

MISURE DELL'ISOLAMENTO AL RUMORE AEREO, DEL RUMORE DI CALPESTIO E DEL TEMPO DI RIVERBERAZIONE

Angelo Farina (1), Patrizio Fausti (2)

(1) Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Parma

(2) Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara

1. Premessa

Il rispetto delle condizioni di benessere acustico negli ambienti di vita e di lavoro è sempre più richiesto come requisito essenziale degli edifici. Un ambiente può essere considerato soddisfacente ai fini dell'ottenimento del comfort acustico quando il rumore a cui sono sottoposti gli occupanti è tale da non nuocere alla salute e consentire adeguate condizioni per il riposo e il lavoro.

Convenzionalmente si distinguono due modalità di propagazione della energia sonora in relazione alla via di propagazione:

1) per via aerea, nel caso in cui le onde sonore, direttamente o attraverso pareti divisorie, si trasmettono dalla sorgente all'ascoltatore;

2) per via strutturale, nel caso in cui le onde sonore che raggiungono l'ascoltatore, sono generate da urti e vibrazioni prodotte sulle strutture dell'edificio in cui si trova l'ambiente disturbato.

I parametri da misurare per qualificare acusticamente gli elementi edilizi o gli ambienti sono diversi in relazione a queste diverse modalità di propagazione della energia sonora. In questa dispensa si considerano essenzialmente l'isolamento al rumore aereo, il livello di rumore di calpestio e il tempo di riverberazione.

2. Misura dell'isolamento al rumore aereo

2.1 Misure in laboratorio ed in opera

Quando si parla di misure di isolamento al rumore aereo si deve distinguere tra misure in laboratorio e misure in opera. In laboratorio viene eseguita la misura del "potere fonoisolante" del divisorio, in assenza di trasmissioni laterali.

Il potere fonoisolante "R" della parete è definito dalla seguente relazione:

$$R = 10 \cdot \log \frac{1}{t} \quad (\text{dB}) \quad (2.1)$$

dove t è il coefficiente di trasmissione, dato dal rapporto tra la potenza trasmessa e la potenza incidente. Il valore del potere fonoisolante varia con la frequenza e la direzione di provenienza del suono oltre che con le proprietà geometriche e fisiche della parete.

La determinazione sperimentale di R in campo acustico diffuso viene effettuata in laboratorio secondo il procedimento prescritto dalla Norma EN 20140 parte 3 [1]. La figura 1 rappresenta schematicamente le due camere di prova. Per ogni banda di frequenza, noti i livelli di pressione sonora medi nell'ambiente disturbante L_1 e nell'ambiente ricevente L_2 , il potere fonoisolante R della parete in prova si ottiene dalla espressione:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log \frac{S}{A} \quad (\text{dB}) \quad (2.2)$$

in cui S è la superficie del divisorio ed A è l'area equivalente di assorbimento acustico dell'ambiente ricevente (m^2).

Il valore di R , e quindi del coefficiente di trasmissione della parete " t ", descrive il comportamento acustico della parete stessa presa come elemento singolo: il suo valore infatti può essere misurato solamente in laboratorio operando sotto condizioni particolari e severamente controllate dove in pratica si è cercato di escludere ogni altra propagazione di energia sonora che non sia quella che direttamente attraversa la parete in prova.

Nella figura 2 sono schematizzate le possibili vie di propagazione del suono dall'ambiente disturbante all'ambiente ricevente.

Nelle applicazioni pratiche quello che interessa è la risposta d'insieme dell'opera costruita tenuto conto delle varie modalità di realizzazione. La grandezza che in questo caso descrive il comportamento acustico di una parete divisoria è l'isolamento acustico D , definito dalla relazione seguente:

$$D = L_1 - L_2 \quad (\text{dB}) \quad (2.3)$$

dove L_1 e L_2 sono i livelli di pressione sonora negli ambienti trasmittente (dove è collocata la sorgente) e ricevente (dove si trova l'ascoltatore). Il valore di D viene misurato sperimentalmente in opera secondo la norma EN 20140 parte 4 [2].

Poiché l'assorbimento acustico dell'ambiente ricevente influenza il livello sonoro L_2 , la norma prevede che il valore dell'isolamento acustico venga corretto secondo la relazione:

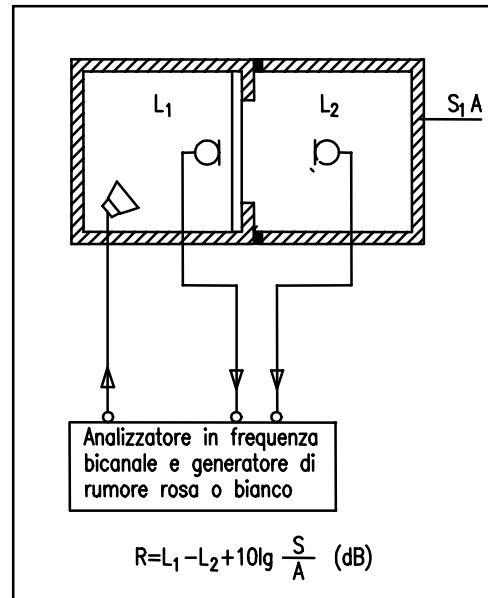


Figura 2.1: schema di misura del potere fonoisolante in laboratorio

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log \frac{T}{0.5} \quad (\text{dB}) \quad (2.4)$$

dove D_{nT} è detto isolamento acustico standardizzato, T è il tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente (s) e 0.5 s un valore di riferimento.

Nella norma è prevista anche la misura dell'isolamento acustico normalizzato D_n , definito dalla relazione:

$$D_n = L_1 - L_2 - 10 \cdot \log \frac{A}{A_0} \quad (\text{dB}) \quad (2.5)$$

dove A è l'area equivalente di assorbimento acustico dell'ambiente ricevente (m^2) e A_0 l'area equivalente di assorbimento acustico di riferimento, pari a 10 m^2 .

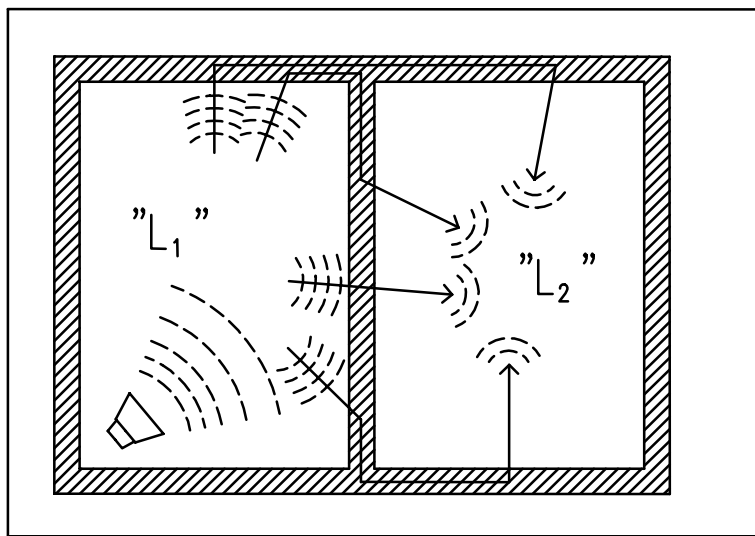


Figura 2.2: possibili vie di propagazione del suono dall'ambiente disturbante all'ambiente ricevente

2.2 Indice di valutazione

Come è già stato ricordato, tutte le misure descritte forniscono risultati espressi in forma di grafico che riporta la grandezza in funzione delle frequenze di banda di 1/3 di ottava, normalmente nel campo compreso tra 100 e 5000 Hz.

Questa rappresentazione è la più completa ed è quella che viene utilizzata per una descrizione dettagliata del comportamento acustico del campione in prova. Tuttavia per una valutazione globale di tale comportamento, si utilizza a volte un unico parametro denominato indice di valutazione impiegato per classificare le curve del potere fonoisolante R_w , dell'isolamento acustico D_{nw} ed anche del livello di calpestio L_{nw} che esamineremo nei paragrafi successivi. Il metodo per determinare il valore dell'indice di valutazione è riportato nella Norma UNI 8270/7 (conforme alla ISO 717/1-2-3) [3].

