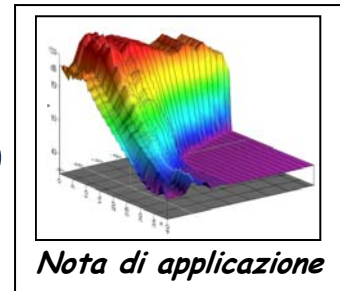


RT60

METODI PER LA MISURA DEL TEMPO DI RIVERBERAZIONE



ARMANI Alberto
09-2009

Premessa

Nelle misure di acustica edilizia ed acustica architettonica, la valutazione del tempo di riverberazione si è sempre dimostrata la più critica e la più lunga in termini di esecuzione.

Sovente questa misura viene condotta con scarsa attenzione, fidandosi dei risultati forniti automaticamente dalla strumentazione utilizzata.

Con il diffondersi di richieste volte alla valutazione in opera dei requisiti passivi degli edifici, è oggi opportuno ricercare una procedura di misura ed una modalità di presentazione dei risultati che riesca a garantire il raggiungimento di una sufficiente accuratezza in relazione alle numerose variabili che possono interferire in questo tipo di misure.

La nota tecnica che segue, vuole descrivere le nuove soluzioni che Spectra S.r.l. intende suggerire in unione alla strumentazione di misura che viene proposta per questo specifico settore.

Il tempo di riverberazione

Il tempo di riverberazione è il criterio di valutazione più immediato per definire la qualità acustica di un locale ed indica il tempo, in secondi, necessario affinché, in una definita posizione, in un ambiente confinato, il livello sonoro si riduce di una definita entità rispetto a quello che aveva nell'istante precedente all'interruzione della sorgente sonora.

Per convenzione, il tempo di riverberazione viene definito come T_{60} , ovvero l'intervallo di tempo in cui l'energia sonora decresce di 60 dB dopo lo spegnimento della sorgente sonora.

In un ambiente dove il campo sonoro può ritenersi ragionevolmente diffuso, il valore di T_{60} è può essere calcolato con la formula di Sabine.

$$T = 0.16 \left(\frac{V}{A} \right) (\text{s})$$

dove V è il volume dell'ambiente in m^3 e A è l'area equivalente dell'assorbimento totale in m^2 .

Il tempo di riverberazione viene percepito soggettivamente come la persistenza sonora mantenuta in un locale chiuso, in seguito ad una eccitazione acustica, a causa delle riflessioni continue sulle sue pareti.

Questo parametro dipende quindi dal volume del locale ' V ' e dalle caratteristiche di assorbimento acustico ' A ' delle superfici presenti.

Poiché l'assorbimento acustico dei materiali 'A' dipende dalla frequenza, di conseguenza anche il tempo di riverberazione sarà variabile verso frequenza.

Nella pratica della misura del tempo di riverberazione vengono però considerate con minor attenzione altre variabili che pur rivestono grande importanza per raggiungere un risultato accurato in termini di ripetibilità e riproducibilità. Di seguito un elenco di alcune di queste variabili :

1. Scelta del tipo di sorgente sonora e del segnale di eccitazione sonora.
2. Scelta del numero di postazioni microfoniche
3. Numero di rilievi per singola posizione microfonica e per ogni posizione della sorgente sonora.
4. Criterio di media dei decadimenti.
5. Criterio per la valutazione del decadimento della coda sonora
6. Valutazione del rumore di fondo

Trascurare l'influenza dei punti elencati, durante l'esecuzione della misura del tempo di riverberazione, comporta spesso la necessità di dover ripetere le misure o peggio ancora avere dati non congrui al locale testato senza sapere di aver sbagliato.

Al contrario, considerare questi punti può richiedere oltre che un operatore con esperienza, anche un tempo ed una attenzione maggiore; condizioni che in cantiere non sono sempre disponibili.

Per questa ragione si è cercato di integrare il risultato della misura con tutti quegli indicatori di qualità riportati nelle varie normative ISO in modo tale che l'operatore potesse avere una visione sintetica e di facile comprensione di queste problematiche.

Con l'esperienza maturata nel supporto della strumentazione e del software per queste misure specifiche, la soluzione realizzata è stata ottimizzata con l'aiuto di una serie di icone verdi per segnalare una condizione soddisfatta, gialle per le condizioni di attenzione e rosse per quelle in cui il risultato non può essere considerato valido.

La grafica con cui le icone indicano le condizioni di rispetto degli indicatori ISO di riferimento è in funzione delle bande in frequenza in 1/1 o 1/3 d'ottava per cui all'operatore viene fornito durante il procedere delle misure, una panoramica completa ed aggiornata dei possibili artefatti nel calcolo del tempo di riverberazione.

Gli indicatori di qualità

Nella valutazione delle misure dei tempi di riverberazione, gli indicatori di qualità utilizzati come riferimento sono tratti dalle seguenti norme ISO :

BT>16 ISO 3382-1 Par. 6.4 Limiti minimi per risultati affidabili influenzati dalla risposta del filtro e dal rilevatore del sistema di analisi.

Fondo ISO 354 Par. 7.4.1 ed **ISO 3382-1** Par. 5.3.2 e 6.1 Il punto inferiore nel campo di misurazione deve essere almeno 10 dB maggiore del livello del rumore di fondo.

Correlazione ISO 354 Par. 7.4.2 Retta di decadimento calcolata con interpolazione ai minimi quadrati.

Curvatura ISO 3382-2 Annex B.3 ed **ISO 354** Par. 7.2.2 Curva di decadimento non lineare o spezzata.

Scarto Tipo ISO 354 Par. 8.2.2, **ISO 3382-1** Par. 7a ed **ISO 140/TR-13** Par. 6.2 Accuratezza nella ripetibilità delle misure di riverberazione.

Nota: Tutti gli indicatori riportati sono impiegati anche per la valutazione delle misure eseguite con il metodo 'Sine-Sweep' in conformità alla ISO 18233-2006 'Applicazione di nuovi metodi di misurazione per l'acustica negli edifici'.

Risposta dei filtri BT>16

L'utilizzo dei filtri a banda di 1/3 d'ottava o di 1/1 ottava del sistema di analisi introduce un tempo di risposta che dipende dalla larghezza di banda del filtro stesso; più la larghezza di banda si riduce più aumenta il tempo di risposta del filtro e ciò può creare delle criticità per la misura della riverberazione sulle bande a bassa frequenza.

Per evidenziare in modo facilmente comprensibile questo comportamento senza introdurre descrizioni analitiche, possiamo semplicemente osservare la risposta di un sistema di analisi a 1/3 d'ottava quando viene eccitato con un segnale elettrico costituito da un impulso molto breve.

Il grafico di *fig. 1* mostra la 'time history' del livello delle bande a 1/3 d'ottava dei 50 Hz, 100 Hz, 250 Hz, 500 Hz e 1kHz; risulta molto chiara la diversa velocità di decadimento tra le bande delle frequenze più basse come la traccia rossa dei 100Hz rispetto a quelle delle frequenze superiori come ad esempio quella blu dei 1000 Hz.

Nella stessa figura viene riportato lo spettrogramma corrispondente dove l'effetto della risposta in ritardo sulle basse frequenze viene dipinta con una pennellata di colore che si trascina sull'asse del tempo per le frequenze più basse. L'impulso elettrico di eccitazione viene fornito dopo circa 50 ms e mentre sulle bande con frequenza superiore a 1 kHz la risposta si esaurisce dopo pochi millisecondi, alle basse frequenze occorrono tempi centinaia di volte superiori.

Se proviamo a esaminare la risposta elettrica dei filtri a questa eccitazione impulsiva come se si trattasse di una comune misura di riverberazione, troveremo logicamente i valori minimi rilevabili con la strumentazione che stiamo utilizzando.

Nel grafico di *fig.2* i valori minimi di riverberazione RT60 rilevati come risposta elettrica dei filtri per singola banda di 1/3 d'ottava, sono riportati con la curva rossa a pallini. Nello stesso grafico viene indicata la curva relativa ai valori minimi misurabili secondo la relazione che lega il prodotto della larghezza di banda del filtro 'B' per tempo di riverberazione misurato 'T' ad un risultato che deve essere sempre maggiore di 16. (ISO 3382-1 Par. 6.4)

Se consideriamo la banda del 1/3 d'ottava dei 100 Hz che ha una larghezza di 23 Hz, per soddisfare la relazione $BT > 16$ il tempo di riverberazione misurato dovrà essere possibilmente superiore a circa 0.70 secondi (16/23) anche se il nostro analizzatore sarebbe capace di rilevare decadimenti molto più brevi (0.26 s).

