



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea triennale in ingegneria meccanica

**Valutazione dell'incertezza nella stima del Weighted Sound  
Reduction Index (Rw) in acustica edilizia**

**Evaluation of the uncertainty in the estimate of Weighted  
Sound Reduction Index (Rw) in building acoustics**

Relatore: Chiar.mo/a

Prof. **Gian Marco Revel**

Tesi di Laurea di:

**Luca Squartini**

**A.A. 2019/2020**

## ABSTRACT

L'indice di valutazione del potere fonoisolante  $R'_w$  è un parametro molto utilizzato nel campo dell'acustica edilizia per caratterizzare il comportamento in termini di isolamento acustico per via aerea degli elementi di un edificio. Questo viene determinato attraverso una procedura fornita dalla normativa ISO 717-1, che consente di ridurre i valori alle diverse bande di frequenza del potere fonoisolante apparente  $R'$  dell'elemento in esame, i quali vengono a loro volta ricavati tramite misurazioni di altre grandezze acustiche, i cui metodi di misura sono descritti all'interno della serie di normative UNI EN ISO 16283.

Nella presente tesi, viene effettuata una valutazione dell'incertezza di tipo B nella stima di  $R'_w$ , con lo scopo di determinare quali grandezze influenzino maggiormente l'incertezza associata a tale indice.

Nel dettaglio, viene prima fornita una panoramica relativa allo stato dell'arte riguardante le misurazioni acustiche in edilizia, in particolare nel campo dell'isolamento acustico di facciata, successivamente vengono svolte due valutazioni dell'incertezza dei metodi di misura forniti dalla normativa UNI EN ISO 16283-3.

Successivamente, la presente tesi si concentra sulla determinazione dell'indice di valutazione  $R'_w$  di una facciata posta in corrispondenza di un sottopassaggio, con lo scopo di verificare se cambiando configurazioni di misura, si ottengono stessi valori per l'indice.

## INDICE

- 1. INTRODUZIONE**
  - 1.1. LE MISURE DI FONOIOLAMENTO
  - 1.2. L'INCERTEZZA DELLE MISURE DI FONOIOLAMENTO
  - 1.3. OBIETTIVO DELLA TESI
  
- 2. LA VALUTAZIONE DELL'ISOLAMENTO ACUSTICO PER VIA AEREA DI UN EDIFICIO**
  - 2.1. LE MISURE ACUSTICHE
  - 2.2. I MECCANISMI DI TRASMISSIONE DEL SUONO ALL'INTERNO DI EDIFICI
  - 2.3. IL POTERE FONOIOLANTE
  - 2.4. LA NORMATIVA UNI EN ISO 16283-3
    - 2.4.1. MISURAZIONE DEL LIVELLO DI PRESSIONE SONORA INTERNO
    - 2.4.2. MISURAZIONE DEL TEMPO DI RIVERBERAZIONE
    - 2.4.3. MISURAZIONE DEL LIVELLO DI PRESSIONE SONORA ESTERNO
    - 2.4.4. DETERMINAZIONE DEL POTERE FONOIOLANTE DELLA FACCIATA
    - 2.4.5. DETERMINAZIONE DELL'INDICE DI VALUTAZIONE  $R'_w$
  
- 3. VALUTAZIONE DELL'INCERTEZZA DI MISURA ATTRAVERSO IL MODELLO ANALITICO**
  - 3.1. IL MODELLO ANALITICO
  - 3.2. PROPAGAZIONE DELLE INCERTEZZE NEL CALCOLO DEL POTERE FONOIOLANTE
    - 3.2.1. METODO DEGLI ELEMENTI
    - 3.2.2. METODO GLOBALE
  - 3.3. CONFRONTO TRA LE INCERTEZZE DEI DUE METODI DI MISURA
  
