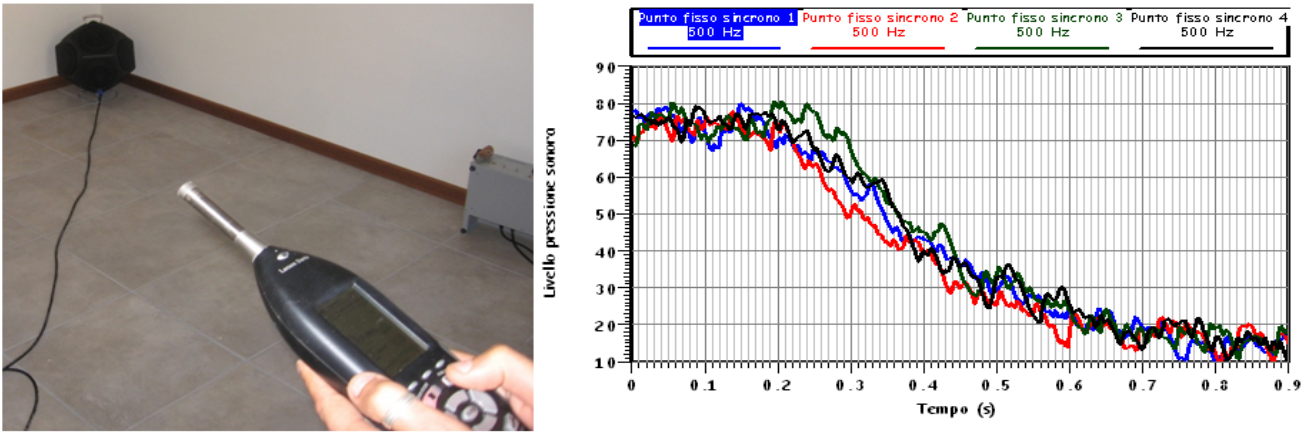


Figura 29: posizione microfono - sorgente e quattro misure fatte nella stessa posizione.-

Alla fine si disporrà di almeno 12 misure, ognuna delle quali dimostrerà valori di T_{60} significativamente diversi sotto la frequenza di Schröder. I valori di T_{60} dipendono dalla combinazione di modi e loro fasi reciproche nelle varie posizioni dell'ambiente, al momento dell'interruzione della sorgente, come da figura 30.

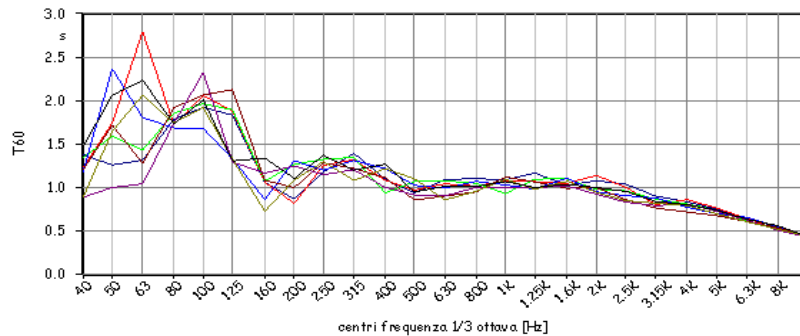


Figura 30: esempio di variazione dei valori di T_{60} non mediati misurati un uno stesso ambiente in più punti.-

Sarà quindi necessario calcolare la media aritmetica dei valori dimostrati sperimentalmente per ogni banda di 1/3 d'ottava.-

10.- Natura del segnale utilizzato.- Prima di affrontare il tema della interpretazione dei decadimenti bisogna dire qualcosa sulle peculiarità del segnale eccitante. Nella misura a seguire vediamo uno spettro di rumore rosa ricavato da una storia della durata di 25 secondi, viene rappresentato come livello efficace sul tempo di misura ($Leq,25''$) e i suoi valori massimi e minimi integrati in lineare ripetitivo da 20 ms.

La cosa caratteristica di questo segnale è un progressivo decremento della variabilità nella dispersione fra minimi e massimi man mano che si passa dalle frequenze basse verso le alte. Si osservi come nel terzo di ottava dei 100 Hz abbiamo una dispersione maggiore di 30 dB, mentre a 1.000 Hz la dispersione è circa 10 dB e a 10.000 Hz è dell'ordine di 5 dB.

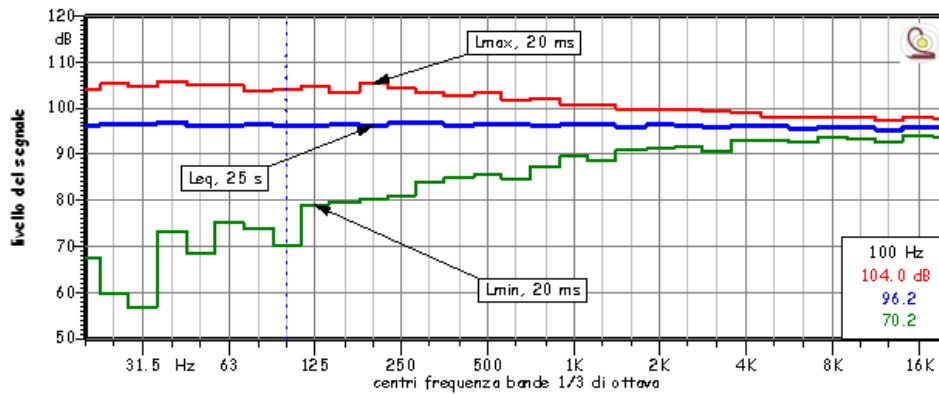


Figura 31: spettro di rumore rosa come livello efficace (Leq,25"), Lmax & Lmin,20 ms. -

In questo caso il rivelatore lavorava con un tempo di integrazione di 20 ms lineare ripetitivo. Aumentando il tempo di integrazione diminuisce la dispersione. Noi, però, per i motivi citati dobbiamo mantenere i 20 ms e quindi una alta dispersione. Va detto che nel caso di figura 31 abbiamo l'analisi di un puro segnale elettrico. Se questo fosse prima passato attraverso un altoparlante la dispersione diminuisce alquanto perché il passaggio attraverso l'inerzia della massa della membrana dell'altoparlante riduce drasticamente il fattore di cresta ($x_{picco}/x_{efficace}$) del segnale.