Come si vede in figura 3, il valore dell'indice di valutazione è ottenuto sovrapponendo alla curva sperimentale di R , D_n o D_{nT} , la curva di riferimento indicata in figura in modo tale che la somma degli scostamenti sfavorevoli della curva sperimentale rispetto a quella di riferimento, diviso il numero totale delle bande di frequenza, sia inferiore o

uguale a 2 dB. Il valore della curva di riferimento a 500 Hz rappresenta l'indice di valutazione della curva sperimentale.

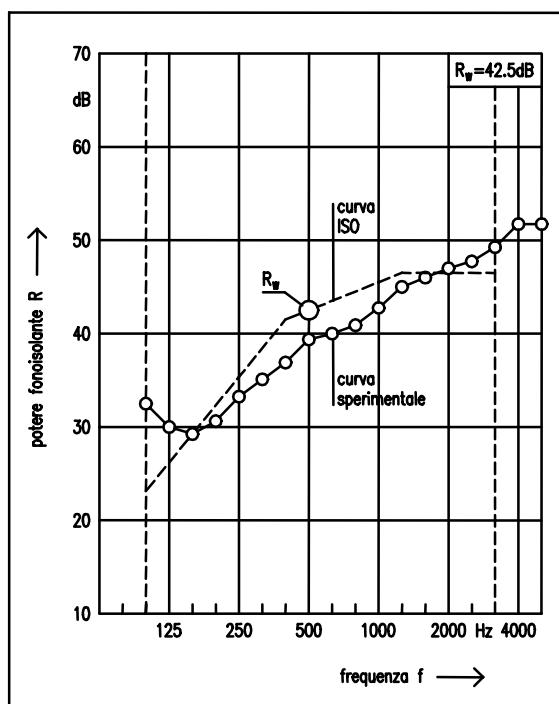


Figura 2.3: determinazione dell'indice di valutazione

2.3 Norma EN 20140 parte 3. Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements (Misura dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Misura in laboratorio del potere fonoisolante di elementi di edifici)

La norma è in corso di pubblicazione e sostituisce la ISO 140/3 (1978) e la corrispondente UNI 8270 Parte 3, pubblicata nel settembre 1984.

La norma stabilisce un metodo per la misura in laboratorio del potere fonoisolante di elementi di edificio come pareti, pavimentazioni, serramenti, facciate, ad eccezione degli elementi classificabili di piccole dimensioni per i quali è previsto un apposito metodo di misura nella norma ISO 140/10. I risultati ottenuti possono essere utilizzati per la progettazione e/o la classificazione di tali elementi.

La norma definisce innanzitutto alcune grandezze fondamentali quali il livello medio di pressione sonora, il potere fonoisolante, il potere fonoisolante apparente.

Il potere fonoisolante di un divisorio è definito nel seguente modo:

$$R = 10 \log \frac{W_1}{W_2} \quad (2.6)$$

dove W_1 ($W_1 = p_1^2 S / 4 \rho c$) è la potenza incidente nel campione e W_2 ($W_2 = p_2^2 S / 4 \rho c$) è la potenza trasmessa attraverso il campione di misura.

Viene definito anche il potere fonoisolante apparente, nel quale si considera la potenza sonora totale, (comprese le trasmissioni laterali) trasmessa nell'ambiente di ricezione.

Si specificano poi le caratteristiche degli elementi di prova, che devono essere il più possibile conformi alla situazione reale di vincolo e di montaggio.

Le trasmissioni indirette di energia sonora vengono individuate e stimate tramite la misura di R'_{max} .

Le misure devono essere effettuate usando una sorgente sonora stabile con spettro continuo. E' consigliato l'uso dello spettro di rumore bianco. Nell'appendice C della norma vengono fornite le direttive per la qualificazione e il posizionamento della sorgente sonora.

I microfoni di misura devono essere di classe 0 o 1 conformemente alle norme IEC 651 e IEC 804. L'apparato di misura deve essere calibrato conformemente alla norma IEC 942.

L'analisi in frequenza deve essere effettuata con filtri di banda di 1/3 di ottava conformemente alla norma IEC 225. La gamma di frequenze deve come minimo andare da 100 Hz a 5000 Hz. Se sono necessarie informazioni anche a bassa frequenza si possono rilevare anche le bande di 1/3 di ottava di 50, 63 e 80 Hz. Nell'appendice F sono riportate le linee guida per le misure a bassa frequenza.

Il laboratorio di misura deve essere conforme alla norma ISO 140/1.

La norma riporta anche le prescrizioni per il rumore di fondo e per la correzione delle misure quando questo non risulta inferiore a 15 dB per ogni banda di frequenze.

Il metodo di misura utilizzato nel laboratorio deve rispettare le condizioni di ripetibilità in accordo con la norma UNI EN 20140/2. Tale procedimento deve essere periodicamente controllato e verificato.

La norma riporta anche le direttive per il corretto montaggio dei campioni di misura comprese porte, finestre vetri ed elementi di facciata. Nell'appendice B vi sono delle specifiche riguardanti la misura del potere fonoisolante dei muri di contenimento di porte, finestre, vetri ed elementi di facciata.

Nell'appendice D sono riportati dei metodi per la misura delle trasmissioni laterali.

Nell'appendice E, infine, viene spiegato quando e perché controllare il fattore di perdita di un divisorio.

2.4 Norma EN 20140 parte 4. Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms (Misura dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Misura in opera dell'isolamento acustico per via aerea tra ambienti interni)

La norma è in corso di pubblicazione e sostituisce la ISO 140/4 (1978), e la corrispondente UNI 8270 parte 4, pubblicata nel 1986.

Lo scopo della norma è di stabilire procedure di prova in opera dell'isolamento acustico al rumore aereo di divisori interni, siano essi pareti o solai, di verificare il

conseguimento delle condizioni di protezione desiderate e di individuare eventuali difetti di costruzione.

I risultati ottenuti non possono essere utilizzati per la determinazione del potere fonoisolante di componenti edilizi, al cui fine sono applicabili le norme di laboratorio.

La norma fornisce alcune definizioni che mettono in evidenza le differenze con la rispettiva norma per le misure in laboratorio. Vengono definiti un isolamento acustico D (level difference), un isolamento acustico normalizzato D_n (normalized level difference) e un isolamento acustico standardizzato D_{nT} (standardized level difference). L'isolamento acustico D è espresso da:

$$D = L_1 - L_2 \quad (2.7)$$

dove L_1 ed L_2 sono i livelli medi di pressione sonora misurati nell'ambiente sorgente e in quello ricevente, ottenuti in base alla relazione:

$$L = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \text{ dB} \quad (2.8)$$

dove L è il livello medio di pressione sonora in un ambiente e L_i sono i livelli medi di pressione sonora misurati in più posizioni.

Anche per le misure in opera viene fornito il potere fonoisolante apparente che prende in considerazione tutta la potenza sonora che arriva nell'ambiente ricevente, non solo quella che attraversa il campione di misura. Il potere fonoisolante apparente viene definito con la seguente espressione:

$$R' = 10 \log W_1 / (W_2 + W_3) \quad (2.9)$$

nella quale W_2 rappresenta la potenza sonora che attraversa il campione e W_3 rappresenta tutti gli altri contributi di potenza sonora che arrivano nell'ambiente ricevente per trasmissioni di fiancheggiamento.

Per quanto riguarda la strumentazione di misura la norma fornisce le stesse prescrizioni della EN 20140/3. Nelle misure in opera la gamma di frequenze minima da misurare va da 100 a 3150 Hz. Viene comunque consigliata la misura anche alle frequenze più alte fino a 5000 Hz e, in caso di richiesta di maggiori informazioni a bassa frequenza, anche alle bande di 50, 63 e 80 Hz.