- 4. VALUTAZIONE DELL'INCERTEZZA TRAMITE METODO MONTE CARLO**
  - 4.1. VALUTAZIONE DELL'INCERTEZZA DI  $R'$  TRAMITE MONTECARLO
  - 4.2. ANALISI DI SENSITIVITÀ
  
- 5. MISURAZIONI**
  - 5.1. PROCEDURA DI PROVA PER LA DETERMINAZIONE DEL TEMPO DI RIVERBERAZIONE
  - 5.2. PROCEDURA DI PROVA PER LA DETERMINAZIONE DEI LIVELLI DI PRESSIONE SONORA ESTERNO E INTERNO
    - 5.2.1. RISULTATI DELLE PROCEDURE DI PROVA CON FINESTRA CHIUSA
    - 5.2.2. RISULTATI DELLE PROCEDURE DI PROVA CON UNA FINESTRA APERTA
  - 5.3. DETERMINAZIONE DEL POTERE FONOIOLANTE APPARENTE  $R'$
  
- 6. CONCLUSIONI**
  
- 7. FONTI**

## 1. INTRODUZIONE

### 1.1. LE MISURE DI FONOISOLAMENTO

Lo scopo di un edificio è quello di fornire un ambiente sano e confortevole agli occupanti, dal momento che le persone passano circa il 90% delle loro giornate al loro interno. [1,2,3] La qualità degli ambienti interni dipende da diverse variabili di carattere termico, acustico, visivo ed inerenti alla qualità dell'aria. Infatti, per uno stesso ambiente si parla solitamente di diversi tipi di comfort quali: comfort termico, comfort acustico, comfort visivo e qualità dell'aria ambientale. In particolare, recenti studi hanno dimostrato che il comfort acustico è uno dei fattori più influenti sulla percezione e sul comportamento umano, i quali contribuiscono significativamente alla regolazione del loro benessere psico-fisico. [4] Il comfort acustico può essere definito come quella condizione psicofisica per cui un individuo, immerso in un campo sonoro, si trova in condizioni di benessere, in relazione all'attività che sta svolgendo. [5] In altre parole, una persona si trova in condizioni di comfort acustico nei confronti di un ambiente se non viene disturbato da rumori durante l'attività che sta svolgendo.

Il rumore è un inquinante che non può essere evitato nella vita quotidiana e, spesso, è una delle principali cause di insoddisfazione e disagio nei confronti degli ambienti di vita [6]. L'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) [7] ha definito il rumore come un suono "sgradevole, fastidioso o intollerabile" che penetra nelle facciate, nei muri divisorii e nei solai e risulta fonte di preoccupazione per gli abitanti e gli utenti di un edificio. Inoltre, l'OMS ha identificato un considerevole numero di effetti causati da livelli eccessivi di rumore, come fastidio, disturbi del sonno e irritabilità, ma anche effetti a lungo termine come malattie cardiovascolari, ipertensione e problemi psichiatrici. Esistono varie fonti di rumore che possono comportare insoddisfazione negli utenti di un edificio, ad esempio: traffico, installazioni interne o esterne, rumore generato dall'uomo proveniente da unità abitative adiacenti.

Dato l'impatto che il rumore ha sulla salute degli utenti di un edificio, è necessario prendere accorgimenti per proteggerne gli ambienti interni. In questo senso, una buona strategia è quella di effettuare una corretta progettazione dei vari elementi strutturali di un edificio in termini di isolamento acustico.

L'isolamento acustico rappresenta la capacità di un elemento edilizio a ridurre l'energia acustica che si propaga da un ambiente a un altro. Generalmente, quando si parla di isolamento acustico, è bene distinguere fra isolamento acustico per via aerea e isolamento da rumore di calpestio. Il primo è il caso in cui il suono si propaga in aria da un ambiente, detto emittente, e incidendo sull'elemento, lo mette in vibrazione. Tale elemento, vibrando, emette onde sonore all'interno dell'altro ambiente, che viene chiamato ricevente. Nel secondo caso, invece, la trasmissione del rumore da un ambiente all'altro è dovuta a sollecitazioni meccaniche impulsive, prodotte su una faccia dell'elemento. [8]