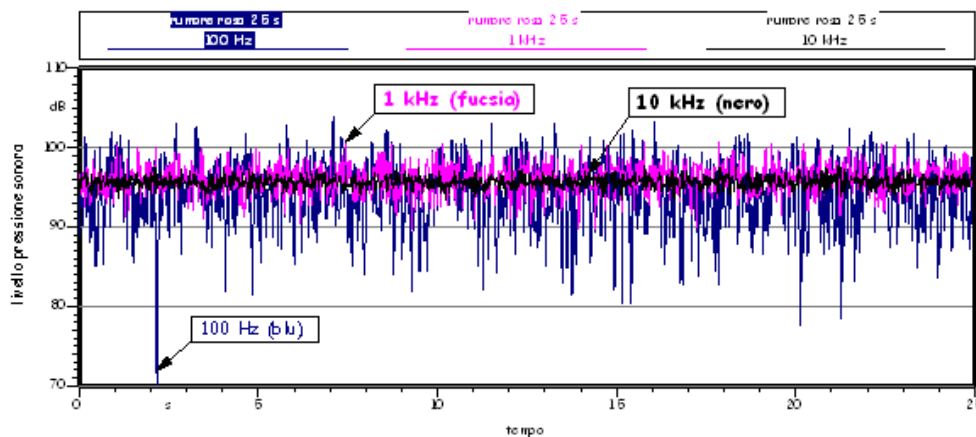


Figura 32: storie di rumore rosa a 100,1.000 & 10.000 Hz integrate 20 ms l.r. -

Nella figura 32 vediamo alcuni elementi della storia da cui è stato ricavato lo spettro di figura 31. Risulta evidente come una storia di questo tipo presenta una forte variabilità alle basse frequenze (100Hz blu), ed è proprio con questa variabilità che occorrerà confrontarsi quando tenteremo di identificare la pendenza che ci consente di trovare il tempo di riverbero. Questa è la ragione per cui abbiamo sempre parlato di interpretazione.

Quando nel paragrafo 7 abbiamo identificato le tipologie delle possibili morfologie dei decadimenti abbiamo usato delle linee "pulite", nelle misure reali queste linee non le troveremo, salvo che alle alte frequenze; alle basse frequenze troveremo invece dei decadimenti che assomiglieranno molto a quello che vediamo in figura 32. Dovremo sempre ricordare che gli schemi del paragrafo 7 sono comunque lo "scheletro" di quasi tutte le possibili storie di decadimenti che noi incontreremo "vestite" delle fluttuazioni di cui sopra.

Il rumore rosa può essere definito come un segnale di tipo casuale (random). Nel lessico di chi gestisce abitualmente misure di acustica e di vibrazioni si contrappone al segnale casuale un segnale di tipo deterministico. Nella figura 33 vediamo un tipico spettro di un segnale deterministico.

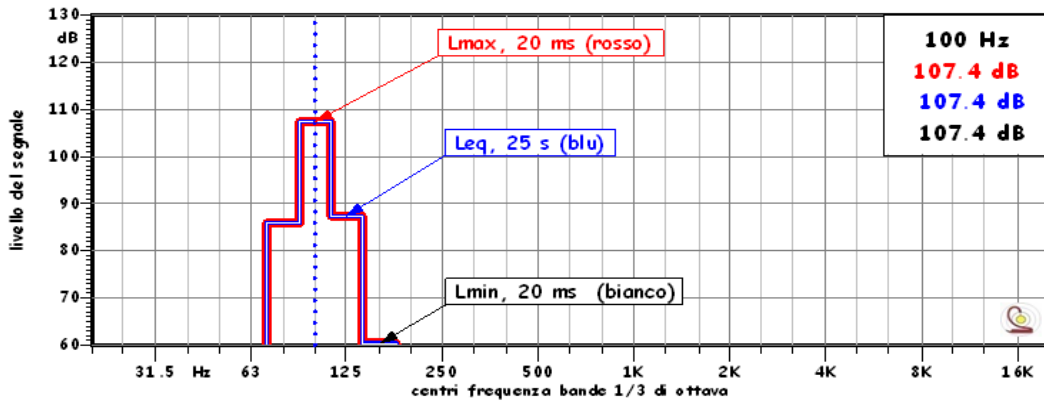


Figura 33: tipico spettro di un segnale deterministico con valori medio, massimo e minimo.-

I tre aspetti $Leq, 25\text{ s}$; $L_{max}, 20\text{ ms}$; $L_{min}, 20\text{ ms}$ per un segnale deterministico (sinusoide a 100 Hz) sono perfettamente identici e solo l'artificio grafico di disegnarli con spessori di penna molto diversi consente la loro distinzione visiva. Inutile proporre la visualizzazione della storia da 20 ms lineare-ripetitivo campionata a 20 ms perché sarebbe una riga perfetta con livello di 107,4 dB. Un segnale vien detto deterministico perché, noto il suo valore massimo istantaneo ($x_{(t)}max$) al tempo t_x e la sua frequenza, si può conoscere il valore che avrà in qualunque combinazione di $t_x + t$, dove "t" è un tempo selezionabile arbitrariamente.

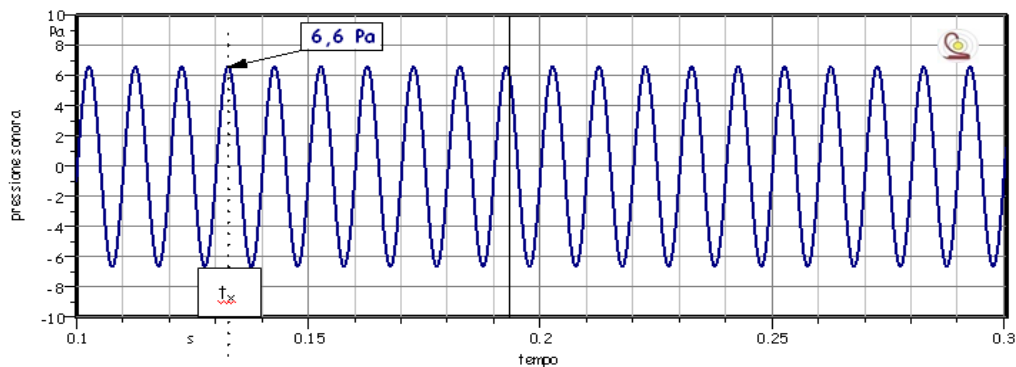


Figura 34: segnale deterministico (tono puro a 100Hz).-

Un segnale di tipo casuale, noto un suo valore massimo istantaneo al tempo t_x consente di conoscere il suo valore al tempo $t_x + t$ solo in termini probabilistici.