Nell'appendice A della norma vengono riportate le direttive per la qualificazione e il posizionamento della sorgente.

Nell'appendice B vengono riportate le procedure per la misura dell'isolamento acustico in bande di ottava, anziché in terzi di ottava. A tale scopo la gamma di frequenze considerata va da 125 Hz a 2000 Hz, anche se anche per le ottave si consigliano le misure alla banda di 4000 Hz per le alte frequenze e alla banda di 63 Hz per le basse frequenze.

Nell'appendice C viene riportata la procedura per la misura della trasmissione laterale, che nelle misure in opera può assumere una importanza fondamentale.

3. Misura del rumore di calpestio

3.1 Il livello di rumore di calpestio

Per rumori impattivi si intendono quelli causati dalla caduta di oggetti sul pavimento o dai passi delle persone. Si tratta di rumori trasmessi essenzialmente per via strutturale e interessano il complesso pavimento-solaio. Il requisito acustico che caratterizza il comportamento di questi componenti edilizi nei confronti dei rumori impattivi è il *livello normalizzato di rumore di calpestio* (L_n).

La prestazione viene valutata attraverso la misura del livello di pressione sonora nell'ambiente sottostante quando sul pavimento agisce una macchina normalizzata generatrice di rumori impattivi.

Come per l'isolamento ai rumori aerei anche per il calpestio sono previste misure in laboratorio ed in opera. Le prime sono descritte nella EN 20140 parte 6 [4], le seconde nella EN 20140 parte 7 [5]. La figura 4 riporta la disposizione tipica delle apparecchiature di misura.

Le misure in laboratorio prevedono due tipi di prove: una per il solaio completo (EN 20140/6) ed una per i rivestimenti di pavimento da allestire su solaio standard (UNI 8270/8 e ISO 140/VIII [6]).

Nel primo caso viene rilevato il valore del livello di rumore di calpestio normalizzato L_n definito dalla relazione:

$$L_n = L + 10 \lg A/A_0 \quad (\text{dB}) \quad (3.1)$$

dove L è il valore medio della pressione sonora misurato nell'ambiente ricevente quando sul pavimento in prova è in funzione il generatore, A l'area equivalente di assorbimento acustico dello stesso ambiente e A_0 l'area equivalente di assorbimento acustico di riferimento, pari a 10 m^2 .

Per quanto riguarda i rivestimenti di pavimento, la grandezza che descrive il loro comportamento acustico è l'*attenuazione del rumore di calpestio* (DL) (dB):

$$DL = L_{no} - L_n \quad (\text{dB}) \quad (3.2)$$

dove L_{no} è il livello di rumore di calpestio normalizzato che si misura quando il generatore è in funzione sul solaio normalizzato. La norma UNI 8270/8 [8] prescrive le modalità di prova in laboratorio.

Le misure in opera (EN 20140 parte 7) vengono eseguite in edifici finiti e riguardano l'intero solaio. La procedura di misura è analoga a quella adottata in laboratorio e fornisce il valore del livello di calpestio normalizzato L_n o il livello di calpestio standardizzato L_{nT} .

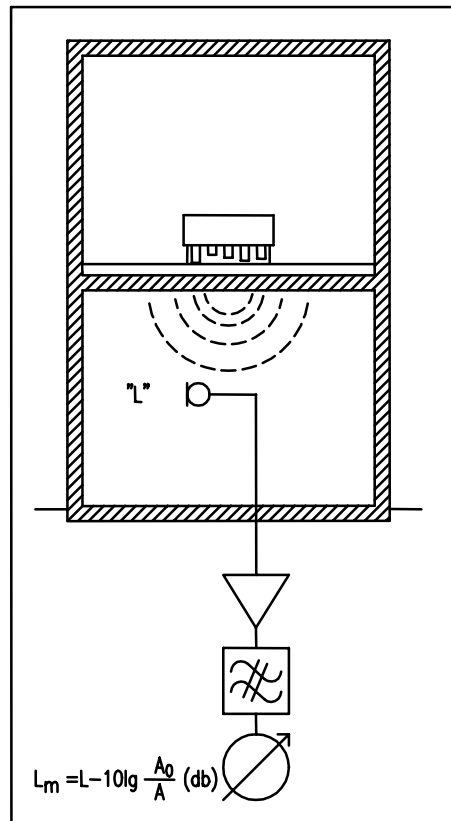


Figura 3.1: schema di misura del livello normalizzato di rumore di calpestio

Il livello di rumore di calpestio L_n (normalized impact sound pressure level) è calcolato nel seguente modo:

$$L_n = L_i + 10 \log A/A_0 \quad \text{dB} \quad (3.3)$$

dove L_i è il livello medio di rumore misurato in più punti dell'ambiente ricevente quando nell'ambiente sovrastante è in funzione la macchina normalizzata di rumore di calpestio, A è l'aria equivalente di assorbimento acustico della camera ricevente ed A_0 è l'area equivalente di riferimento.

Il livello di calpestio L_{nT} (standardized impact sound pressure level) è calcolato nel seguente modo:

$$L_{nT} = L_i + 10 \log T/T_0 \quad \text{dB} \quad (3.4)$$

dove T è il tempo di riverberazione nell'ambiente ricevente e T_0 è il tempo di riverberazione di riferimento pari a 0.5 s.

3.2 Indice di valutazione del livello di calpestio (L_{nw})

Come è già stato ricordato la grandezza che descrive, in forma sintetica, il comportamento acustico del campione, è l'indice di valutazione del livello di calpestio L_{nw} (dB). Tale valore si ottiene sovrapponendo alla curva sperimentale L_n , la curva di riferimento indicata in figura 17, in modo che il valore medio degli scostamenti svavorevoli della curva sperimentale rispetto a quella di riferimento sia inferiore a 2 dB. Il valore della curva di riferimento a 500 Hz rappresenta l'indice di valutazione del livello di calpestio.

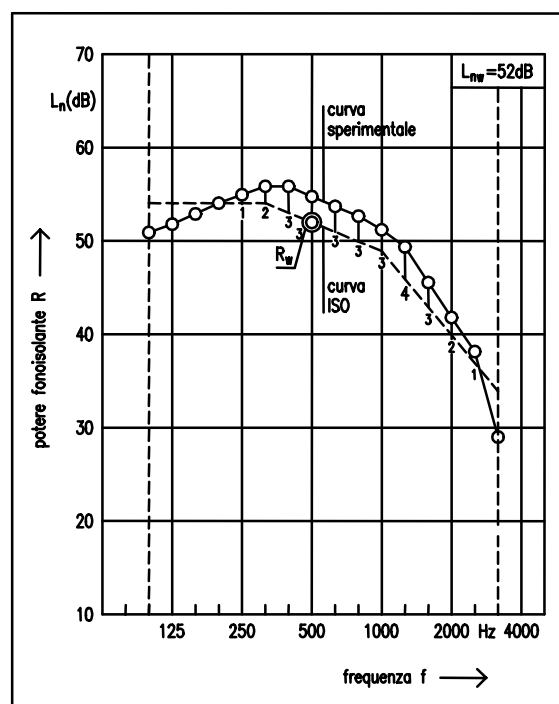


Figura 3.2: determinazione dell'indice di valutazione del livello normalizzato del rumore di calpestio

Norma EN 20140 parte 6. Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 6: Laboratory measurements of impact sound insulation of floors (Misura dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Misura in laboratorio dell'isolamento dai rumori di calpestio di solai)

La norma è in corso di pubblicazione e sostituisce la ISO140/6 (1978) e la corrispondente UNI 8270 che ne aveva pubblicato copia integrale nel 1988.

Lo scopo di tale norma è stabilire un metodo di misura in laboratorio della trasmissione del rumore di calpestio attraverso i solai usando un generatore normalizzato di calpestio. I risultati ottenuti possono essere usati per confrontare le proprietà isolanti dei solai e per classificarli in base ad esse.