In entrambi i casi, per verificare che un elemento di edificio rispetti determinati standard di isolamento acustico è necessario effettuare misure di fonoisolamento. Per effettuare questo tipo di misure esistono normative tecniche che indicano gli strumenti da utilizzare, i requisiti che gli ambienti devono possedere e le modalità con cui effettuare le misurazioni. Le normative più recenti di questo genere sono quelle della serie UNI EN ISO 16283. [9,10,11] In particolare, esistono tre diverse normative, ognuna specializzata in base al tipo di elemento edilizio per il quale si vuole valutare l'isolamento acustico, ovvero: pareti divisorie (16283-1), solai (16283-2) e facciate (16283-3). Nel caso delle pareti divisorie e delle facciate viene

misurato l'isolamento acustico per via aerea, mentre nel caso dei solai viene misurato l'isolamento da rumori di calpestio.

In relazione all'isolamento acustico per via aerea, vi sono numerose ricerche riguardo le misurazioni per l'isolamento acustico di pareti divisorie, ma sono invece poche quelle riguardo le misurazioni per facciate. [12] Tuttavia, l'isolamento acustico delle facciate dovrebbe assumere molta importanza. Infatti, la maggior parte degli edifici in Europa è situata in aree urbane densamente popolate, in cui sono presenti attività commerciali e spesso si trovano vicino strade molto trafficate, le quali è stato dimostrato essere il principale inquinante che influenza la qualità della vita e il benessere all'interno degli edifici. [13,14,15] In aggiunta, è stato stimato che circa 80 milioni di persone sono esposte a livelli inaccettabili di rumore e che almeno 170 milioni di persone vivono in aree in cui il rumore causa disturbi del sonno, malattie e serio disturbo. Pertanto, le misurazioni per l'isolamento acustico delle facciate dovrebbero assumere molta più importanza rispetto a quella ottenuta finora.

Come già scritto, le misurazioni per determinare il comportamento in termini di fonoisolamento di una facciata sono descritte all'interno della norma UNI EN ISO 16283-3. Le misurazioni richieste da tale norma sono quattro, ovvero: misurazione dei livelli di pressione sonora esterno  $L_1$  e interno  $L_2$ , misurazione del tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente  $T_{60}$  e misurazione del rumore di fondo all'interno dell'ambiente ricevente  $L_f$ . Inoltre, per effettuare questo tipo di misurazioni la norma specifica che possono essere utilizzate diverse tipologie di sorgente sonora, quali altoparlanti, traffico stradale, traffico ferroviario o traffico aereo. Le procedure di misurazione descritte sono due, a seconda che si voglia misurare le prestazioni di un elemento della facciata, come ad esempio una finestra, o quelle di un'intera facciata. La prima viene chiamata metodo degli elementi, mentre la seconda metodo globale. [16283-3]

Una volta effettuate le misurazioni, vengono anche indicati dei modelli di calcolo per determinare due diverse grandezze a seconda del metodo utilizzato, ovvero il potere fonoisolante apparente  $R'$  per il metodo degli elementi e l'isolamento acustico normalizzato rispetto al tempo di riverberazione  $D_{nT}$  per il metodo globale. Essenzialmente, la differenza tra queste due grandezze sta nel fatto che per il calcolo della prima è necessario conoscere la superficie della facciata, cosa che non sempre è vera. [16] Inoltre, la formula fornita dalla normativa si basa sull'ipotesi che il campo sonoro nell'ambiente ricevente si approssimi a un campo diffuso. [16283] Comunque sia, dal momento che dipendono da grandezze acustiche, entrambe variano al variare della frequenza e vengono quindi misurate in bande di ottava o in bande di terzo di ottava.