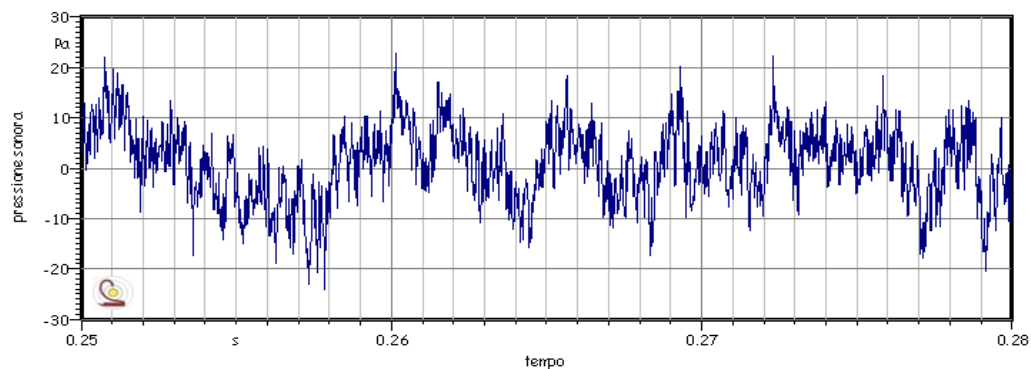


Figura 35: segnale casuale (rumore rosa).-

Nella figura 35 vediamo l'andamento dei valori istantanei $x_{(t)}$ di un intervallo temporale di rumore rosa da 20 a 20.000 Hz. L'instabilità di questo tipo di segnale è dovuto all'interazione fra il grandissimo numero di

componenti in frequenza di cui è costituito. Il tratto visualizzato copre un intervallo di 30 ms e con un tempo di integrazione da 20 ms produrrà una storia con una dispersione fra massimi e minimi dell'ordine di quella osservabile in figura 31 nel tratto in frequenza da 4 a 20 kHz.

Diverso il caso se consideriamo sempre il rumore rosa filtrato sul terzo di ottava dei 100 Hz. L'interazione fra le sue componenti ($B = 23 \text{ Hz}$) da luogo a fluttuazioni lente dei valori istantanei, e una storia di valori efficaci calcolati su 20 ms presenterà una dispersione notevole.

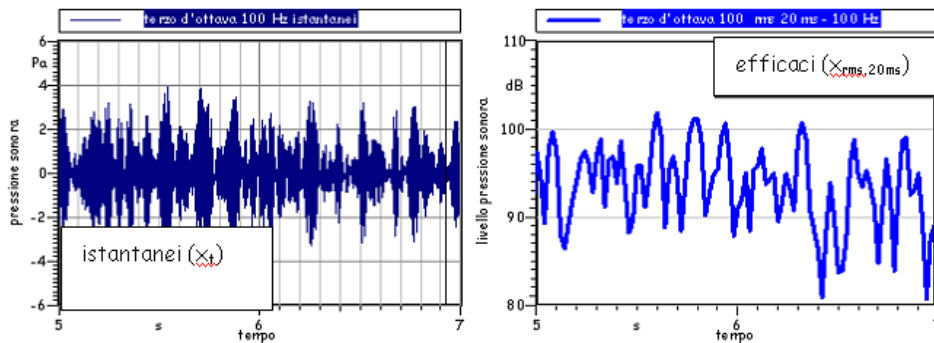


Figura 36: a sx storia di valori istantanei, a dx storia valori efficaci 20 ms l.r. per terzo d'ottava 100 Hz.-

Quindi, dal punto di vista della semeiotica dei decadimenti, quando un decadimento presenta caratteristiche di dispersione simili a quella del segnale eccitante diremo che ha caratteristiche casuali: avremo a che fare con un campo diffuso. Se invece all'interruzione della sorgente, vedremo che il decadimento perde le caratteristiche casuali e diventa deterministico diremo che quel tempo di riverbero è generato da un modo dominante: avremo a che fare con un campo monodirezionale.

11.- Interpretazione dei decadimenti e definizione del tempo di riverbero.-

Attivando la sorgente omnidirezionale in un ambiente confinato si produce dell'energia riflessa la quale in una serie di riflessioni, ognuna delle quali si somma alle precedenti, costituisce quello che noi chiamiamo campo diffuso il cui livello aumenta progressivamente. Nel momento che ad ogni riflessione esce dall'ambiente, per effetto dell'assorbimento, tanta energia quanta ne immette la sorgente, il livello del campo diffuso si stabilizza. Questo, dal punto di vista pratico, vuol dire che c'è un tempo minimo di eccitazione se si vuole saturare il campo diffuso. Nelle stanze di abitazione un paio di secondi. Utilizzare tempi minori vuol dire non portare a saturazione il campo e quindi partire da livelli minori limitando la dinamica. Quando la sorgente viene spenta l'energia accumulata nel campo diffuso permane, ma si estingue progressivamente ad un ritmo dipendente dalle unità assorbenti e dal cammino libero medio. Ad ogni riflessione esce una percentuale costante di energia. Su scala logaritmica un decremento percentuale costante si esprime come una retta a pendenza costante. Una volta acquisito il decadimento occorre andare a vedere, per ogni terzo d'ottava, quale sia quella retta che rappresenta la rapidità del decremento in dB/s. Una pendenza di 60 dB/s ci darà un T_{60} di 1 secondo, 120 dB/s ci darà un T_{60} di 0,5 secondi e così via.

Come si faceva un volta... Agli inizi dell'arte, quando si usavano i registratori grafici di livello, che registravano i decadimenti su nastro di carta, si usava una specie di goniometro di forma circolare chiamato "protractor". Il protractor era diviso in quadranti e ogni quadrante era specifico per la definizione di T_{60} in determinate condizioni di dinamica del registratore grafico (50, 75 dB) e di velocità di scorrimento della carta (10, 30 mm/s). Per definire T_{60} si posizionava la linea delimitante in basso il quadrante specifico in modo che "tagliasse" simmetricamente le fluttuazioni dei decadimenti, si leggeva il

valore di T_{60} facendo coincidere una delle linee radiali calibrate in secondi con una delle linee che sulla carta rappresentavano i livelli in dB.