Il prodotto $BT > 16$ garantisce l'operatore che la misura di riverberazione non è influenzata dal tempo di risposta dei filtri ma in acustica edilizia, questi valori possono risultare troppo elevati poiché i volumi dei locali sono sovente di dimensioni contenute e con tempi di riverberazione nelle bande inferiori ai 250 Hz molto più bassi di quelli definiti dalla relazione $BT > 16$.

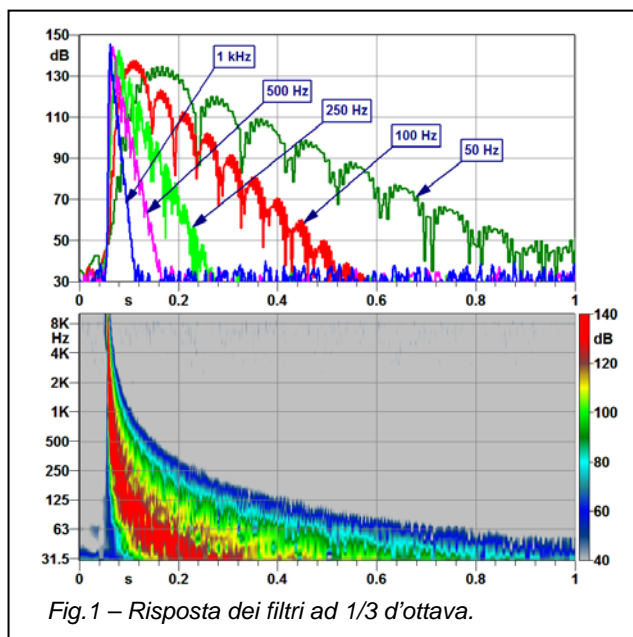


Fig.1 – Risposta dei filtri ad 1/3 d'ottava.

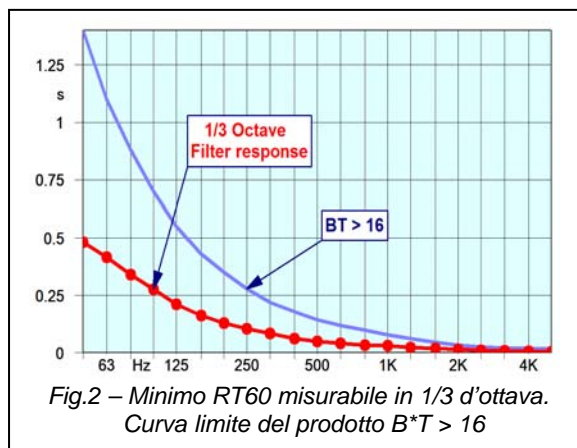
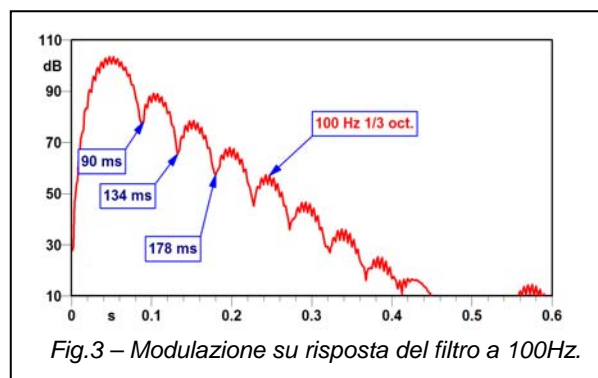


Fig.2 – Minimo RT60 misurabile in 1/3 d'ottava.
Curva limite del prodotto $B \cdot T > 16$

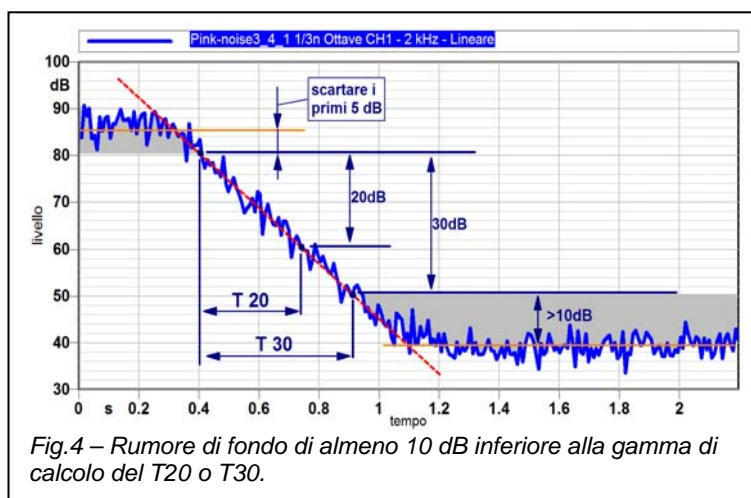
Nota: Anche la larghezza di ogni banda di analisi interagisce nella risposta elettrica del filtro e determina una tipica modulazione simile a quella che in *fig. 3* viene riportata nel caso della risposta del filtro ad 1/3 d'ottava dei 100 Hz; se consideriamo gli istanti tra due minimi nella modulazione troveremo un delta costante pari a $134 - 90 = 44$ ms corrispondente alla larghezza di banda del filtro a 1/3 d'ottava dei 100 Hz che appunto è di 23 Hz ($1 / 0.044 = 22.7$ Hz)



Rumore di fondo

Un requisito fondamentale nella misura del tempo di riverberazione vuole che il punto inferiore nel campo di misurazione deve essere almeno 10 dB maggiore del livello del rumore di fondo.

Sebbene la misura del tempo di riverberazione corrisponda ad un decadimento del livello sonoro su una gamma dinamica di 60 dB, nella pratica, il criterio generale riportato in tutte le norme ISO di riferimento vuole che la dinamica su cui effettuare il calcolo del tempo di riverberazione sia 20 o 30 dB; la *fig.4* mostra come la gamma di calcolo viene individuata scartando i primi 5 dB sulla retta di regressione che individua il decadimento e misurando il tempo necessario per un decadimento di 20 o 30 dB. Il tempo rilevato per il decadimento dei 20 dB viene poi moltiplicato per 3 volte per poterlo rapportare al decadimento nominale dei 60 dB e verrà per convenzione denominato come T20, mentre il decadimento sui 30 dB viene moltiplicato per 2 volte e denominato T30. Un ulteriore requisito impone che il rumore di



fondo per ciascuna banda di misura sia almeno 10 dB più basso al punto inferiore della gamma di calcolo; se nel calcolo del T30 il rumore di fondo dovesse posizionarsi ad un livello non inferiore ai 10 dB minimi richiesti, allora si dovrà prendere in considerazione T20 con il calcolo su una gamma dinamica ridotta. Nella pratica capita che il rumore di fondo risenta di altre attività che vengono svolte contemporaneamente nel cantiere; l'osservare che il rumore di fondo soddisfi il requisito richiesto potrebbe comunque non essere una garanzia sufficiente

qualora il rumore di fondo abbia carattere impulsivo o transitorio.

Correlazione sulla retta di decadimento

Il calcolo del tempo di riverberazione non viene eseguito direttamente sul decadimento del livello sonoro rilevato ma viene prima calcolata la retta di decadimento usando una regressione lineare ai minimi quadrati; questa soluzione è necessaria poiché i dati originali sono influenzati dalla risposta dei modi dell'ambiente con elevate fluttuazioni di livello che sulle bande a bassa frequenza possono essere superiori ai 10 dB.

Il quadrato del coefficiente di correlazione indica la bontà con cui la retta di regressione calcolata interpola i valori veri del decadimento del livello sonoro nella gamma dinamica di 20 dB 'T20' o di 30 dB 'T30'.

Un valore del coefficiente pari al 100% indica la migliore correlazione possibile mentre valori inferiori danno un indice realistico della qualità con cui i dati misurati sono approssimati dalla retta di regressione; una valore di correlazione inferiore al 95% viene ritenuto come indice di qualche difficoltà nel processo di interpolazione.

La *fig.5* riporta il caso emblematico del calcolo di un tempo di riverberazione sul 1/3 d'ottava dei 200Hz valutato su un decadimento di 30 dB, (T30) e caratterizzato da una elevata fluttuazione del livello sia durante la fase di sonorizzazione dell'ambiente sia sul rumore di fondo. L'esempio mette ben in evidenza le comuni problematiche che sorgono sulle bande a bassa frequenza quando viene utilizzato come segnale di eccitazione il rumore interrotto; queste difficoltà aumentano al diminuire del volume del locale.