In aggiunta alla UNI EN ISO 16283-3, solitamente viene utilizzata la normativa ISO 717-1, la quale consente di ridurre i valori di tali grandezze alle diverse bande di frequenza in un valore a singolo indice, chiamati indice di valutazione del potere fonoisolante apparente  $R'_w$  e indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato  $D_{nT,w}$ . [17] Si tratta di valori a singolo indice utilizzati generalmente per poter confrontare il comportamento complessivo di pareti dal punto di vista dell'isolamento acustico e, soprattutto, per verificare la rispondenza ai valori limite previsti dalla legge italiana. Infatti, all'interno del DPCM 5/12/1997 vengono indicati valori minimi che gli elementi di un edificio devono rispettare in termini di  $R'_w$  e  $D_{nT,w}$ , rispettivamente per le pareti divisorie e per le facciate. [18]

## 1.2. L'INCERTEZZA DELLE MISURE DI FONOIOLAMENTO

I risultati delle misurazioni acustiche in edilizia non possono essere considerati completi senza dichiarare l'incertezza associata, un'informazione essenziale della qualità e affidabilità del risultato. L'incertezza di misura è, infatti, un parametro, associato col risultato di una misurazione, che rappresenta la dispersione dei valori che possono ragionevolmente essere attribuiti al misurando. Solo con tale indicazione il risultato può essere confrontato con altri analoghi o con valori di riferimento assegnati da specifiche contrattuali o norme tecniche o leggi. I due principali metodi per calcolare l'incertezza di misura sono l'approccio empirico, descritto nella norma ISO 5725 [19], e l'approccio modellistico, descritto nella Guida ISO/IEC 98/5 [20]. Comunque, lo stato dell'arte nell'acustica in edilizia è tale da far sembrare impossibile formulare i modelli descritti dalla Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM) [XX] per le differenti grandezze in acustica edilizia. In particolare, risulta molto complicato stabilire stime affidabili per le variabili di input dell'approccio modellistico. Questo è dovuto al fatto per cui le misurazioni acustiche in edilizia sono caratterizzate da quattro principali difficoltà:

- Il valore vero del misurando è sconosciuto, data la natura dei campioni di prova;
- Le grandezze da misurare sono definite attraverso l'energia acustica incidente e trasmessa dall'elemento analizzato, le quali non possono essere misurate direttamente. Infatti, per la loro determinazione è necessario misurare altre grandezze acustiche, come la pressione sonora;
- Nelle normative UNI EN 16283 è solitamente assunto un campo sonoro perfettamente diffuso nelle sale di misura. Tuttavia questa ipotesi non è mai completamente vera e porta ad un'elevata incertezza nelle bande di frequenza di un terzo d'ottava più basse; [22,23,24,25]
- I requisiti legali e la dichiarazione di prestazione dei prodotti da costruzione sono generalmente specificati in termini di quantità numeriche singole (ad esempio l'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente), per le quali è particolarmente critica la corretta determinazione dell'incertezza. Infatti, gli indici a valore singolo sono calcolati a partire da risultati di misurazioni in bande di un terzo di ottava, ma tale calcolo non può essere descritto né da una correlazione piena e positiva tra bande di terzi d'ottava, né da nessuna correlazione. [26]

Pertanto, solitamente viene utilizzato l'approccio empirico, il quale permette di determinare l'accuratezza e la precisione di un metodo di misura. La precisione è un termine generale per la variabilità fra test ripetuti. Due misure della precisione, chiamate ripetibilità e riproducibilità, si sono rivelate necessarie e, per molti casi pratici, sufficienti per descrivere la variabilità di un metodo di prova. La ripetibilità si riferisce a prove eseguite sullo stesso oggetto di prova con lo stesso metodo in condizioni quanto più simili possibile, con le prove eseguite in un breve intervallo di tempo, in un laboratorio da un operatore che utilizza la stessa attrezzatura. Dall'altra parte, la riproducibilità si riferisce a test eseguiti su elementi di prova identici con lo stesso metodo, in condizioni molto variabili, in laboratori diversi con operatori diversi e apparecchiature diverse. Pertanto, ripetibilità e riproducibilità sono due estremi, poiché il primo misura la minima e il secondo la massima variabilità dei risultati. Sia le deviazioni casuali che quelle sistematiche influenzano i risultati delle misurazioni acustiche. Gli effetti casuali possono essere determinati da misurazioni indipendenti ripetute in condizioni essenzialmente identiche. Gli effetti sistematici, però, non sono facilmente determinabili, ma, come regola generale, possono essere stimati grazie a misure comparative da eseguire in diverse