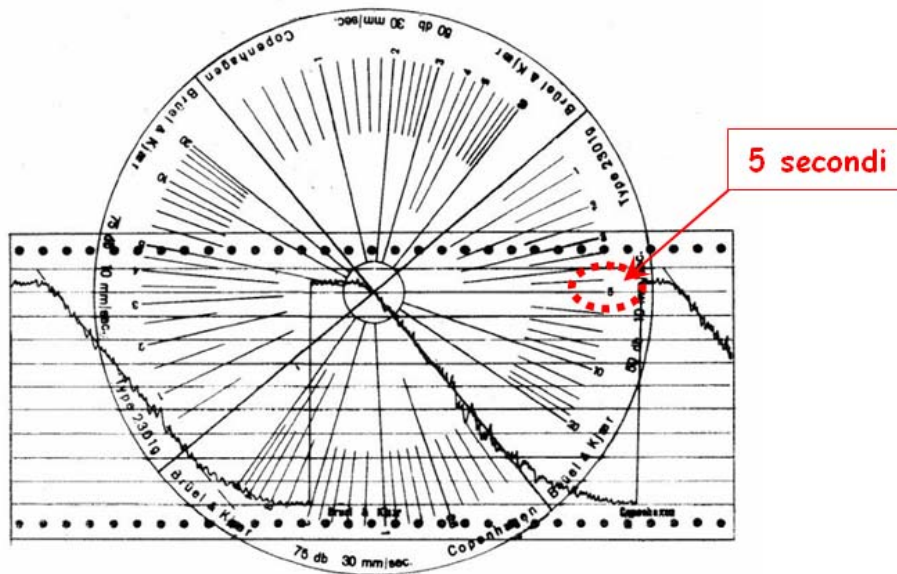


Figura 37: come si definiva T_{60} dagli inizi della seconda metà del secolo scorso.-

Nella figura 37 viene utilizzato il quadrante corrispondente ad una dinamica di 50 dB e una velocità di scorrimento della carta di 10 mm/s; T_{60} è di 5 secondi. I sistemi di identificazione automatica in auge da una ventina d'anni cercano di fare quello che faceva manualmente il protractor: a volte ci beccano a volte no (non hanno l'occhio dell'acustico). Quando non ci beccano occorre intervenire manualmente per posizionare la retta di regressione nella giusta posizione come si faceva con il protractor.

Da cosa possiamo capire che il sistema automatico non ci ha preso? In una prima e più grossolana analisi dei valori: se in una camera o un soggiorno non arredati mi vengono suggeriti 5-6-7 secondi deve essere chiaro immediatamente che il sistema automatico ha preso per decadimento qualcosa che decadimento non era. In una seconda e più raffinata analisi: la sequenza dei numeri deve essere plausibile, come in figura 30. Se non si controllano i modi assiali rendendo "artificialmente" diffuso il campo con dei diffusori, troveremo valori di $T_{60(f)}$ a scendere dalle basse alle alte frequenze. Ovviamente occorre dell'esperienza per riconoscere la plausibilità di un valore o di una sequenza di valori di T_{60} .

Chi non ha l'esperienza deve farsela, andando a verificare all'inizio della sua "carriera" di misuratore di T_{60} tutte le interpretazioni del suo sistema automatico alla luce di quanto segue.

Posizionamento della retta di regressione. - Per campi diffusi il problema si pone alle basse frequenze. alle frequenze medio-alte, se non ci sono interferenze, tipo rumori estranei, il problema non si pone. Nella figura 38 vediamo come a 4 kHz è impossibile sbagliare nel far coincidere la retta di regressione con la pendenza del decadimento mentre a 100 Hz occorre interpretare.-

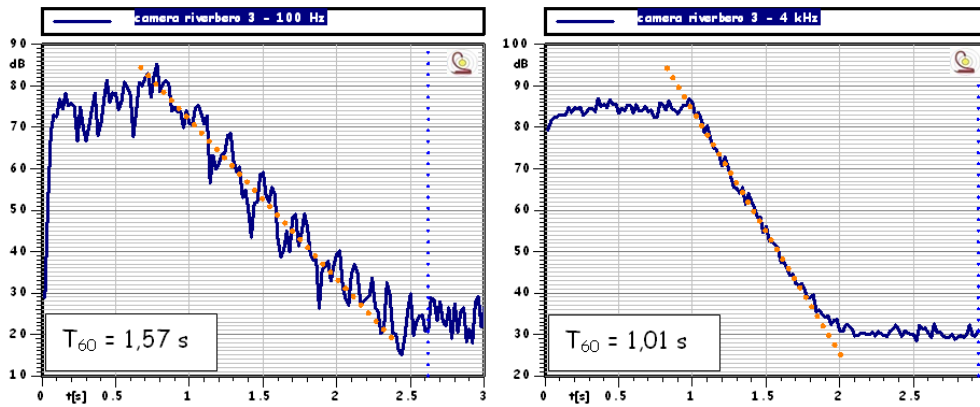


Figura 38: esempio di valutazione della pendenza agli estremi della gamma di frequenza.-

A 100 Hz, in campo diffuso, occorre tagliare in due "occhiometricamente" le fluttuazioni casuali del decadimento mentre a 4 kHz è sufficiente farle sparire sotto la retta di decadimento. La regola generale nel posizionamento della retta di regressione è quella di scartare, all'incirca, i primi 5 dB del decadimento perché possono essere influenzati dalla risposta dei filtri e di scartare i 10 dB prima del rumore di fondo per i noti motivi; ma è sempre l'occhio che giudica sulla base di evidenti variazioni di pendenza. Nella figura 38 a 100 Hz abbiamo identificato una retta con una pendenza di 38 dB/s corrispondenti ad un $T_{60(100\text{Hz})}$ di 1,57 secondi, mentre a 4 kHz abbiamo identificato una pendenza di 59 dB/s per un $T_{60(4\text{kHz})}$ di 1,01 secondi.-

Gli algoritmi di regressione.- Tra i vari algoritmi consideriamo "Drop Down" e lo "Standard Schroeder" il primo parte dall'alto e disegna il profilo del decadimento diciamo da un picco al picco successivo; il secondo si produce in un integrale che parte dal rumore di fondo immediatamente dopo la fine del decadimento, per poi invertendo l'ordine di tempo, proseguire verso l'inizio del decadimento.