La norma definisce, tra l'altro, il livello di pressione sonora di calpestio L_i (impact sound pressure level) e il livello normalizzato di rumore di calpestio L_n (normalized impact sound pressure level).

Nell'appendice A vengono fornite le prescrizioni per la "sorgente normalizzata di calpestio", che è l'unica sorgente ammessa per tale tipo di misure. Il generatore di calpestio deve essere posizionato in almeno quattro punti differenti con la linea congiungente i martelli orientata a 45° rispetto all'asse delle travi, con una distanza minima dai bordi del pavimento di almeno 0.5 m. Se il pavimento è soffice bisogna usare dei supporti che garantiscano una altezza di caduta dei martelli di 40 mm.

Le apparecchiature di misura del livello sonoro devono soddisfare gli stessi requisiti previsti per le altre norme. La gamma di frequenze di misura per terzi di ottava va da 100 Hz a 5000 Hz con eventuale misura anche alle basse frequenze (50, 63 ed 80 Hz).

La misura del tempo di riverberazione e il calcolo dell'area equivalente di assorbimento acustico vanno fatte in accordo con la ISO 354 [7].

Nell'appendice B viene riportato il metodo per la misura delle trasmissioni laterali; nell'appendice C viene descritta la procedura per le misure in bassa frequenza; nell'appendice D viene descritto il metodo per la misura dello smorzamento (total loss factor); nell'appendice E viene riportato lo schema grafico per la rappresentazione dei risultati.

Norma EN 20140 parte 7. Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 7: Field measurements of impact sound insulation of floors (Misura dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edifici - Misura in opera dell'isolamento dai rumori di calpestio di solai)

La norma è in corso di pubblicazione e sostituisce la ISO 140/7 (1978) e la corrispondente UNI 8270 parte 4.

In questa norma il livello di calpestio normalizzato viene definito in due modi diversi (normalized e standardized) e ciò può creare dubbi nell'interpretare la traduzione. Entrambi i due modi vengono comunque ritenuti appropriati per rappresentare il livello di rumore di calpestio.

Nelle precedenti norme UNI non venivano utilizzate mai entrambe le definizioni nella stessa norma, ma venivano usate definizioni diverse in norme diverse (8270/4 e 8270/8) chiamando il livello di calpestio in entrambi i casi come "normalizzato".

Le procedure di misura in opera sono sostanzialmente le stesse della misura in laboratorio. Le raccomandazioni sulla gamma di frequenze da utilizzare sono le stesse della misura dell'isolamento al rumore aereo in opera.

4. Misura del tempo di riverberazione

4.1. Introduzione

Il tempo di riverberazione è definito come il tempo necessario affinché la densità di energia sonora in un ambiente si riduca al valore di un milionesimo della densità di energia presente al momento dell'interruzione della sorgente sonora. In termini di livello sonoro questo corrisponde ad una riduzione di 60 dB.

La formulazione classica del tempo di riverberazione, fornita da Sabine, è la seguente:

$$T_{60} = 0.16 \frac{V}{\sum_i \alpha_i S_i} \quad (4.1)$$

dove V è il volume totale dell'ambiente espresso in m^3 , α_i è il coefficiente di assorbimento della superficie i -esima S_i .

La sommatoria al denominatore, usualmente indicata con A , rappresenta l'area equivalente di assorbimento acustico dell'ambiente espressa in m^2 .

Tale espressione mantiene la sua validità se risultano soddisfatte alcune ipotesi in merito alla diffusione del campo sonoro all'interno dell'ambiente, alla omogeneità dell'assorbimento acustico da parte delle pareti, alla forma e dimensioni dell'ambiente.

I valori del tempo di riverbero variano al variare della frequenza e questo perché il coefficiente di assorbimento delle pareti e dell'aria varia con la frequenza.

Può quindi accadere che in un ambiente le ipotesi di validità dell'espressione del tempo di riverberazione siano soddisfatte solo a certe frequenze.

La misura del tempo di riverberazione va effettuata in molte applicazioni dell'acustica.

Il tempo di riverberazione è uno dei parametri utilizzati nella qualificazione acustica di diversi tipi di ambienti:

- ambienti scolastici;
- palestre e palazzi dello sport;
- sale per convegni e conferenze;
- teatri e sale per spettacoli in genere;

Sulla misura del tempo di riverberazione è basata la valutazione del coefficiente di assorbimento dei materiali in camera riverberante (ISO 354).

$$A_1 = \frac{55.3 \cdot V}{c \cdot T_1} \quad A_2 = \frac{55.3 \cdot V}{c \cdot T_2} \quad A_2 - A_1 = A = \frac{55.3 \cdot V}{c} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad \alpha = \frac{A}{S} \quad (4.2)$$

dove:

- $c = 331 + 0.6 \cdot t$ è la velocità del suono nell'aria con t la sua temperatura,

- V è il volume della camera riverberante,
- T_1 e T_2 sono i tempi di riverberazione misurati senza e con il materiale fonoassorbente,
- A_1 e A_2 sono le aree equivalenti di assorbimento acustico della camera riverberante prima e dopo l'inserimento del materiale fonoassorbente,
- A è l'area equivalente di assorbimento acustico del campione di materiale fonoassorbente,
- S è la sua superficie,
- α è il coefficiente di assorbimento del materiale.

Si noti che $\frac{55.3}{c} = 0.16$.

La misura del tempo di riverberazione è prevista in tutte quelle normative che utilizzano l'area equivalente di assorbimento acustico dell'ambiente A per la determinazione di fattori correttivi.

Nelle misure di potenza secondo ISO 3744 o 3746, ad esempio, la valutazione dell'indicatore ambientale $K_2 = 10 \log (1 + 4 S/A)$ prevede il calcolo di A secondo la formula $A = 0.16 (V/T)$ in cui il tempo di riverberazione T viene misurato sperimentalmente.

Le normative che parlano della misura del tempo di riverberazione sono essenzialmente due:

- ISO 354: Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room [7]
- ISO 3382: Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters [8]

La ISO 354 prevede la determinazione del tempo di riverberazione con la tecnica tradizionale del decadimento sonoro ottenuto mediante interruzione di una sorgente sonora stazionaria.

La norma ISO 3382 prevede sia la tecnica dell'interruzione del rumore stazionario che la tecnica della risposta all'impulso integrata.

4.2. Decadimento del rumore stazionario interrotto

Le misure del tempo di riverbero possono essere effettuate con diversi tipi di strumentazione e con differenti metodologie.

In base alla definizione del Tempo di Riverberazione, la misura deve consentire di valutare il decadimento del rumore stazionario interrotto partendo da una condizione di regime.

La definizione data da Sabine non esplicita esattamente l'istante dal quale si inizia a misurare il Tempo di Riverberazione. La densità di energia sonora, infatti, non inizia a decadere istantaneamente dopo lo spegnimento della sorgente, ma solo dopo un certo tempo pari al tempo impiegato dall'onda diretta a raggiungere il punto di ascolto.

Spesso non è possibile ricavare il tempo di riverberazione dalla definizione di Sabine, poiché non si riesce a registrare un decadimento di 60 dB in quanto è presente un rumore di fondo troppo elevato. Si ricorre pertanto ad una estrapolazione della prima parte della curva di decadimento. In teoria, se il decadimento della densità di energia fosse esattamente esponenziale, come previsto dall'acustica statistica, la curva del livello sarebbe una retta con pendenza costante e l'extrapolazione non porterebbe ad alcun errore. Nella realtà capita spesso di vedere curve di decadimento tutt'altro che rettilinee, con doppie pendenze o curvature non trascurabili. Ecco che il risultato è

influenzato dall'estensione in dB o in ms del tratto iniziale di curva usato per l'estrapolazione.

Usualmente si riconosce come Tempo di Riverberazione classico, direttamente rapportabile alla definizione di Sabine, il valore ottenuto estrapolando il decadimento da -5 dB a -35 dB sotto il livello di regime. Vengono poi definiti altri tempi di riverberazione, facenti riferimento a porzioni ridotte di decadimento.