strutture di prova (per misure di laboratorio) o effettuate da diversi laboratori (per misure sul campo) e la conoscenza degli errori casuali in quelle condizioni. Pertanto, è necessario fare riferimento ai concetti di ripetibilità e riproducibilità, che forniscono un mezzo semplice per l'espressione della precisione di un metodo di prova e delle misurazioni eseguite secondo il metodo di prova.

In aggiunta, negli ultimi anni è stata pubblicata la ISO 12999-1 [26] per fornire una guida sulla valutazione dell'incertezza di misura dell'isolamento acustico nell'acustica degli edifici. Questa fornisce incertezze tipiche per grandezze determinate secondo le seguenti normative: ISO 10140, ISO 16283 e ISO 717. [28] Infine, nonostante sia impossibile definire tutte le fonti di incertezza di una misurazione, attraverso prove effettuate in condizioni di ripetibilità e riproducibilità, la norma ISO 12999-1 fornisce anche i componenti dell'incertezza che sono ritenuti più importanti nelle misure di acustica in edilizia. Infatti, vengono distinti due gruppi. Il primo gruppo comprende tutte le influenze che si verificano in condizione di ripetibilità, a cui appartengono:

- Integrazione spaziale e temporale imperfetta durante la determinazione dei livelli di pressione sonora mediati;
- Incertezze nella correzione del rumore di fondo se il rumore di fondo non è stazionario;
- Incertezze dovute alla determinazione dell'assorbimento dell'ambiente.

Invece, il secondo gruppo comprende alcune fonti che compaiono in condizioni di riproducibilità:

- Dimensioni o proporzioni differenti delle aperture di prova;
- Fattori di attenuazione differenti delle strutture di prova;
- Geometrie dell'ambiente differenti;
- Differenti condizioni al contorno;
- Trasmissione laterale;
- Attrezzatura di misurazione comprensiva della taratura;
- Effetti di temperatura, pressione statica e umidità.

### 1.3. OBIETTIVO DELLA TESI

L'obiettivo della presente tesi è quello di valutare l'incertezza nella stima dell'indice del potere fonoisolante ponderato  $R'_{w}$  di una facciata e, in seguito, di determinare lo stesso indice per una facciata situata in corrispondenza di un sottopassaggio.

## 2. LA VALUTAZIONE DELL'ISOLAMENTO ACUSTICO PER VIA AEREA DI UN EDIFICIO

### 2.1. LE MISURE ACUSTICHE

Il rumore è un suono sgradevole, fastidioso o inaspettato. In termini fisici, il suono è una perturbazione, di carattere oscillatorio (vibrazione meccanica, turbolenza aerodinamica, ecc.), generata da una sorgente sonora che, propagandosi in un mezzo elastico, causa una variazione di pressione percepibile dall'orecchio umano. In altre parole, il suono è una forma di trasporto di energia meccanica, senza trasporto di materia, attraverso onde, denominate onde sonore, che si propagano in un mezzo elastico a una certa velocità, la quale dipende fortemente dalla natura di quest'ultimo. Senza un mezzo elastico, la propagazione del suono non avviene. Nell'aria il suono può essere causato dalla vibrazione di una superficie, di un fluido o dalla miscelazione turbolenta di masse d'aria. In ogni caso, l'onda sonora, che può essere considerata come un disturbo di pressione, si propaga dalla sorgente sonora nel mezzo circostante.