Come principio generale "Drop Down" è stato pensato per il rumore interrotto, mentre "Standard Schroeder" per eccitazione impulsiva. Entrambi richiedono la definizione, prima del calcolo, di due punti di riferimento: da dove partire o quale deve essere lo scarto iniziale (da 0 a circa - 10 dB) e a quanta parte del decadimento si deve applicare il calcolo (10, 15, 20, 30, ecc dB) ovvero definire la dinamica di calcolo. Lo scarto iniziale normalizzato a 5 dB vorrebbe evitare la porzione di decadimento influenzata dalla risposta dei filtri, ma abbiamo visto che (figura 14) se il microfono è in campo diretto la parte influenzata dai filtri può essere più estesa. La dinamica di regressione si cerca di renderla più estesa possibile per una maggiore probabilità di successo nella interpretazione.-

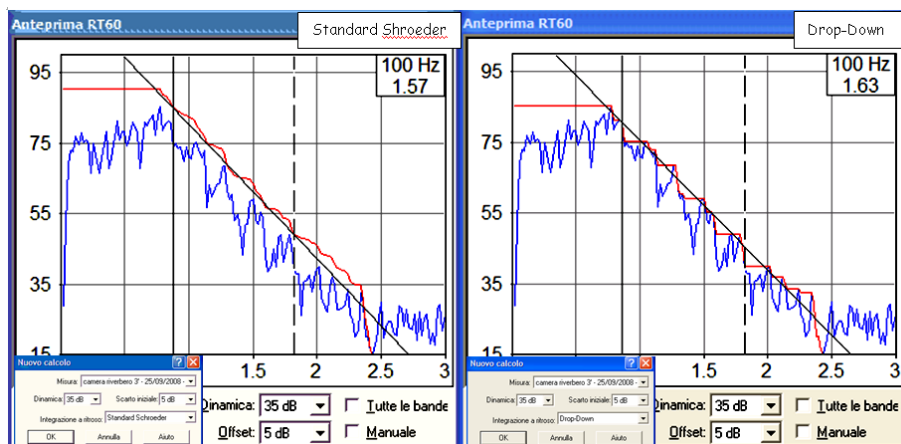


Figura 39: la linea rossa mostra il "ragionamento" fatto dai due algoritmi più diffusi.-

E' evidente che l'automatismo assume che tutti i decadimenti abbiano la stessa morfologia, cosa che abbiamo già visto non essere vera. Occorre quindi, prima di impostare le istruzioni di calcolo, una ispezione visiva dei decadimenti per verificare che ci siano le condizioni affinché il calcolo sia automaticamente efficace. Se, ad esempio, definiamo una dinamica di calcolo maggiore di quella disponibile per alcuni decadimenti (microfono in un nodo) l'automatismo ci darà dei numeri del Lotto per colpa nostra.

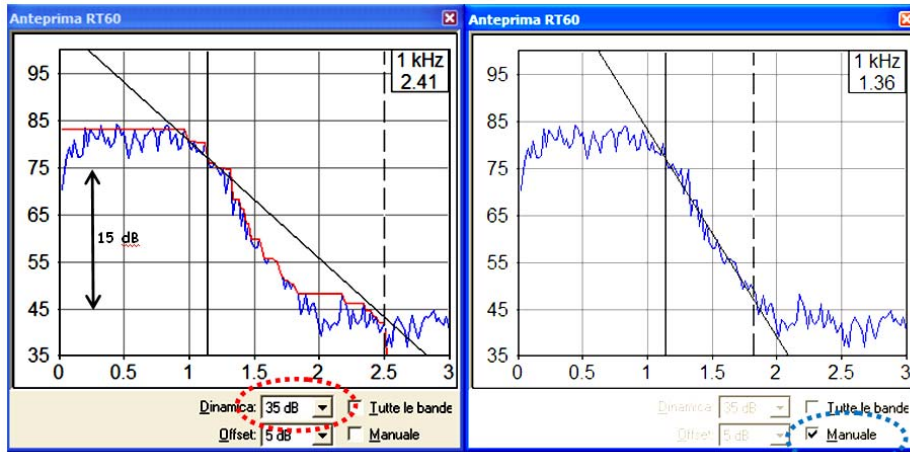


Figura 40: errore di calcolo di T_{60} dovuto a carenza di dinamica e sua correzione manuale.-

Da notare che rispetto alla fig.40, il terzo di ottava precedente e seguente, della stessa misura, dimostrano dinamiche utili per il calcolo di 40 e 50 dB rispettivamente. Peraltro sarà sempre possibile, una volta visto il risultato improbabile, intervenire manualmente. In questo caso la cosa improbabile è un valore di T_{60} a 1.000 Hz doppio rispetto al precedente e al seguente.-

Lavorando sul campo.- Sul campo, in generale, si soffre di una diffusa mancanza di tempo. Occorre fare un mucchio di misure, ai diversi piani, portando su e giù il materiale (sorgenti, treppiedi, misuratore, cavi di prolunga, localizzare i siti, litigare con il capocantiere che non vuole farvi battere con il calpestio su parquet e mattonelle, fermare attività troppo rumorose, accorgersi che non si sono caricati a sufficienza gli accumulatori, cercare un'alimentazione alternativa e così via.



Figura 41: l'equipaggiamento necessario per le misure e un paio di misure.-

Cosa può capitare che faccia andar di storto la acquisizione dei tempi di riverbero? Poche cose ma piene di conseguenze sulla definizione di T_{60} . Dando per scontato che la strumentazione sia quella giusta, e che sia impostata e usata correttamente tenendo conto dei suoi limiti, le cause possono essere:

- un evento sonoro inavvertito che altera il profilo del decadimento;
- che sorgente o microfono siano a certe frequenze in un nodo limitando così la dinamica per quelle frequenze;

- che in qualche posizione e per alcuni terzi d'ottava ci sia quel tipo di interazione fra modi assiali e tangenziali e obliqui che dà luogo ad un decadimento concavo (vedi fig.16) senza alcuna parte utilizzabile o parzialmente concavo (vedi fig.15) limitando la dinamica.