Per la misura del decadimento si deve utilizzare un misuratore di livello sonoro in grado di fornire il valore del livello istante per istante. La misura del tempo di riverbero non è però attuabile direttamente dal fonometro in quanto la visualizzazione sul display dei valori di livello è molto veloce. Si deve quindi collegare il misuratore di livello ad un registratore scrivente in modo da ottenere il tracciato ben evidente su carta. Variando la velocità di trascinamento della carta si varia la scala dei tempi di riverberazione ottenendo dei tracciati più o meno ripidi. Il valore del Tempo di riverberazione si ottiene dalla pendenza della linea di decadimento. Ciò può essere fatto direttamente usando uno speciale goniometro.

Utilizzando il filtro di pesatura "A" o i filtri in bande di ottava o terzi di ottava, di cui sono dotati i fonometri, è possibile misurare anche il tempo di riverberazione complessivo pesato "A" oppure i tempi di riverberazione alle varie frequenze. Con i fonometri che utilizzano i filtri a scansione la misura va fatta tante volte quante sono le bande di frequenza su cui si deve misurare il tempo di riverberazione.

La strumentazione con registrazione scrivente è ormai stata superata dalle più moderne apparecchiature digitali in grado di determinare direttamente i valori del tempo di riverberazione.

Alcuni strumenti utilizzano delle procedure completamente automatizzate. Essi provvedono ad alimentare direttamente la sorgente con un opportuno segnale (già filtrato in terzi di ottava, in modo da concentrare l'energia sonora in un ristretto campo di frequenza, migliorando così il rapporto segnale/disturbo), interrompono il segnale stesso al momento opportuno, valutano direttamente la pendenza del decadimento e memorizzano il Tempo di Riverberazione così ottenuto alla frequenza di misura. Dopo aver analizzato tutte le bande di frequenza si ottiene una stampa dei tempi misurati in forma tabellare.

È possibile così ottenere risultati indipendenti dall'operatore e molto ripetibili, specie se ottenuti su medie di più rilevamenti.

Utilizzando analizzatori in tempo reale, in grado di processare simultaneamente tutte le bande di frequenza si riesce ad ottenere una forte diminuzione dei tempi di misura. La sorgente sonora viene in genere alimentata con rumore rosa o bianco e questo penalizza leggermente le condizioni di misura poiché la potenza viene dispersa su tutte le frequenze, ed il rapporto segnale/disturbo si riduce.

L'uso degli analizzatori in tempo reale per la misura del tempo di riverberazione si basa sull'acquisizione di un multispettro. Un multispettro consiste in una serie di spettri acquisiti ad intervalli di tempo regolari molto brevi. In questo modo con una sola misura sono disponibili le informazioni sul decadimento sonoro di tutte le bande di frequenza.

Il numero di spettri da acquisire e l'intervallo di acquisizione sono fissati in base alla lunghezza della misura che si vuole ottenere. Solitamente si fissa un intervallo di acquisizione di 10 ms e si imposta un numero di spettri sufficiente a raggiungere il tempo di misura voluto. Ad esempio, per effettuare una misura di 5 secondi si fissano 500 spettri ad intervalli di tempo di 10 ms. Normalmente l'acquisizione prevede un tratto iniziale di rumore stazionario, il decadimento e un tratto finale di rumore di fondo.

Quando si imposta lo strumento per l'acquisizione di un multispettro da utilizzare per il tempo di riverberazione si deve impostare la costante di tempo in posizione "lineare" così da evitare errori dovuti all'effetto delle costanti di tempo "esponenziali" sulla pendenza del decadimento. Le costanti di tempo esponenziali più conosciute sono ad esempio le costanti "fast", "slow" e "impulse". Con una costante di tempo esponenziale la misura di un singolo spettro viene influenzata non soltanto da ciò che accade nell'intervallo di tempo della stessa misura ma anche da ciò che è accaduto prima con un effetto che decresce in maniera esponenziale al passare del tempo. Impostando lo strumento nella posizione "lineare" viene invece annullato ogni effetto di ciò che è accaduto in un intervallo di tempo precedente a quello relativo al singolo spettro del multispettro. In questa modalità lo strumento media solo quello che accade nell'intervallo di misura del singolo spettro pesando ogni istante di questo intervallo allo stesso modo.

In alcuni strumenti non c'è la possibilità di disinserire la modalità di misura esponenziale. Questi si possono comunque usare per effettuare misure di tempo di riverbero se è possibile impostare una costante di tempo esponenziale molto piccola, ad esempio 10 ms. L'effetto di una costante di tempo esponenziale così piccola diventa subito trascurabile e la misura non è affetta da errori considerevoli.

4.3. Tecniche impulsive

È stata sinora considerata l'idea iniziale di Sabine, cioè una sorgente che produce un campo sonoro stazionario e diffuso, interrotta improvvisamente. La determinazione del tempo di riverberazione può essere effettuata anche direttamente dalla risposta all'impulso di un ambiente utilizzando una tecnica numerica sviluppata da Schroeder.

Con questa tecnica viene ricostruita la curva di decadimento che sarebbe stata prodotta da una sorgente in funzionamento continuo.

Questa tecnica prevede la misura preliminare della risposta all'impulso dell'ambiente.

4.3.1 Determinazione della risposta all'impulso mediante sorgenti impulsive

La risposta all'impulso di un ambiente, misurata in una certa posizione con la sorgente in un'altra posizione, non è altro che la funzione di trasferimento lineare, definita, nel dominio del tempo, del "sistema sotto analisi" (ambiente, posizione sorgente e posizione ricevitore).

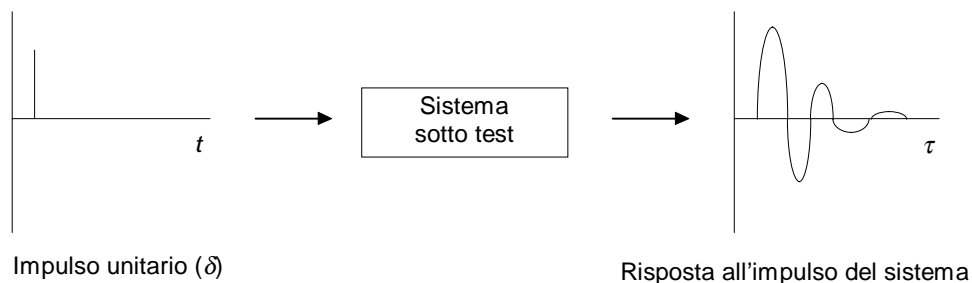


Figura 4.1 Risposta all'impulso di un sistema.

Un modo classico per misurare la risposta all'impulso del "sistema" è quello di applicare un impulso unitario all'ingresso ed osservare l'uscita del sistema. Se il segnale

applicato all'ingresso è molto simile ad un impulso ideale, l'uscita sarà la risposta all'impulso del sistema.

Poiché in pratica si usano delle sorgenti impulsive reali, quale un colpo di pistola a salve, lo scoppio di un palloncino o un impulso inviato da un altoparlante, quello che si ottiene all'uscita del sistema, cioè al ricevitore è il cosiddetto ecogramma, cioè la risposta ad un impulso reale.

4.3.2 Determinazione della risposta all'impulso mediante la tecnica MLS

Una alternativa al metodo sopra descritto è l'utilizzo di sequenze di massima lunghezza (MLS), che possiedono, a parità di valore di picco dell'uscita, un'energia molto maggiore rispetto ad un impulso. La determinazione della risposta all'impulso utilizzando un segnale MLS si chiama anche tecnica pseudo-impulsiva. La misura viene effettuata durante l'emissione del segnale, non dopo lo spegnimento.

Il segnale MLS è costituito da una sequenza binaria, generata da un sistema costituito da uno *shift register* a c celle di memoria e da una *porta logica XOR* illustrato nella figura seguente.