La retta di regressione calcolata sulla dinamica di 30 dB definita tra i punti a -5 dB ed a -30 dB, con una interpolazione ai minimi quadrati migliora la determinazione del decadimento medio ma il coefficiente di correlazione pari al 80.0% indica che l'incertezza del risultato rimane comunque elevata e non accettabile. Le ampie fluttuazioni che sono presenti sul segnale sono responsabili del non corretto posizionamento del punto a -5 dB che si trova su un minimo precedente all'ultima fluttuazione prima del decadimento.

A ribadire le difficoltà associate all'interazione tra la natura casuale del segnale di eccitazione ed i modi di risposta acustica dell'ambiente, in *fig.6* viene riproposta la traccia corrispondente al decadimento della banda dei 200 Hz ma con il calcolo del tempo di riverbero riferito ad una dinamica di 20 dB (T20) e non di 30 dB (T30) come nel caso precedente; ci si dovrebbe attendere un valore di riverbero identico o poco diverso mentre il risultato evidenzia un valore di T20 di 0.27 s corrispondente a quasi la metà del valore fornito dal T30 pari a 0.56 s. Osservando il posizionamento dei punti 't1' a -5 dB e 't2' a -20 dB che definiscono la dinamica di calcolo del T20 è facile notare l'artefatto indotto dalla presenza di un profondo buco nel decadimento che manifestandosi attorno alla soglia dei -20 dB inganna l'algoritmo di ricerca del punto 't2' a -20 dB. Il logico pensiero conseguente sarebbe quello di intervenire migliorando l'algoritmo di ricerca dei punti che definiscono la dinamica di calcolo, ma data la grande possibilità di interazioni, la soluzione non risulta di facile soluzione.

Nelle misure con eccitazione basata sul metodo del rumore interrotto, sempre a causa delle ampie fluttuazioni del livello di segnale al momento della sua interruzione, risulta inoltre difficile la determinazione del punto 't1' a -5 dB da cui iniziare il calcolo del tempo di decadimento sulla gamma normalizzata T20 o T30.

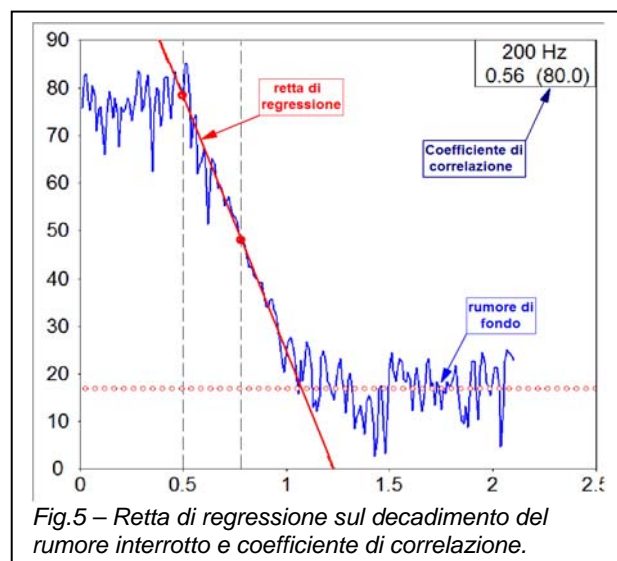


Fig.5 – Retta di regressione sul decadimento del rumore interrotto e coefficiente di correlazione.

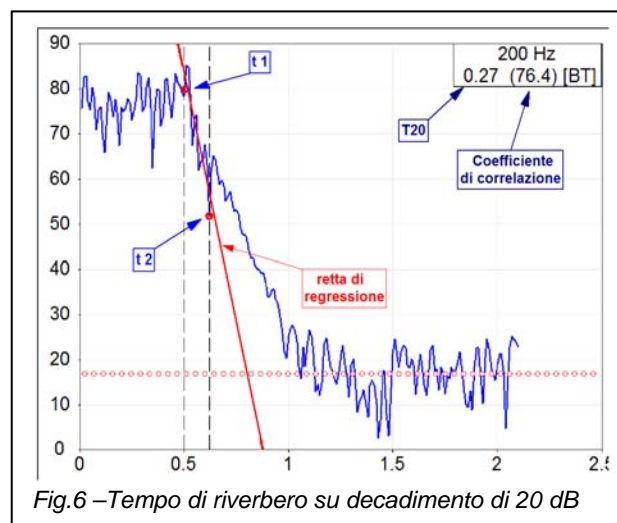


Fig.6 – Tempo di riverbero su decadimento di 20 dB

La sola soluzione quando si utilizza come eccitazione sonora il rumore interrotto consiste nella media sincrona definita come 'ensemble averaging' di più decadimenti. In *fig. 7* viene mostrato il risultato di una media sincrona di 10 decadimenti misurati sul medesimo 1/3 d'ottava dei 200 Hz e si osserva la riduzione delle fluttuazioni del livello sia sul segnale generato sia sul rumore di fondo oltre che ad un coefficiente di correlazione ora molto migliorato e pari al 99.4%.

Si sconsiglia quindi sempre il calcolo del tempo di riverbero su misure singole ovvero non mediate sull'insieme dei decadimenti, quando viene usato il metodo del rumore interrotto.

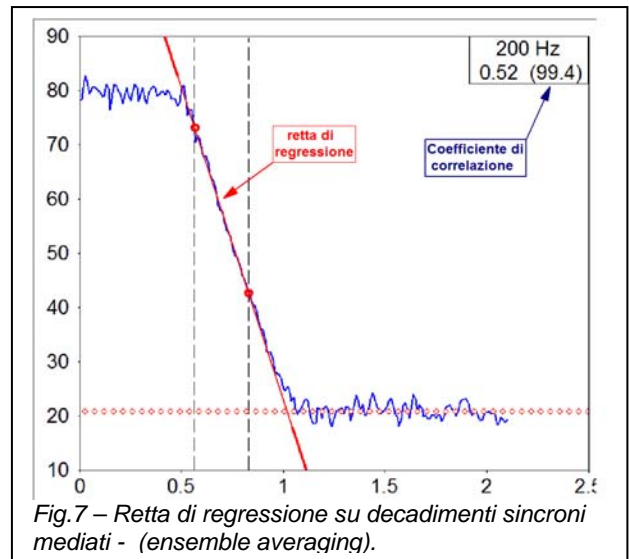


Fig.7 - Retta di regressione su decadimenti sincroni mediati - (ensemble averaging).

Curvatura del decadimento

Il livello sonoro all'atto della interruzione della sorgente sonora è governato dalla risposta del locale eccitato e quindi dal suo volume, dalla sua geometria, dalle sue unità assorbenti e nel caso di un campo sonoro realmente diffuso si otterrebbe su una scala delle ampiezze in dB, una retta di decadimento perfettamente lineare. Nella realtà però i decadimenti sono sovente lontani da questa condizione di linearità, introducendo un'altra possibile sorgente di incertezza nel calcolo del tempo di riverberazione.

Nel caso di un decadimento non lineare risulta difficile definire a priori un criterio adeguato per tutte le situazioni ma è importante che l'operatore sia in grado di individuare oggettivamente la presenza di questa problematica considerando inoltre che può coinvolgere solo alcune bande in frequenza.

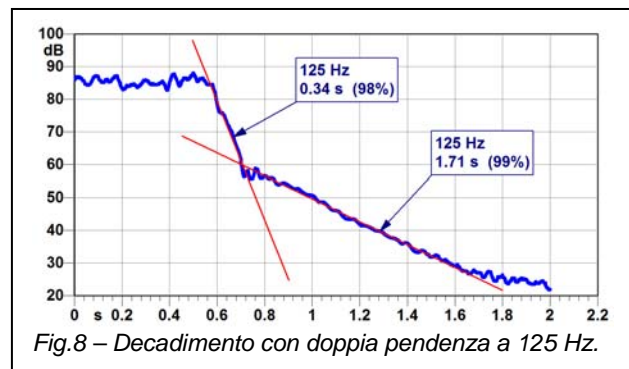


Fig.8 - Decadimento con doppia pendenza a 125 Hz.