Quindi la giusta strategia pratica per affrontare queste oggettive difficoltà sarà quella di:

- non scegliere i punti di misura in posizioni simmetriche e alla stessa altezza;
- fare più misure di quelle strettamente necessarie contando che un 20-30% saranno da buttare tenuto conto che una volta posizionata la sorgente e microfono ogni misura richiede pochi secondi mentre richiamare dalla memoria, rivedere tutti i terzi di ottava, resettare la misura richiamata e riarmare il fonometro per la misura successiva richiede molto più tempo.
- elaborare poi in studio il risultato delle misure dando la priorità alla ispezione visiva dei risultati scartando le misure mal riuscite prima di eseguire il calcolo automatico.

Sarà così possibile fare la elaborazione con le misure ben riuscite, correggere un minimo di interpretazioni automatiche errate, e fornire un risultato accurato documentato e conforme alla realtà.

Casistica delle morfologie dei decadimenti.- Per posizionare correttamente la retta di regressione occorre saper leggere dalla morfologia del decadimento quale è la parte che rappresenta quello che cerchiamo. Occorre quindi una semeiotica dei decadimenti ed è ciò che tenteremo di dare in questo paragrafo tenendo conto di quanto già visto nel paragrafo 7. Abbiamo visto come la storia della misura (eccitazione-decadimento-rumore di fondo) presenta, nella parte "eccitazione", una fluttuazione relativamente alta che decresce all'aumentare delle frequenze centrali dei filtri. Ci aspetteremmo che il decadimento mantenga questo carattere, magari un po' distorto dalla rapidità del decremento, ma sostanzialmente uguale a quello della eccitazione, per poi assumere la variabilità del rumore di fondo che ha origini completamente diverse.

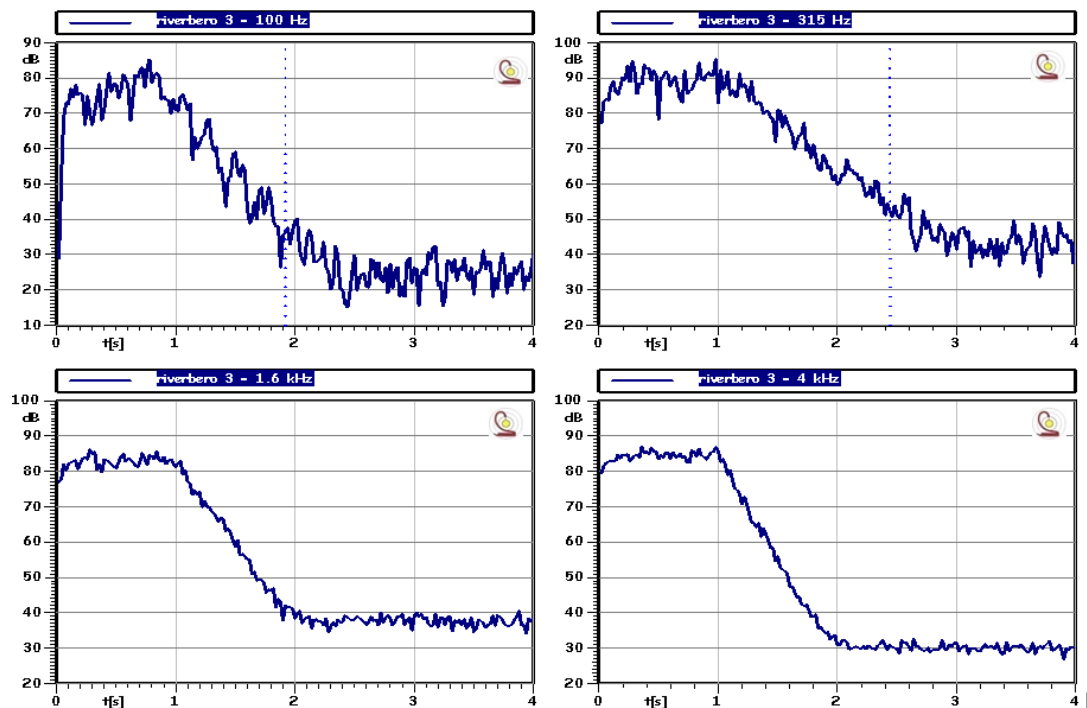


Figura 42: esempio di storie di decadimenti in campo diffuso.-

Nel caso riportato in figura 42 vediamo che i decadimenti mantengono il carattere casuale della sorgente e ne traiamo gran conforto perché questa morfologia ci racconta di un campo diffuso molto vicino a quello

teorico anche al di sotto della frequenza di Shröder. Trovare decadimenti di questo tipo in ambiente abitativo è però un sogno. Non ne troveremo mai se non dopo aver introdotto dei diffusori di dimensioni consistenti. La misura di figura 42 è stata fatta in una camera riverberante a norma ISO 140-1 dove, per aumentare la densità modale alle basse frequenze, si progettano due stanze nelle quali nessuna parete è parallela alle altre. Nella figura 43 possiamo vedere alcuni aspetti di questa camera, si osservi bene il pavimento e si potrà vedere il non parallelismo delle pareti.-



Figura 43: doppia camera riverberante, panoramica, trasmittente, ricevente.-

Noi, poveri manovali dell'acustica, che lavoriamo nei cantieri, dovremo fare i conti con basse densità modali.... ovvero dove, ad esempio, c'è un solo modo per terzo d'ottava troveremo che allo stop della sorgente ci sarà un mutamento radicale della storia che passa da casuale a deterministica.