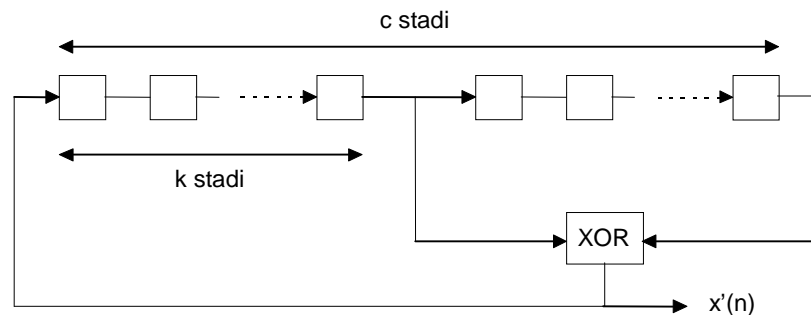


Figura 4.2: Generazione di una sequenza pseudo-random binaria.

Il numero delle linee di feedback che, partendo dalle uscite delle celle dello shift register, costituiscono gli ingressi della porta XOR (anche dette *taps*), può anche essere maggiore di 2.

Una volta inizializzati i valori contenuti nelle celle dello shift register, la sequenza binaria in uscita $x'(n)$ è periodica. Se si scelgono opportunamente i valori iniziali delle celle dello shift register e le posizioni dei taps, il periodo L della sequenza è il massimo consentito dal sistema

$$L = 2^c - 1 \quad (4.3)$$

e la sequenza prende il nome di *segnale MLS*.

Il segnale MLS possiede le seguenti caratteristiche:

- è una sequenza *pseudo-random*, ossia apparentemente casuale, in realtà nota a priori e periodica;
- è la sequenza di *lunghezza massima* fra tutte le quelle generabili da uno shift register con un dato numero di celle c .

Le ragioni principali che hanno decretato il successo delle tecniche MLS nel campo dell'acustica sono: la facilità di generazione di un segnale di lunghezza opportuna e di alta energia per mezzo di semplici circuiti basati su shift register; la possibilità di

applicare algoritmi efficienti per calcolare risposte all'impulso di notevole lunghezza; l'immunità al rumore ed alla distorsione di tali sistemi.

Quando viene utilizzato per l'eccitazione di un sistema, il segnale MLS viene trasformato in un segnale bipolare di ampiezza $\pm V_0$. Di solito si fa corrispondere la tensione $-V_0$ a 1 e $+V_0$ a 0.

Se $x(n)$ è la sequenza di +1 e -1 ottenuta da $x'(n)$ sostituendo, in quest'ultima, gli 0 con 1 e gli 1 con -1, il segnale applicato al sistema in analisi è $V_0x(n)$ e l'output periodico $y(n)$ del sistema vale

$$y(n) = h(n) * V_0x(n) = V_0 \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h(k)x(n-k) \quad (4.4)$$

ove $h(n)$ è la risposta all'impulso del sistema.

L'autocorrelazione circolare $C(n)$ della MLS, ha la proprietà di essere un impulso unitario (o δ di Dirac) periodico, a parte una piccola componente in continua.

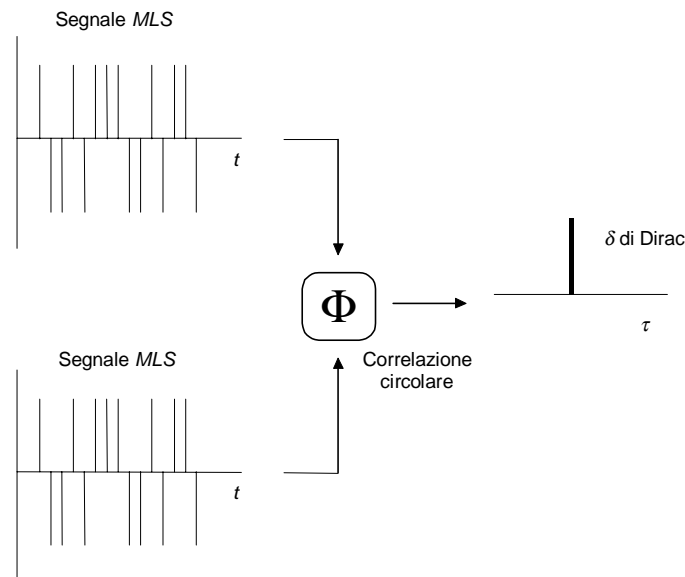


Figura 4.3 L'autocorrelazione circolare di un segnale *MLS* è una δ di Dirac.

La *correlazione circolare* $z(n)$ della MLS $x(n)$ all'ingresso del sistema con la corrispondente uscita $y(n)$, normalizzata rispetto all'ampiezza V_0 , è essenzialmente uguale alla risposta all'impulso $h(n)$ del sistema periodizzata. Il segnale periodico $z(n)$ si crea sommando repliche di $h(n)$ distanziate di L punti una dall'altra. Affinché la misura sia corretta, ossia affinché un periodo di $z(n)$ coincida con $h(n)$, la lunghezza L deve essere tale da consentire a $h(n)$ di decadere in modo sufficiente in un periodo L , altrimenti si verifica il fenomeno chiamato *time aliasing* (l'eventuale coda della IR, a partire dall' L -esimo campione, si sovrappone all'inizio della IR stessa, deteriorandola).

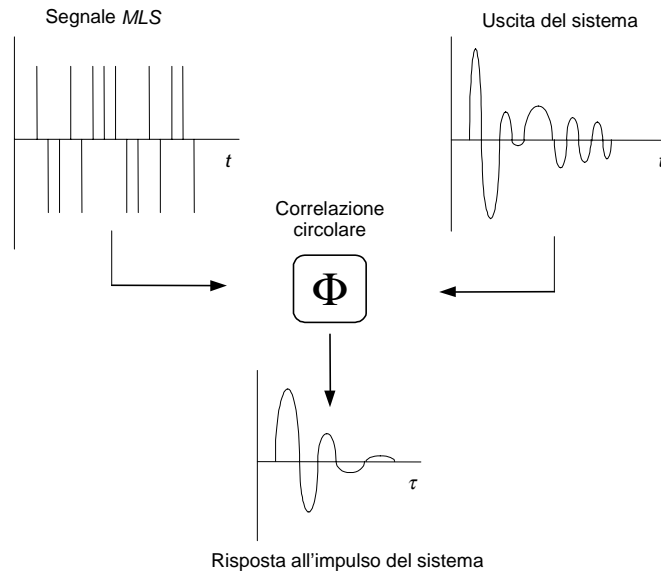


Figura 4.4: La correlazione circolare dell'uscita del sistema con il segnale *MLS* applicato al suo ingresso dà la risposta all'impulso del sistema.

La figura seguente schematizza un metodo di misura della risposta all'impulso ambientale basato sulle considerazioni precedenti.

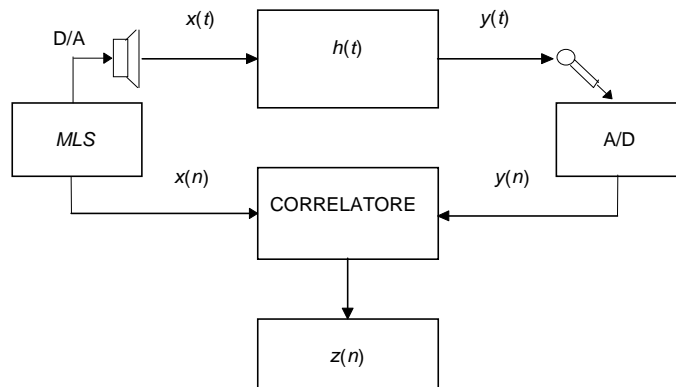


Figura 4.5: Schema per la misurazione della Risposta all'Impulso ambientale con metodo *MLS*.

La trattazione matematica che sta alla base della tecnica *MLS* viene tralasciata in quanto non è argomento della presente dispensa.