Una soluzione efficace consiste nel confrontare semplicemente i risultati sui decadimenti calcolati su 20 dB e su 30 dB (T20 e T30) qualora la loro differenza supera il 10% viene attivato un indicatore di presenza curvatura 'C'.

$$C=100 \times \left(\frac{T30}{T20} - 1 \right)$$

In *fig.8* si può osservare un decadimento a 125 Hz con doppia pendenza relativo a due ambienti di diverso volume comunicanti con un corto corridoio; qualunque tipo di calcolo automatico del tempo di riverberazione non sarebbe in grado di rilevare ciò che visivamente l'operatore è in grado di rilevare e misurare posizionando opportunamente i cursori di calcolo ed osservando il risultato evidenziato dalla retta di regressione: 0.34 s per la prima parte del decadimento e 1.71 s per la seconda parte del

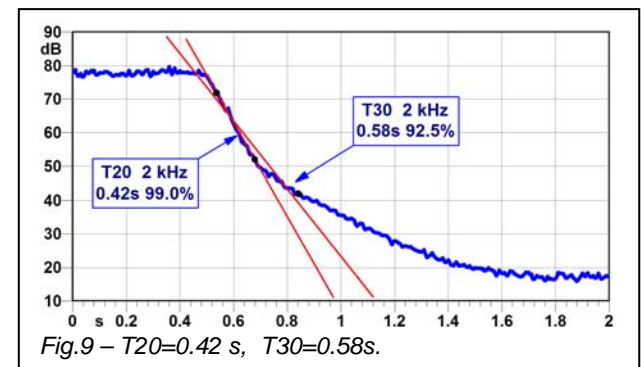
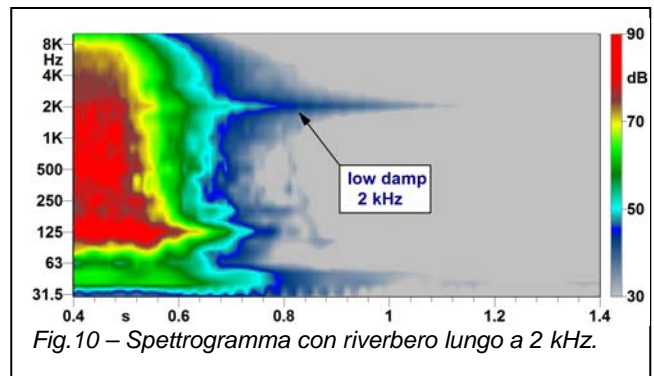


Fig.9 - T20=0.42 s, T30=0.58s.

decadimento, a partire dal termine della prima parte e dovuto all'accoppiamento con il locale adiacente.

La *fig.9* mostra un decadimento a 2 kHz con accentuata curvatura in genere associata ad ambienti con assorbimento molto disomogeneo su pareti reciprocamente affacciate o a basse frequenze, per l'azione poco smorzata e dominante dei modi di risposta assiali del locale, rispetto allo smorzamento associato ai modi superiori tangenziali ed obliqui; in queste situazioni è facilmente comprensibile come un calcolo del riverbero condotto su gamme dinamiche differenti come ad esempio T20 e T30, possono dare risultati molto diversi T20=0.42s e T30=0.58s. T20 e T30 per un decadimento lineare devono dare valori identici. In genere ad una indicazione di presenza di curvatura si trova associato anche un basso valore del coefficiente di correlazione. Durante la procedura di acquisizione, lo spettrogramma in tempo reale in bande a 1/3 d'ottava, con scala a colori delle ampiezze, come mostrato in *fig.10*, consente di individuare facilmente nella coda sonora di risposta del locale, la presenza di componenti con debole smorzamento o comportamento anomalo.



Accuratezza nella ripetibilità

L'incertezza su una misura di riverberazione viene determinata da numerosi fattori; nel caso dell'impiego della modalità di eccitazione sonora con rumore interrotto, dipende fortemente dalla natura casuale del tipo di segnale e di conseguenza dal numero e dal criterio di medie scelto. Si raccomanda in questo caso ma anche come condotta generale, un numero di determinazioni (medie) per singola postazione microfonica pari a 10 ed un calcolo eseguito sempre sulla media dei decadimenti 'ensemble averaging' e non un calcolo sulla media aritmetica dei risultati dei singoli decadimenti.

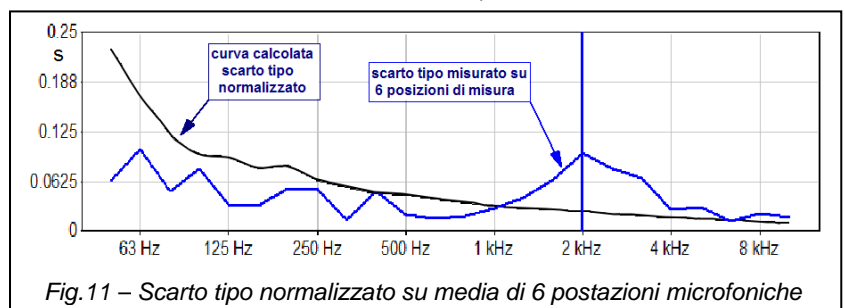
Un ragionamento più attento deve essere usato per contenere l'incertezza che sorge dalla ripetibilità di misure eseguite in diverse postazioni microfoniche e quindi in diverse posizioni dell'ambiente e per diverse posizioni della sorgente sonora.

Il volume del locale, la distribuzione del suo assorbimento, l'interazione dei modi acustici di risposta alle basse frequenze, la posizione dei microfoni e della sorgente di sonorizzazione ed il criterio di media delle misure, introducono un gran numero di interazioni reciproche, condizionando evidentemente l'accuratezza del risultato finale in funzione di ogni banda di analisi.

Per ottenere un indicatore capace di mostrare l'effetto di queste criticità, senza introdurre un grado eccessivo di complessità gestionale, è stato scelto lo scarto tipo normalizzato come indicato nella ISO 354 paragrafo 8.2.2 che rimanda alla ISO/TR 140-13 per maggiori dettagli (Nordtest NT-203).

Una rappresentazione grafica consente di visualizzare lo scarto tipo (deviazione standard) come spettro in bande di 1/1 ottave o 1/3 d'ottava dell'insieme delle misure di riverberazione acquisite nelle diverse postazioni microfoniche sovrapposte alla curva calcolata dello scarto tipo atteso; uno scostamento superiore al 50% tra lo scarto tipo misurato e quello atteso viene indicato con una specifica icona rossa di allarme mentre per il solo superamento l'icona diventa gialla e verde se rimane inferiore al valore della curva calcolata.

La curva di riferimento dello scarto tipo atteso calcolata analiticamente



è sensibile alla gamma dinamica di calcolo T20 e T30, al numero di misure per posizione microfonica o al numero di posizioni microfoniche, alla banda in frequenza ed al tempo di riverberazione misurato; aumentando il numero di misure la curva di riferimento tende a diminuire esponenzialmente mentre aumenta all'aumentare del tempo di riverbero.

Lo scarto tipo di un insieme di misure di tempo di riverberazione acquisito su varie postazioni microfoniche e confrontato con la curva calcolata dello scarto tipo atteso mette in evidenza la dispersione dei valori (variabilità) delle misure in relazione alla loro posizione nell'ambiente. Nella *fig.11* viene riportato lo scarto tipo corrispondente ai tempi di riverberazione rilevati su 6 diverse postazioni microfoniche con una media di 6 decadimenti ripetuti per ogni postazione; il netto superamento della curva dello scarto tipo normalizzato nelle bande del 1/3 d'ottava dei 1.6 kHz, 2 kHz, 2.5 kHz e 3.15 kHz indica la presenza di una anomalia non accettabile, escludendo le condizioni di campo diffuso.

Visualizzazione degli indicatori di qualità

Alcuni degli indicatori di qualità descritti sono riportati nelle norme ISO da oltre 30 anni ma sono sempre stati scarsamente utilizzati per certificare l'accuratezza dei risultati in modo efficiente.

Seguendo alcuni dei lavori presentati negli ultimi convegni internazionali di acustica ed unendo l'esperienza pratica scaturita dall'applicazione del DPCM 05-12-97, si è cercato di organizzare gli indicatori di qualità delle misure del tempo di riverberazione con una rappresentazione grafica capace di fornire una visione globale e di semplice comprensione per le più ricorrenti problematiche evidenziate.

La soluzione più interessante scaturita da queste esperienze consiste in una tabella che riporta verso bande in frequenza, lo stato di tutti gli indicatori di qualità descritti, con una serie di icone colorate in verde per la condizione di consenso, giallo per la condizione di attenzione e rosso per quella di allarme ovvero per la presenza di una delle varie situazioni di criticità.

Come mostrato da una schermata catturata da un analizzatore 'SoundBook' e riportata in *fig. 12*, l'operatore può facilmente a colpo d'occhio avere una situazione generale delle condizioni del procedere delle misure osservando il colore della tabella delle icone; se per ogni banda in frequenza, tutte le icone sono verdi, questo indica l'esecuzione di una misura di riverberazione in condizioni ideali. Le condizioni ideali sono ovviamente difficili da raggiungere e quindi potrà evidenziarsi un certo numero di icone di colore giallo che indicano la presenza di una situazione di attenzione ed altre rosse che invece richiedono un intervento immediato per comprendere la problematica e trovare la soluzione.