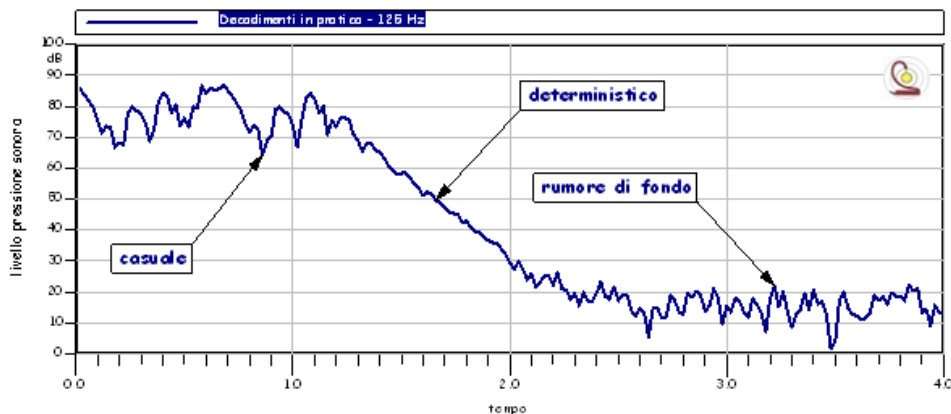


Figura 44: decadimento controllato da un solo modo assiale (monodirezionale).-

La frequenza di Shröder viene definita come quella al di sotto della quale abbiamo una densità modale di meno di tre modi per terzo d'ottava. Se abbiamo un solo modo (normalmente assiale) avremo un decadimento bello pulito, una riga quasi dritta come in figura 44. Se però abbiamo due o tre modi dobbiamo aspettarci la comparsa di battimenti o comunque la comparsa di figure d'interferenza ritmiche fra componenti coerenti in fase.

Componenti deterministiche.- Nella figura 45 sx vediamo un tipico decadimento dominato da un singolo modo, non c'è interferenza da riposta del filtro (T_{60} acustico è troppo grande, il microfono si trova in un ventre) la pendenza viene definita nell'intervallo da 1,86 secondi a circa 3,1 s, per un valore di 32 dB/s ($T_{60(100\text{Hz})} = 60/32 = 1,87$ s).

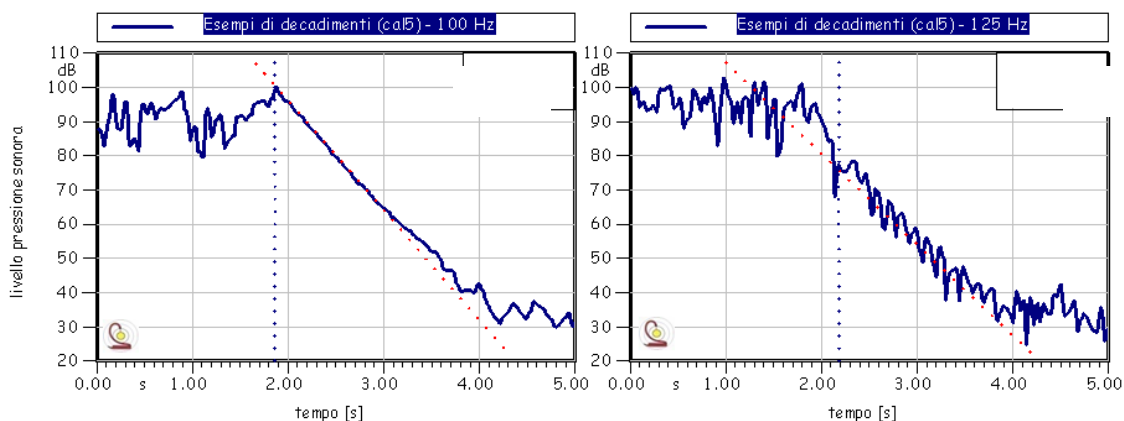


Figura 45: sx decadimento monofrequenza, dx decadimento con tipica figura di battimenti.-

A dx vediamo un tipico decadimento da:

- microfono in un nodo per quella frequenza, difatti i primi 20 dB di decadimento sono controllati da T_{60} elettrico,
- il decadimento acustico è controllato da due modi dominanti che danno luogo ad una tipica figura di battimento, ovviamente condizionata nel suo apparire da periodo di campionamento e risposta del rivelatore rms (20 ms l.r.), con un 1 ms l.r. la modulazione sarebbe molto più ampia e regolare.

La pendenza viene definita nell'intervallo da 2,18 secondi ai 3,2 secondi circa, per un valore di 26 dB/s ($T_{60(125Hz)} = 60/26 = 2,3$ s).-

Variazioni della dinamica.- Nella figura 46 vediamo due misure in due punti diversi con dinamiche risultanti dopo acquisizione diverse, 25 dB a destra e 35 dB a sinistra. Il decadimento a sx mostra, vagamente (è panciuto), una pendenza da 1,78 a circa 2,5 secondi di 47 dB/s per un $T_{60(400Hz)-1} = 60/47 = 1,27$ s. Il decadimento a dx mostra una pendenza da 1,7 a circa 2,3 secondi da 59 dB/s per un $T_{60(400Hz)-2} = 60/59 = 1,01$ s.

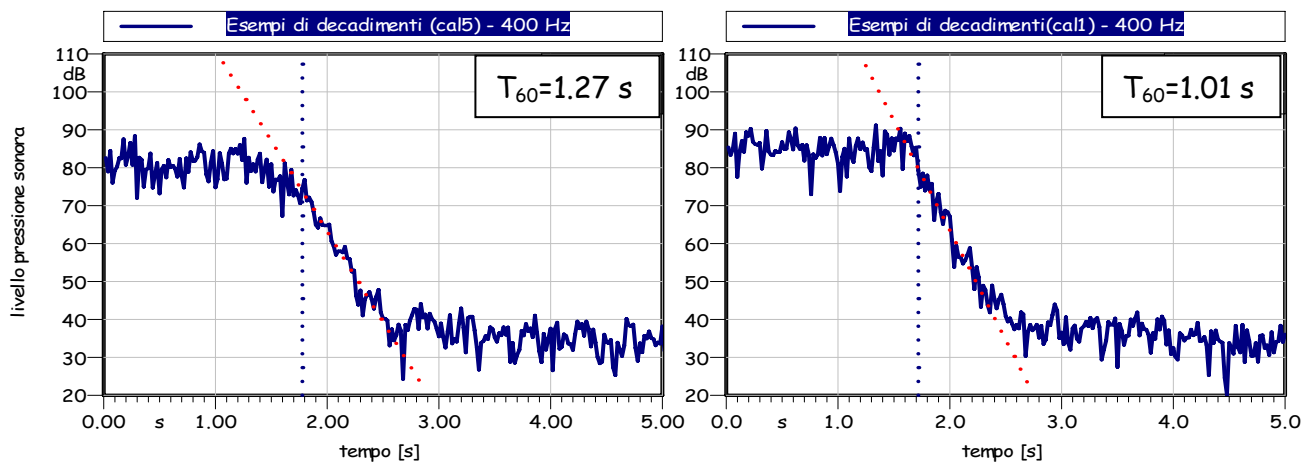


Figura 46: stessa frequenza, stesso ambiente punti diversi, dinamica risultante e morfologie diverse.-