4.3.3 Integrazione all'indietro di Schroeder

La risposta all'impulso di un ambiente descrive, nella sostanza, il medesimo fenomeno fisico cui ci si riferisce quando si parla della riverberazione.

Si tratta, anche in questo caso, delle riflessioni multiple che si verificano all'interno di un locale, dovute ad una emissione sonora e che raggiungono, con il relativo ritardo, il punto di ascolto.

L'approccio è però concettualmente diverso perché in questo caso non si raggiunge la densità di energia sonora di regime in tutto l'ambiente ma si hanno solo informazioni sulla risposta dell'ambiente ad un certo impulso emesso da una sorgente in una certa posizione. I tempi di riverberazione misurati direttamente dal decadimento della risposta all'impulso sono leggermente inferiori a quelli prodotti dal decadimento da rumore stazionario, e comunque non coincidono con la definizione data da Sabine.

Il legame tra la risposta all'impulso e il tempo di riverberazione è stato studiato da Schroeder che ha mostrato come la legge di decadimento riverberante sia ricostruibile attraverso un integrale della risposta all'impulso.

Il decadimento del rumore contiene fluttuazioni casuali dovute alla storia casuale del segnale immediatamente precedente allo spegnimento della sorgente. La media temporale $\langle n^2(t) \rangle$ di un numero molto grande di misure del decadimento quadrato $n^2(t)$, è collegata alla risposta all'impulso al quadrato $g^2(t)$, dalla seguente relazione:

$$\langle n^2(t) \rangle = \int_t^\infty g^2(t') dt' = \int_0^\infty g^2(t') dt' - \int_0^t g^2(t') dt' \quad (4.3)$$

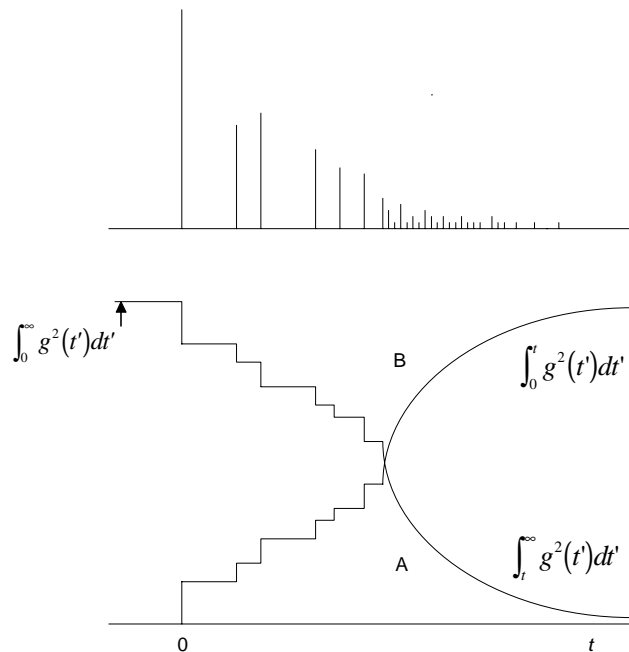


Fig. 4.6 Ricostruzione della curva di decadimento mediante integrazione all'indietro.

Nella figura 1 è visibile la rappresentazione grafica dell'integrazione di Schroeder. La ricostruzione della curva di decadimento può avvenire mediante l'integrazione all'indietro della risposta all'impulso quadrata (curva A) fino a raggiungere il livello di energia stazionario, oppure, procedendo per tempi crescenti, per sottrazione dal livello di energia stazionario calcolato a parte, dei valori assunti progressivamente dall'integrale della risposta all'impulso quadrata (curva B). Trasformando questi grafici in scala logaritmica, è possibile calcolare il tempo di riverberazione con gli stessi procedimenti illustrati precedentemente.

La norma ISO3382 prevede esplicitamente che la misura del tempo di riverbero venga effettuata mediante integrazione all'indietro di Schroeder allorché il segnale

di eccitazione è di tipo impulsivo o pseudo-impulsivo; la determinazione del tempo di riverbero direttamente dalla risposta all'impulso non integrata è pertanto fuori norma.

Attualmente sono disponibili strumenti capaci di effettuare automaticamente l'integrazione di Schroeder di segnali impulsivi. In questo modo è possibile ottenere accurate misure dei tempi di riverberazione alle varie frequenze con un semplice colpo di pistola. Tali risultati sono in genere confrontabili con i risultati ottenuti con le misure classiche ottenute dallo spegnimento del rumore stazionario.

In caso di decadimento non esponenziale si riscontrano viceversa delle differenze fra i due metodi. Secondo Schroeder è proprio il valore misurato dalla risposta all'impulso integrata ad essere meglio correlato con la sensazione soggettiva delle persone.

L'integrazione all'indietro di Schroeder può essere fatta anche con un foglio elettronico secondo lo schema di calcolo riportato nella tabella 1.

Nella figura 4.7 sono riportate le curve di decadimento da rumore impulsivo e l'integrale di Schroeder per l'esempio riportato in tabella 1.

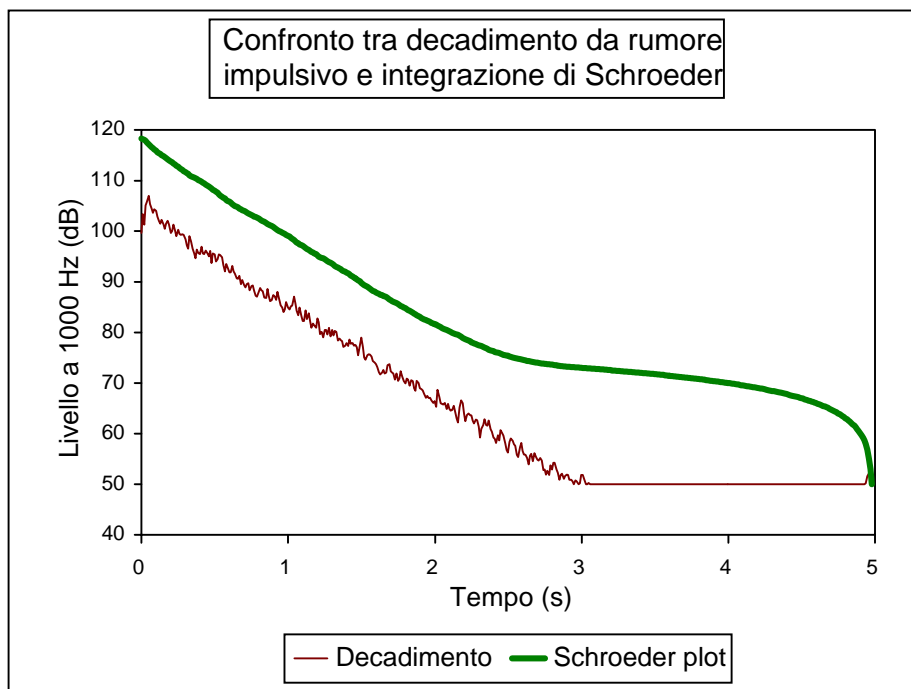


Figura 4.7: curva di decadimento da rumore impulsivo e integrale di Schroeder per l'esempio riportato in tabella 1.

Osservando la figura, si nota come la pendenza della curva integrata cambi avvicinandosi al termine della risposta all'impulso, poichè viene integrato anche il rumore di fondo non causato dall'impulso stesso. Esso si traduce in un secondo tratto lineare, di pendenza molto inferiore a quella del primo tratto, che può essere facilmente confuso con un caso di decadimento a doppia pendenza. In realtà la misura riportata in figura si riferisce ad un ambiente perfettamente Sabiniano, e la doppia pendenza è un tipico artefatto prodotto dall'integrazione di Schroeder. Il valore corretto del tempo di riverbero si ottiene estrapolando la pendenza del primo tratto di curva, e tralasciando il secondo.