La tabella con le icone degli indicatori di qualità è inserita ed allineata alla base dell'asse delle frequenze in bande a 1/3 d'ottava dei grafici dello scarto tipo e dello spettro di riverbero; questo consente una facile associazione della condizione mostrata dagli indicatori di qualità con le rispettive bande in frequenza.

Nel grafico superiore di *fig. 12* sono sovrapposti a confronto gli spettri del riverbero, che consistono in una sequenza di 6 misure ripetute, rilevate su una delle singole postazioni microfoniche; il grafico di mezzo riporta il confronto verso frequenza, dello scarto tipo delle misure sullo scarto tipo atteso.

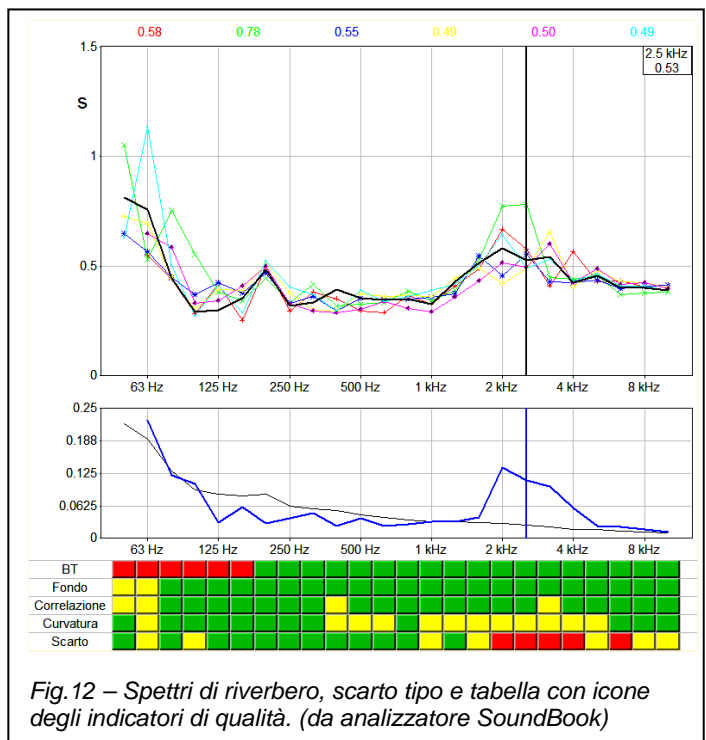


Fig. 12 – Spettri di riverbero, scarto tipo e tabella con icone degli indicatori di qualità. (da analizzatore SoundBook)

L'osservazione dell'insieme evidenzia, per l'indicatore BT (prima riga in alto), una serie di icone rosse attive per tutte le bande a frequenza inferiori ai 160 Hz che avvertono della presenza di un tempo di riverbero più basso di quello consentito dalla risposta dei filtri ad 1/3 d'ottava in relazione al prodotto $B \cdot T > 16$.

La riga dello scarto tipo mostra altre icone rosse tra 2 kHz e 4 kHz e contemporaneamente il grafico dello scarto tipo evidenzia un netto scostamento tra i valori misurati e quelli attesi che trova riscontro anche nella dispersione dei dati degli spettri del riverbero. Nelle stesse bande in frequenza troviamo che sulla riga della curvatura del decadimento alcune icone sono di colore giallo e sulla banda dei 3.15 kHz risulta gialla anche l'icona che indica un ridotto coefficiente di correlazione; questa situazione induce a visionare i decadimenti alle corrispondenti bande di frequenza poiché la difficoltà nel calcolo per la presenza di un decadimento curvo appare la causa evidenziata in modo concorde da tre diversi indicatori.

Modalità di eccitazione sonora dell'ambiente

L'incertezza nelle misure del tempo di riverberazione può essere condizionata anche dal tipo di segnale che viene utilizzato per sonorizzare l'ambiente. Tre sono le possibili modalità di eccitazione sonora: quella del rumore interrotto, la impulsiva e la scansione sinusoidale esponenziale 'Sweep-Sine' di utilizzo più recente.

Tutti gli esempi ed i grafici sin ora riportati fanno riferimento al metodo più classico di eccitazione dell'ambiente, costituito da una sorgente omnidirezionale realizzata con 12 altoparlanti a larga banda inseriti su ciascuna faccia di una cassa acustica dodecaedrica alimentata da un amplificatore di potenza; il segnale di eccitazione consiste in un rumore bianco con uno spettro sufficientemente ampio ed uniforme tale da coprire l'intera banda in frequenza di interesse, tipicamente da 50 Hz o 100 Hz sino ai 10 kHz.

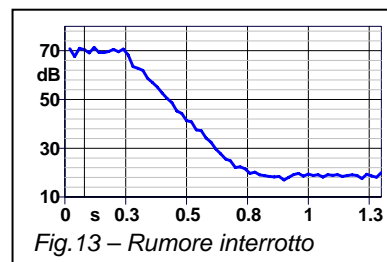


Fig. 13 - Rumore interrotto

La modalità di misura con il rumore interrotto, consiste nel fornire per qualche secondo alla sorgente omnidirezionale, il segnale amplificato di rumore bianco a banda larga, per poi interromperlo e misurare mediante un fonometro il tempo di decadimento del livello di rumore su ciascuna banda in frequenza, (fig. 13).

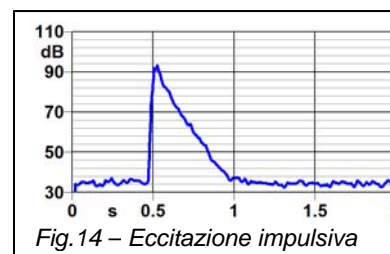


Fig. 14 - Eccitazione impulsiva

L'eccitazione con il rumore interrotto, consente di poter sonorizzare anche grandi ambienti evitando l'insorgere di fenomeni di eco, possiede un buon rapporto segnale - rumore ma richiede un amplificatore di elevata potenza che unitamente al peso della cassa acustica dodecaedrica, del treppiede e delle eventuali batterie, rendono l'insieme non agevole nel trasporto in cantiere. Data la natura casuale del segnale di rumore, il calcolo del tempo di riverbero sul decadimento del livello sonoro deve essere eseguito solo dopo un processo di media su un numero di acquisizioni adeguato (possibilmente almeno 10 misure)

Il segnale impulsivo (fig. 14), è stato introdotto con l'evento dei sistemi di analisi in frequenza in tempo reale e possiede il vantaggio di poter essere generato facilmente tramite una esplosione che può essere ottenuta con un colpo di pistola, con un grosso palloncino o da un 'clappatore'; questo genere di sorgente sonora riportato in fig. 15, risulta inoltre facilmente trasportabile e non richiede alimentazione a rete o da batterie.

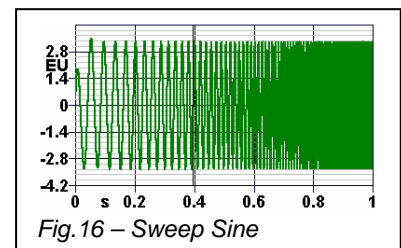


Fig. 15 - Clappatore

La natura breve del segnale impulsivo consente di distribuire l'eccitazione simultaneamente su una banda di frequenze molto estesa e di conseguenza poter analizzare il decadimento contemporaneo su tutte le

bande in frequenza. L'eccitazione impulsiva ha un basso rapporto segnale - rumore e quindi possono sorgere dei problemi in presenza di un rumore di fondo elevato oppure quando devono essere eccitati ambienti molto grandi; tuttavia il calcolo del tempo di riverbero sul decadimento di una eccitazione impulsiva, risulta molto facilitato utilizzando l'integrazione a ritroso di Schroeder e si può considerare che l'accuratezza di una singola misura eseguita con eccitazione impulsiva, sia confrontabile con quella fornita dalla media di 10 misure eseguite con il rumore interrotto.

Il segnale a scansione sinusoidale viene utilizzato dalle tecniche di analisi più recenti; richiede un sistema di elaborazione avanzato ma ottimizza le numerose criticità di questo tipo di misure. La tecnica a scansione sinusoidale 'Sweep Sine' (fig.16) offre un ottimo rapporto segnale disturbo e quindi consente non solo di poter eseguire misure in ambienti disturbati o con alto rumore di fondo ma rende possibile l'impiego di sorgenti sonore omnidirezionali a bassa potenza e quindi facilmente alimentabili a batteria ed anche facilmente trasportabili in cantiere. Il risultato della eccitazione a scansione sinusoidale logaritmica è una risposta all'impulso per cui il calcolo del tempo di riverbero sul decadimento avviene sempre mediante l'integrazione inversa di Schroeder con tutti i vantaggi già descritti a proposito dell'eccitazione impulsiva.