La differenza fra i due è troppo grande per essere il $T_{60(400Hz)}$ di una stessa stanza, inoltre il valore $T_{60(400Hz)}$ è dubbio in quanto ricavato da una dinamica più limitata su di una morfologia incerta. Difatti confrontando con gli altri decadimenti, morfologicamente più coerenti, si trovano valori di $T_{60(400Hz)10misure}$ da 0,9 a 1,1 secondi quindi: o si corregge la interpretazione di $T_{60(400Hz)}$ smanettando le retta di regressione o si elimina la misura dal calcolo di $T_{60(400Hz)Medio}$.-

Concavità nella pendenza.- Nella figura 47 vediamo un paio di casi di decadimenti concavi, misurati in ambienti diversi, quali si possono rilevare quando il decadimento è controllato in sequenza dai modi obliqui, tangenziali ed assiali. In questi casi si va a verificare la pendenza prossima all'inizio del decadimento perché è quella che controlla il livello in ricezione. Nei casi come quello di fig.47 si può ignorare lo scarto di 5 dB iniziali sia causa della scarsità della dinamica utile sia perché non c'è evidenza di influenza della risposta dei filtri.

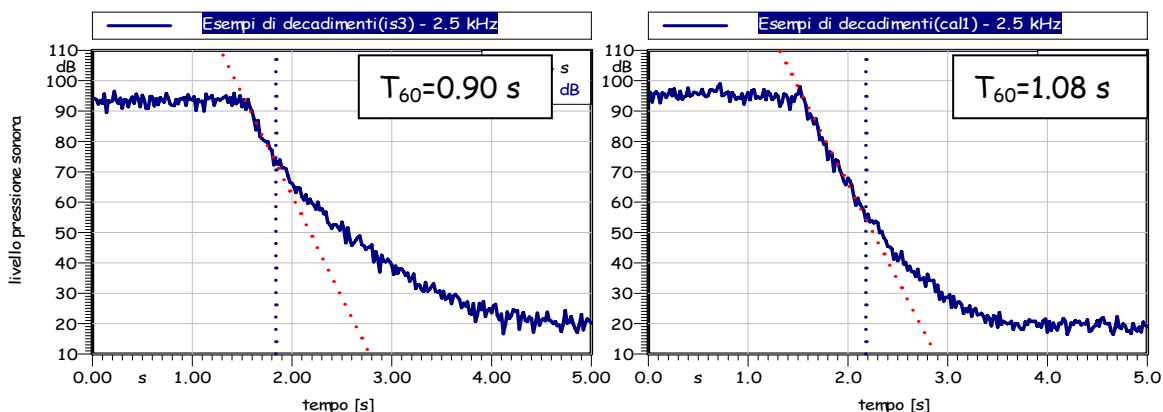


Figura 47: decadimenti concavi.-

Dai secondi 1,56 ai secondi 1,86 abbiamo una dinamica di 20 dB scarsi con una pendenza di 66 dB/s. A destra dai secondi 1,52 ai secondi 2,18 abbiamo una dinamica utile di 42 db circa con una pendenza di 55,5 dB/s. La estensione della dinamica utile dipende dal bilancio energetico fra i tre tipi di modi. Nella figura 47 dx i modi obliqui sono nettamente dominanti sugli altri modi consentendo una buona dinamica.

Risposta dei filtri.- Nella figura 48 vediamo dei decadimenti nei quali la parte iniziale è controllata dalla risposta elettrica del sistema per circa 30 dB, solo dopo questa prima parte emerge il decadimento acustico, in questi casi la retta di regressione va collimata con la seconda parte delle pendenza.

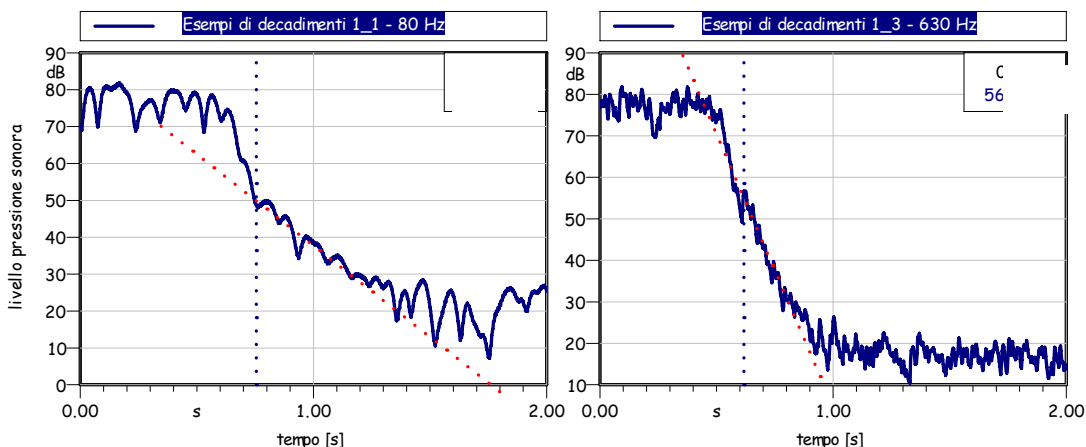


Figura 48: decadimenti controllati dal filtro nella fase iniziale.-

A sinistra abbiamo una pendenza utile dai secondi 0,75 ai secondi 1,24 (circa 20 dB di dinamica) con una pendenza di 50 dB/s per un $T_{60(80\text{Hz})1_1} = 60/50 = 1,2$ secondi. A destra la parte controllata dalla risposta elettrica si estende per circa 20 dB, la zona controllata dal decadimento acustico inizia ai secondi 0,62 ed è utilizzabile fino ai secondi 0,81 per una pendenza di 132 dB/s per un $T_{60(630\text{Hz})1_3} = 60/132 = 0,45$ secondi.-