Generalmente, il suono è misurato utilizzando strumenti il cui funzionamento è simile a quello dell'orecchio umano, con tecniche di analisi che sono analoghe a quelle utilizzate dal cervello per interpretare l'informazione. In questo senso, i sensori più comuni sono i microfoni, i quali convertono l'energia acustica in segnali elettrici calibrati, che possono essere registrati per analisi future o processati all'istante. A seconda di come viene utilizzato un microfono possono essere ottenute diverse informazioni, ovvero:

- Se si utilizza un solo microfono in una posizione fissa nello spazio, si ottiene un segnale contenente un'unica informazione, ovvero la pressione sonora in tale punto dello spazio;
- Se si utilizza un solo microfono che però viene spostato nello spazio per misurare un discreto numero di punti dello spazio, viene ottenuta un'immagine mediata spazialmente del campo sonoro.

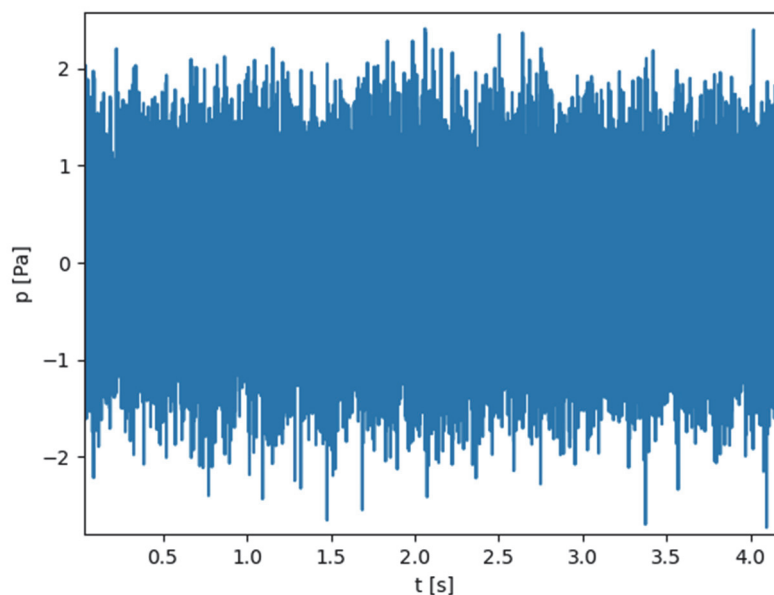


Fig.1: Segnale ottenuto tramite microfono

In entrambi i casi, il segnale ottenuto rappresenta la variazione di pressione sonora nel tempo. Tuttavia, la variazione di pressione causata dalla propagazione di onde sonore risulta essere molto minore rispetto alla pressione atmosferica e, inoltre, la



sua entità può variare in un cambio estremamente ampio, tipicamente da variazioni dell'ordine di  $10^{-6} Pa$  a variazioni dell'ordine di  $10^3 Pa$ . Per questo motivo, è necessario l'utilizzo di una scala logaritmica nella quale, al valore della grandezza in esame, si fa corrispondere dieci volte il logaritmo in base dieci del rapporto tra tale valore e un prefissato valore di riferimento. Pertanto, il segnale ottenuto deve essere convertito in un segnale del livello di pressione sonora, attraverso la formula:

$$L = 10 \log \frac{p(t)^2}{p_{rif}^2}$$

dove  $p(t)$  è il valore della pressione sonora all'istante  $t$ , mentre  $p_{rif}$  è la pressione di riferimento nel mezzo, che nell'aria corrisponde a  $p_{rif} = 20 \cdot 10^{-6} Pa$ . Tale valore non è preso casualmente, infatti rappresenta la minima variazione di pressione sonora che l'orecchio umano può percepire a 1000 Hz.