Per mettere in evidenza i risultati forniti dagli indicatori di qualità, utilizzando la soluzione grafica descritta in questa nota tecnica, verranno di seguito messi a confronto i risultati di tre misure di tempo di riverberazione eseguiti nella medesima posizione in un ufficio a pianta rettangolare di circa 88 m³, utilizzando le tre diverse tecniche di eccitazione sonora dell'ambiente.

Nel primo caso è stata usata la tecnica dell'eccitazione sonora tramite sorgente omnidirezionale dodecaedrica con rumore bianco interrotto; in una postazione microfonica fissa sono stati eseguiti 10 misure mediando i decadimenti come media d'insieme 'ensemble averaging'.

I risultati sono rappresentati in fig.17; gli spettri del tempo di riverbero calcolati sui singoli decadimenti sono sovrapposti nel grafico superiore mentre in quello centrale lo scarto tipo delle 10 misure è confrontato con quello normalizzato; in basso, allineata sulla scala delle frequenze è riportata la tabella con le icone di tutti gli indicatori di qualità. Le dimensioni del locale ed il particolare l'arredamento con librerie a parete determinano tempi di riverbero brevi a bassa frequenza con conseguente allerta dell'indicatore del prodotto BT>16 per tutte le bande inferiori ai 200 Hz. Il confronto con la curva dello scarto tipo normalizzato evidenzia per alcune bande in frequenza una dispersione dei risultati un po' superiore a quella attesa soprattutto a 315 Hz; osservando nel grafico degli spettri del riverbero i singoli dati a 315

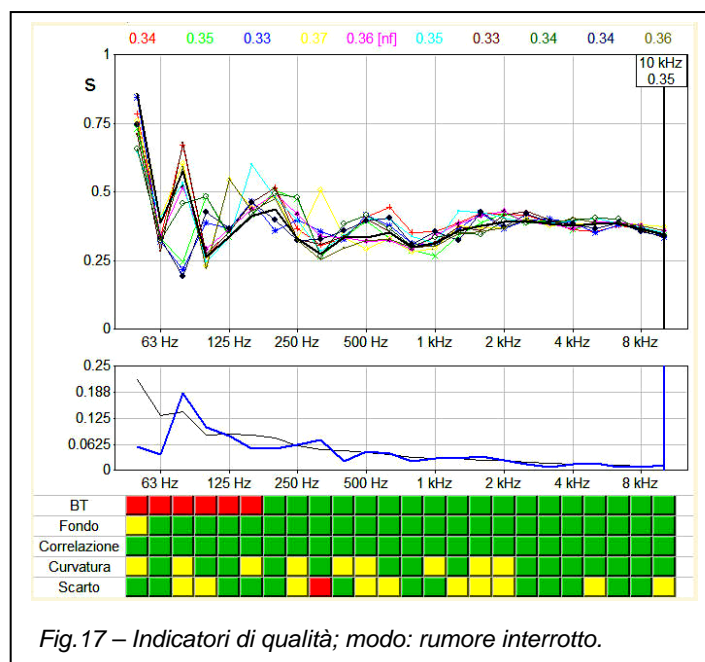


Fig.17 - Indicatori di qualità; modo: rumore interrotto.

Hz si nota la traccia in giallo della quarta misura che si scosta nettamente rispetto all'insieme di tutte le altre 9; questo riscontro richiederebbe un esame più attento sul decadimento della misura indicata che operativamente può essere attivata dall'operatore con un doppio click su tale banda in frequenza.

La riga del coefficiente di correlazione sui minimi quadrati della retta di regressione, risulta tutta con icone verdi confermando che la media su 10 misure garantisce una buona accuratezza nel calcolo del decadimento sulle singole bande.

Anche la riga del rumore di fondo da riscontro della disponibilità di una buona dinamica di calcolo per tutte le bande di frequenza ad eccezione di quella a 50 Hz.

Le icone che indicano la presenza di curvatura nei decadimenti richiedono sempre un esame più accurato per verificare se si tratta effettivamente di una curvatura o di una errata determinazione del punto di inizio della gamma di calcolo.

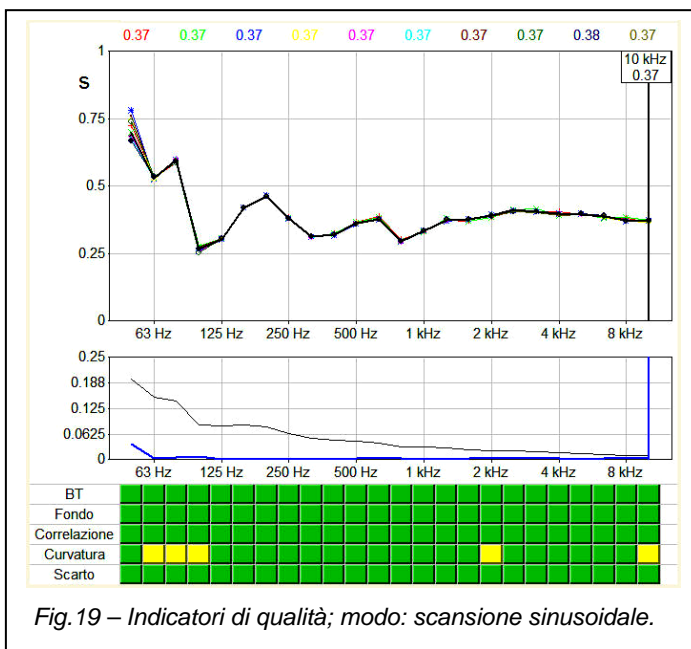
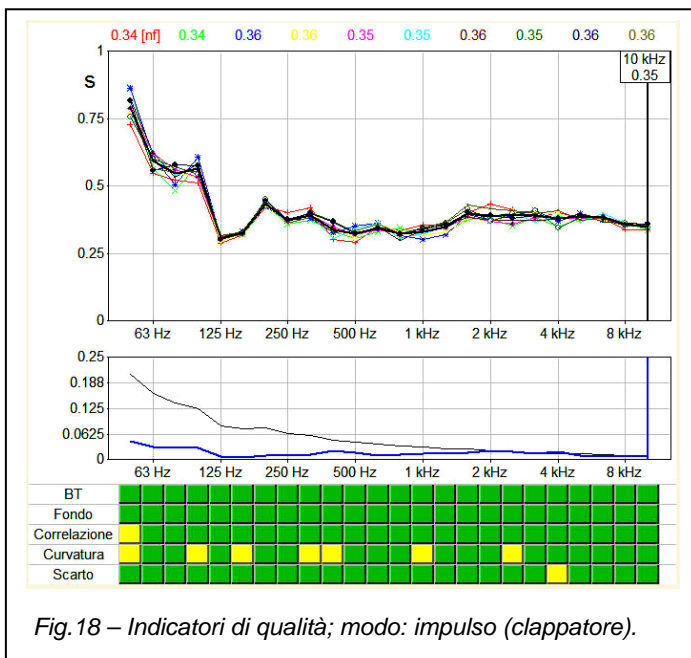
Il secondo caso riporta il risultato di una eccitazione ottenuta con una sequenza di 10 impulsi generati con una sorgente sonora inusuale chiamata 'Clappatore' e realizzata con due tavole di legno incernierate da un lato in modo da poterle sbattere aprendole e chiudendole con violenza usando due maniglie opportunamente fissate sul lato esterno di ognuna delle due tavole. La parte superiore delle due tavole è traforata e chiusa con della gomma in modo da poter creare una cavità con un volume adeguato per poter ottenere durante l'impatto anche una eccitazione estesa sulle frequenze basse fino almeno a 100 Hz.

Il risultato delle 10 misure viene mostrato in *fig.18* con la medesima modalità grafica dell'esempio precedente per poter consentire un confronto diretto.

Risulta subito evidente che non ci sono più icone di colore rosso e che lo scarto tipo risulta molto inferiore alla curva di confronto normalizzata. Sulla riga delle icone del prodotto BT non è più visibile alcuna icona rossa; la condizione che deve essere ora soddisfatta è di $BT > 4$ e non più di $BT > 16$ poiché con l'eccitazione impulsiva, viene utilizzata la tecnica 'Reverse Filter' che consente di ottenere una risposta dei filtri più veloce e di conseguenza di poter analizzare con la medesima accuratezza tempi di riverbero da 4 a 5 volte più brevi della tecnica tradizionale (le misure sono state eseguite con l'analizzatore SoundBook). Rimane solo qualche icona gialla sulla riga 'curvatura' di avviso presenza di curvatura sul decadimento.