Purtroppo la norma ISO3382 non è sufficientemente esplicita sull'argomento legato al rumore di fondo, e sancisce (erroneamente) che l'integrazione dello stesso causa una

curva ad andamento orizzontale, mentre come mostrato essa è sì lineare, ma dotata di pendenza non trascurabile.

Inoltre nella norma suddetta non vengono esplicitamente illustrati gli accorgimenti in uso per evitare il problema dell'erronea integrazione del rumore di fondo, e si suggerisce semplicemente un criterio empirico onde definire l'intervallo ottimale di risposta all'impulso da integrare, limitando in tal modo l'influenza del rumore di fondo.

In realtà i moderni apparati per la misura del tempo di riverbero mediante risposta all'impulso integrata incorporano avanzate tecniche numeriche di rimozione degli effetti indesiderati del rumore di fondo, che consentono la "sottrazione" dello stesso in fase di integrazione, e producono in tal modo un decadimento molto più esteso ed immune da doppie pendenze artificiose [9].

Ad esempio la fig. 4.8 riporta il confronto fra il decadimento calcolato senza e con la eliminazione numerica del rumore di fondo.

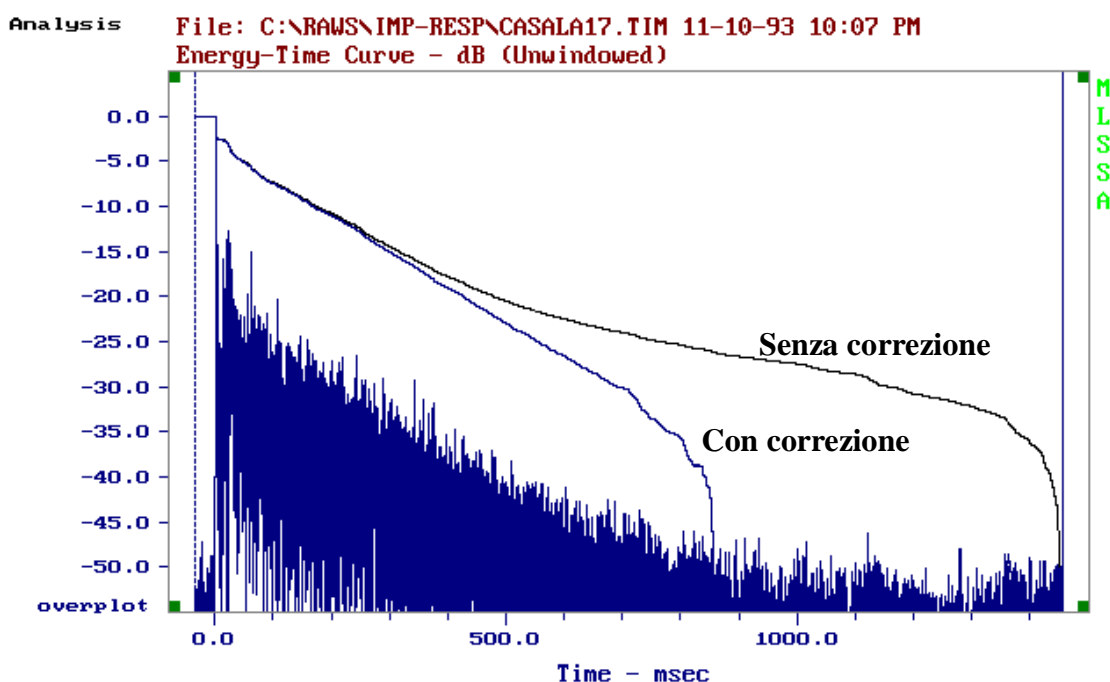



Fig. 4.8 – Integrazione di Schroeder di una risposta all'impulso sperimentale (tecnica MLS) con e senza correzione per rumore di fondo.

Si può notare come, in presenza della correzione per rumore di fondo, il decadimento ricostruito risulta perfettamente lineare fino a oltre 30 dB al di sotto del livello stazionario di partenza, mentre in assenza di tale correzione il tratto di decadimento corretto arriva solo a -15 dB.

Volendo incrementare ulteriormente il rapporto segnale/rumore, e dunque l'estensione del decadimento rilevato, si può operare una media sincrona su più ripetizioni della sequenza MLS. In tale modo è possibile arrivare a misurare correttamente il tempo di riverberazione anche in presenza di rumore di fondo di livello più elevato del segnale proveniente dall'altoparlante, a patto di effettuare una media di parecchie decine di minuti, o addirittura di ore.

Tabella 1: esempio di esecuzione dell'integrazione all'indietro di Schroeder con un foglio elettronico.

	Decadimento da rumore impulsivo (dB)			Integrale di Schroeder (dB)
	1000 Hz	1000 Hz	1000 Hz	1000 Hz
	A	B	C	D
			$\sum_i 10^{\frac{A_i}{10}} = 6.897 * 10^{11}$	
	Li		$\sum_{C_{i-1}} B_i$	$10 * \log(C_i)$
1	99.7	9.333E+09	6.803E+11	118.3
2	103.4	2.188E+10	6.585E+11	118.2
3	101.3	1.349E+10	6.45E+11	118.1
4	105.1	3.236E+10	6.126E+11	117.9
5	105.8	3.802E+10	5.746E+11	117.6
6	107	5.012E+10	5.245E+11	117.2
7	105.4	3.467E+10	4.898E+11	116.9
8	104.5	2.818E+10	4.616E+11	116.6
9	103.6	2.291E+10	4.387E+11	116.4
10	104.4	2.754E+10	4.112E+11	116.1
11	104	2.512E+10	3.861E+11	115.9
12	102.9	1.95E+10	3.666E+11	115.6
13	102	1.585E+10	3.507E+11	115.4
14	101.5	1.413E+10	3.366E+11	115.3
15	102.3	1.698E+10	3.196E+11	115.1
16	101.4	1.38E+10	3.058E+11	114.9
17	100.5	1.122E+10	2.946E+11	114.7
...
N
N+1	75.6	36307805	72840997	88.6
N+2	75.3	33884416	69452556	88.4
..
M
M+1	50.8	120226.44	200000	53
M+2	50	100000	100000	50
M+3	50	100000	-0.0000	ERR

5. Ringraziamenti

Si ringraziano l'Ing. Fabrizio Righini, il Prof. Roberto Pompoli e la Scuola di Acustica dell'Università di Ferrara per aver fornito parte del materiale incluso in questa dispensa.

6. Bibliografia

- [1] EN 20140 parte 3. Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements (Misura dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Misura in laboratorio del potere fonoisolante di elementi di edifici)
- [2] EN 20140 parte 4. Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms (Misura dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Misura in opera dell'isolamento acustico per via aerea tra ambienti interni)
- [3] ISO 717/1/2/3. Acoustics - Rating of sound insulation in building and of building elements. (UNI 8270/7 - Acustica - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici e di componenti di edificio).
- [4] Norma EN 20140 parte 6. Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 6: Laboratory measurements of impact sound insulation of floors (Misura dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Misura in laboratorio dell'isolamento dai rumori di calpestio di solai)
- [5] EN 20140 parte 7. Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 7: Field measurements of impact sound insulation of floors (Misura dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edifici - Misura in opera dell'isolamento dai rumori di calpestio di solai)
- [6] UNI 8270/8 - Acustica - Misura dell'isolamento acustico di edifici ed elementi di edifici - misure do laboratorio dell'isolamento acustico dei rumori di calpestio di rivestimenti di pavimentazioni. Conforme alla ISO 140/VIII - Acoustics - Measurement of sound insulation in building and of building elements - Part 8 : laboratory measurements of ithe reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a standard floor.
- [7] ISO 354 (1985) Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room (Mesurage de l'absorption acoustique en salle révéberante)
- [8] ISO 3382 (1975) Acoustics - Measurement of the reverberation time in auditoria
- [9] A. Farina, F. Righini – “Software implementation of an MLS analyzer, with tools for convolution, auralization and inverse filtering” – Pre-prints of the 103rd AES Convention, New York, 26-29 September 1997.