I microfoni hanno una risposta lineare, tuttavia, in alcuni casi, è necessario aggiustare tale risposta utilizzando delle curve di ponderazione, le quali sono curve che tengono conto della diversa sensibilità dell'orecchio umano alle basse e alle alte frequenze. Esistono quattro diverse curve di ponderazione, denominate rispettivamente di tipo A, B, C e D, tuttavia viene generalmente adottata una ponderazione di tipo A.

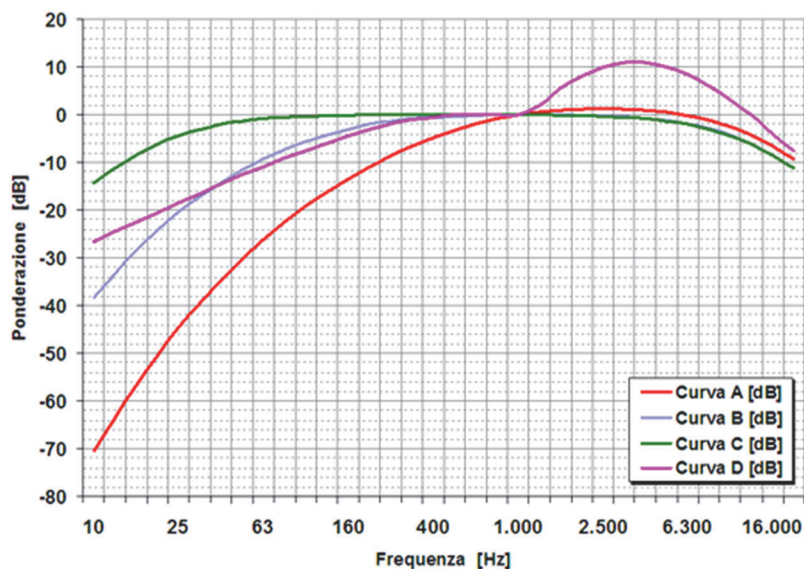


Fig.2: Curve di ponderazione [a]

Solitamente, quando vengono effettuate misure acustiche ci si concentra sulle caratteristiche di un campo sonoro in un determinato intervallo temporale. Per questo motivo, viene definito il livello equivalente di pressione sonora, determinabile come:

$$L_{eq} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$$

Inoltre, dal momento che in generale la forma di un segnale sonoro è estremamente complessa e che l'orecchio umano opera come un analizzatore, composto da una serie di filtri passa banda che ricoprono tutto lo spettro uditivo, spesso il segnale deve essere filtrato in bande di terzo di ottava. Queste sono infatti le bande di frequenza che più si avvicinano alle bande critiche dell'orecchio umano. [29,30]

Tutto questo processo di elaborazione può essere svolto in due diversi modi:

- Utilizzando un fonometro. Si tratta di un sistema di misura composto da un certo numero di elementi interconnessi. Infatti, la pressione sonora  $p_i$  viene tradotta in tensione per mezzo di un microfono e, successivamente, questa tensione viene amplificata mediante un amplificatore con elevata impedenza in ingresso e un elevato guadagno. Una volta passata nell'amplificatore, la tensione passa attraverso dei dispositivi per la ponderazione, che sono dei filtri elettrici le cui risposte in frequenza sono fatte in modo tale da approssimare la risposta in frequenza dell'orecchio umano. All'uscita dei filtri di ponderazione, il segnale viene ulteriormente amplificato e una presa di uscita consente di mandarlo all'oscilloscopio (se si desidera osservare la forma d'onda) o a un analizzatore di spettro (se va determinato il contenuto in frequenza del suono). Se invece quello che interessa è soltanto l'ampiezza complessiva del suono, il segnale viene mandato a un raddrizzatore, poi a un sistema di filtri. Questo permette di ottenere il valore medio di pressione sonora dell'onda studiata. Infine, il segnale, raddrizzato e filtrato, viene mandato a un misuratore di RMS tarato. [31]
- Effettuando una conversione del segnale da analogico a digitale attraverso un apposito sistema di acquisizione, elaborando così il segnale attraverso determinati programmi di calcolo, come Python.