I risultati ottenuti con la terza modalità di misura sono riportati in *fig.19* e sono stati ottenuti con eccitazione a scansione sinusoidale logaritmica 'Sine Sweep' fornita all'ambiente mediante la solita sorgente omnidirezionale ma pilotata con un livello di potenza sonora 30 dB inferiore a quello utilizzato per il rumore interrotto.

Per poter confrontare i tre diversi metodi sono stati fatti anche in questo caso 10 misure nella stessa posizione di misura anche se con questo metodo il vantaggio principale consiste proprio nel non dover



mediare più misure in quanto il risultato è deterministico e quindi con misure successive tutte identiche le une alle altre.

A conferma di quanto riportato possiamo osservare il grafico dove sono sovrapposti i 10 spettri di riverberazione che in questo caso sembrano proprio identici e sovrapposti, con uno scarto tipo su valori bassissimi.

Un colpo d'occhio alla tabella degli indicatori di qualità da la conferma del buon risultato, visualizzato dal colore verde per la quasi totalità delle icone; solo alcune icone gialle indicano qualche possibile interferenza con la curvatura nel decadimento; unitamente alla tecnica della sine sweep viene implementata anche l'analisi per la risposta veloce dei filtri 'Reverse Filter' per cui l'indicatore BT chiede un prodotto superiore a 4 e non 16, indice della capacità di una misura accurata anche su tempi di riverbero molto brevi (es.:0.18 secondi sul 1/3 d'ottava dei 100 Hz).

A conferma delle informazioni fornite dagli indicatori di qualità in relazione alle tre diverse modalità di eccitazione dell'ambiente riportiamo il confronto dei risultati ottenuto sovrapponendo i corrispondenti spettri dei tempi di riverberazione. In *fig.20* i valori dei tempi di riverbero delle tre misure, mostrano una buona accuratezza per tutte le frequenze superiori ai 125 Hz, mentre per le frequenze inferiori si osservano valori discordanti come era ben evidenziato dagli indicatori di qualità.

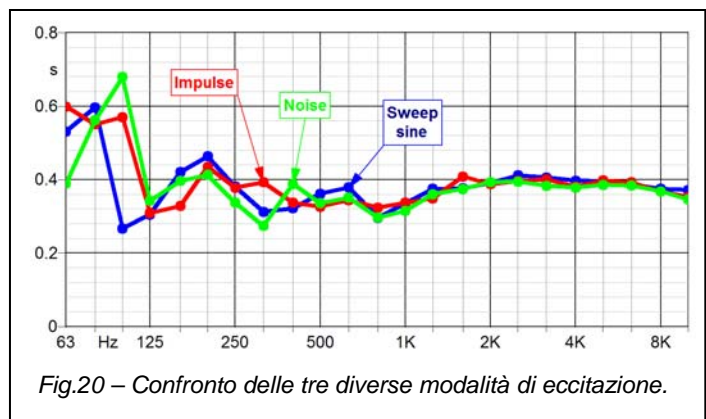


Fig.20 – Confronto delle tre diverse modalità di eccitazione.

E' opportuno considerare che questo confronto è stato eseguito per mostrare i risultati in

relazione a tre tipi diversi di eccitazione sonora eseguiti su una singola postazione microfónica fissa; in linea teorica e per un campo diffuso, in queste condizioni ci si aspetta una risposta del locale costante e ripetibile oltre che insensibile ad un diverso posizionamento della sorgente.

Ancora più complessa è la situazione che ci si può attendere quando le misure sono distribuite nell'ambiente su più postazioni microfónicas in quanto la risposta del locale interviene con modalità diverse sulle singole posizioni di misura, rendendo in questo caso ancor più importanti le informazioni che vengono evidenziate dagli indicatori di qualità.

Risposta integrata all'impulso

Grazie allo studio di Schroeder che fin dal lontano 1965 ha dimostrato il legame diretto tra il decadimento del segnale riverberato con l'integrazione retrograda (inversa) della risposta all'impulso, la tecnica di analisi definita come 'risposta integrata all'impulso', trova sempre più consensi per la maggior semplicità e velocità di esecuzione a parità di accuratezza nella riproducibilità e ripetibilità delle misure.

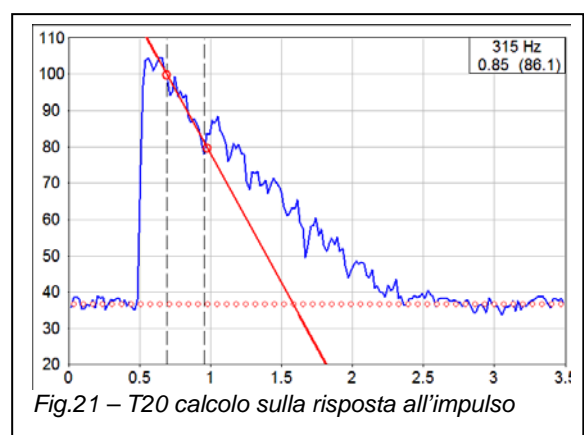


Fig.21 – T20 calcolo sulla risposta all'impulso

E' opportuno quindi soffermarsi su questa modalità di misura per evidenziarne ulteriormente le specificità.

A tale proposito consideriamo il decadimento corrispondente alla risposta all'impulso rilevata in un ambiente domestico tradizionale di medie dimensioni e con pianta rettangolare; alla frequenza del 1/3

d'ottava dei 315 Hz i modi di risposta del locale interagiscono determinando anche dopo una media sincronizzata di 6 successive acquisizioni, un decadimento con elevate fluttuazioni osservabili in *fig.21*.

Determinare il tempo di riverberazione utilizzando lo stesso criterio impiegato per il calcolo con il metodo del rumore interrotto ovvero quello della retta di decadimento usando una regressione lineare ai minimi quadrati, pone i soliti problemi di come individuare i punti di inizio e di fine della gamma di calcolo. Nel decadimento di *fig.21* il sistema automatico ha cercato di individuare i punti a -5 dB e quello a -25 dB per la determinazione del 'T20' ma viene ingannato dalla profonda valle presente nel livello del segnale, proprio nelle vicinanze del punto a -25 dB. Il tempo di riverbero calcolato in queste condizioni risulta pari a 0.85 secondi con un coefficiente di correlazione dell' 86.1%; tre icone degli indici di qualità danno un allerta per quanto riguarda la curvatura, per il coefficiente di correlazione, troppo basso e con una icona rossa per lo scarto tipo ad indicare l'elevata dispersione dei risultati prodotti dalla 6 singole misure utilizzate nella media sincronizzata 'ensemble averaging'.

Sul decadimento della stessa misura è stato ricalcolato il tempo di riverberazione utilizzando il metodo proposto da Schroeder ovvero quello dell'integrazione retrograda;

il risultato è graficamente riportato in *fig.22* dove si osserva chiaramente la traccia in rosso corrispondente al processo di integrazione inversa, che inizia partendo dalla coda del decadimento sonoro e quindi procede nel grafico da destra verso sinistra. In realtà, per non sciupare la dinamica di calcolo, il processo di integrazione inizia quando retrocedendo, la coda del decadimento comincia ad sollevarsi dal rumore di fondo; nel grafico, la linea a pallini indica il livello medio del rumore di fondo pari circa a 37 dB ed il punto in cui viene individuato l'inizio del processo di integrazione si posiziona a 2.2 secondi sull'asse del tempo. L'integrazione a ritroso dei singoli campioni, produce una curva in salita che segue la curva originale mantenendo la medesima pendenza caratteristica ma con un livellamento di tutte le fluttuazioni del livello presenti nella misura originale. Individuare i punti a -5 dB ed a -25 dB per il calcolo del valore di riverberazione 'T20' ed interpolare i valori integrati con la retta di regressione, risulta ora una operazione che garantisce una elevata accuratezza e ripetibilità dei risultati. Il valore del tempo di riverbero 'T20' indicato è di 1.61 secondi con un coefficiente di correlazione del 97.6% e corrisponde al doppio del valore di riverbero calcolato in precedenza senza l'integrazione retrograda che era di 0.85 s. Tutte le icone degli indici di qualità sono ora di colore verde a conferma della bontà del risultato raggiunto.

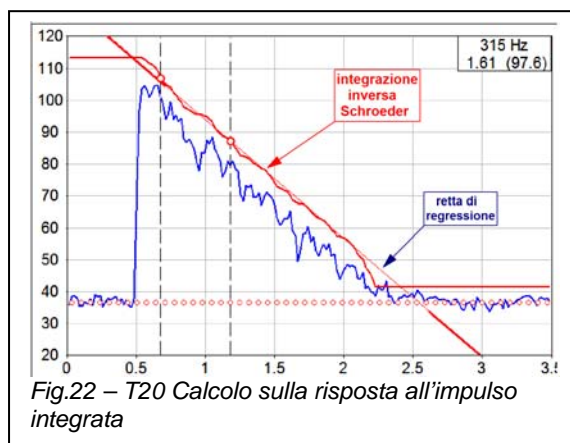


Fig.22 – T20 Calcolo sulla risposta all'impulso integrata

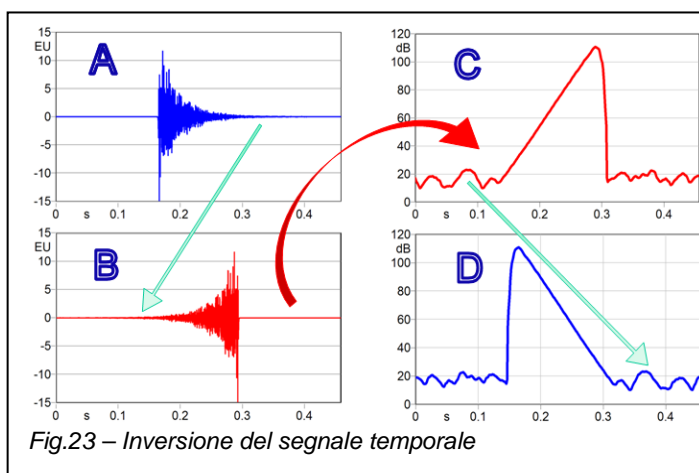
Nota: *Retrogrado*: termine che abbiamo associato al tipo di integrazione di Schroeder per meglio indicare la sua caratterizzazione al pari della definizione in inglese di 'backward'. Dicasi 'retrogrado' (moto retrogrado) il movimento che possiede un corpo celeste quando si muove nel verso opposto, contrario quindi a quello normalmente atteso.

Uso della risposta inversa dei filtri

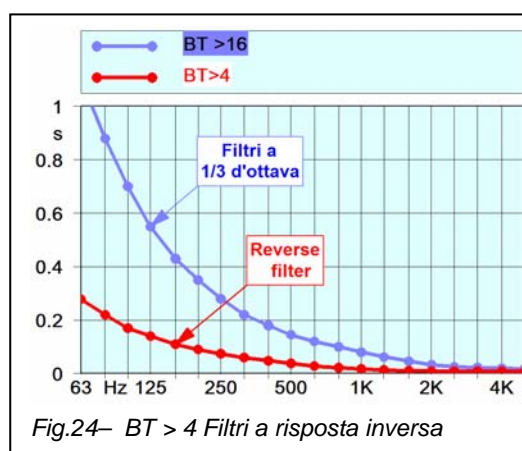
Come riportato in precedenza, la risposta dei filtri ad 1/1 e 1/3 d'ottava introduce un ritardo che per le basse frequenze potrebbe tendere ad aumentare la risposta effettiva del tempo di riverberazione.

Una tecnica utilizzata per ridurre l'interferenza di questo problema consiste nell'utilizzare la risposta inversa dei filtri di analisi; con questa soluzione usando la tecnica impulsiva o quella 'Sweep-Sine', possiamo, come accennato in precedenza, ridurre l'indicatore di qualità specifico da un prodotto di $B \cdot T > 16$ ad un $B \cdot T > 4$ con possibilità di misurare, a parità di condizioni, tempi di riverberazione 4 volte inferiori.

Con l'impiego dei sistemi di analisi digitali che consentono la memorizzazione del segnale audio, risulta agevole implementare la soluzione descritta infatti è sufficiente memorizzare la forma d'onda della risposta al segnale di eccitazione impulsivo e prima di inviarla al sistema di analisi la si inverte ovvero il segnale viene riletto iniziando dalla sua coda. In *fig.23* viene rappresentata la sequenza del processo di inversione del segnale ed analisi; il segnale di risposta all'impulso 'A' viene invertito lungo l'asse del tempo 'B'; con queste nuove sembianze il segnale viene inviato al sistema di analisi la cui risposta banda per banda, può essere descritta nei termini di 'time history', come riportato in 'C'. La soluzione di analizzare il segnale impulsivo ad iniziare dalla sua coda, determina una risposta pronta del filtro sulla parte del decadimento che sarà poi quella interessata dal calcolo del tempo di riverbero, mentre il ritardo di risposta del filtro interferirà solo sull'attacco dell'impulso che ora giunge al termine del segnale. Per ristabilire la scala del tempo originale e ritornare ad una rappresentazione grafica tradizionale, il profilo temporale viene di nuovo invertito lungo il suo asse del tempo 'D'.



Il grafico riportato in *fig.24* mostra il miglioramento conseguente all'impiego del modo di analisi con la risposta inversa dei filtri, validato dal prodotto larghezza di banda di analisi per tempo di riverberazione misurato; il prodotto $B \cdot T > 16$ normalmente richiesto per le analisi in bande di 1/3 d'ottava viene ridotto con questa tecnica di 4 volte. Riprendendo l'esempio già riportato e considerando la banda del 1/3 d'ottava dei 100 Hz che ha una larghezza di 23 Hz, per soddisfare la relazione $BT > 16$ il tempo di riverberazione misurato dovrà essere maggiore di 0.70 s, mentre con il metodo di risposta inversa dei filtri e quindi un $BT > 4$ sarà possibile misurare un tempo di riverbero corto sino a 0.18 s.



Conclusioni

La nota tecnica vuole mettere in evidenza come lo strumento grafico unito ad una intelligente organizzazione del software di supporto consente di evidenziare quando le condizioni di contorno di una misura o degli algoritmi impiegati per il calcolo non rientrano nei limiti di accettabilità.

Tale soluzione si è dimostrata molto efficace nell'utilizzo pratico in campo consentendo di ottenere sicurezza sull'affidabilità e ripetibilità dei dati ed evitando il rischio di dover ritornare in cantiere per una ulteriore acquisizione di misure o per la verifica di alcune di queste.

La modalità descritta risulta inoltre l'unico metodo per poter documentare l'accuratezza raggiunta nella misura del tempo di riverberazione.



Considerando queste prerogative unite alla disponibilità di nuove soluzioni di PC notebook superportatili, economici e di lunga autonomia a batterie, sono state implementate funzioni di supporto software per estendere queste capacità anche ai normali fonometri tipo il Larson Davis LD 831 e LxT.

In *fig.26* viene riportato un esempio di misura di riverberazione acquisita direttamente in cantiere, tramite un UMPC interfacciato direttamente ad un fonometro LD-831 e controllato via interfaccia USB dal software 'Noise & Vibration Works'; nella schermata è possibile osservare le molte analogie con le modalità di visualizzazione degli indicatori di qualità descritti in precedenza. Utilizzare un PC in unione ad un fonometro quando si eseguono misure in cantiere, potrebbe risultare poco pratico ma se consideriamo con attenzione quanto è stato descritto in questa nota tecnica, tale soluzione si dimostra sicuramente come l'unica capace di garantire accuratezza e ripetibilità per le misure di tempo di riverberazione.

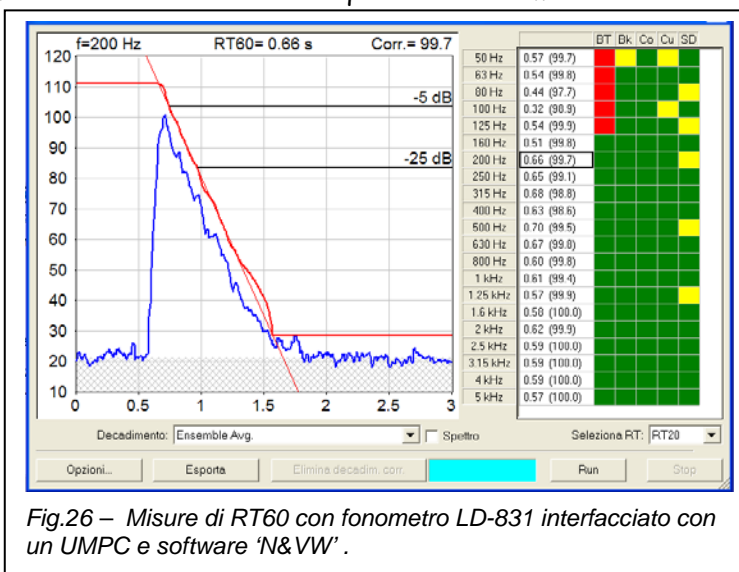


Fig.26 – Misure di RT60 con fonometro LD-831 interfacciato con un UMPC e software 'N&VW'.