## 2.2. I MECCANISMI DI TRASMISSIONE DEL SUONO ALL'INTERNO DI EDIFICI

Il suono, per diffondersi all'interno di un ambiente ed essere percepito, richiede la presenza di un mezzo elastico. Quando l'energia acustica si diffonde all'interno di un edificio, tale mezzo è rappresentato sia dall'aria che dagli elementi strutturali dell'edificio stesso. Infatti, la trasmissione del suono all'interno di edifici avviene mediante due principali meccanismi di propagazione:

- Trasmissione per via aerea;
- Trasmissione per via strutturale.

Nel caso della trasmissione per via aerea, il mezzo di propagazione è l'aria e il suono si diffonde all'interno degli ambienti senza incontrare particolari impedimenti. In particolare, il suono passa attraverso qualsiasi fessura o piccola apertura e si riflette senza significative riduzioni d'intensità su qualsiasi superficie dura.

Nel caso della trasmissione per via strutturale, invece, la propagazione avviene attraverso la struttura solida dell'edificio per mezzo di vibrazioni elastiche. Accade quando il suono è generato dall'impatto di un oggetto o di un'onda sonora contro un elemento dell'edificio. L'impatto provoca vibrazioni, le quali generano onde sonore. Per questo meccanismo di trasmissione, inoltre, si è soliti parlare di trasmissione diretta e di trasmissione indiretta o laterale. In particolare, la trasmissione diretta avviene quando l'elemento che viene eccitato dall'impatto da una parte irradia direttamente dall'altra parte l'energia acustica. Invece, si parla di trasmissione indiretta o laterale quando, a seguito dell'impatto, l'elemento trasmette l'energia acustica a un elemento adiacente, il quale entra a sua volta in vibrazione. Questo tipo di trasmissione del suono deve sempre essere considerato attentamente, in quanto implica che aumentare eccessivamente l'isolamento acustico di un elemento oltre quello fornito dagli elementi ad esso adiacenti risulta inutile e dispendioso. Tuttavia, la trasmissione laterale è difficile da quantificare, in quanto è estremamente complicato riassumere il fenomeno dell'accoppiamento strutturale fra partizioni diverse, oltre al fatto per cui il contributo di questo tipo di trasmissione può variare in funzione all'accuratezza dei lavori di costruzione eseguiti. [32]

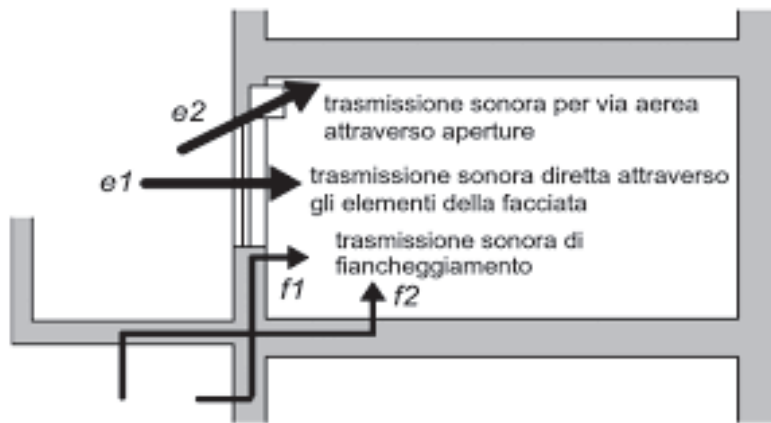


Fig.3: Meccanismi di trasmissione del suono negli edifici, con e1=trasmissione per via aerea, e2=trasmissione per via strutturale diretta, f1,f2=trasmissione per via strutturale indiretta [b]

### 2.3. IL POTERE FONOISOLANTE

Quando il fronte di un'onda sonora incide sulla superficie di un divisorio, l'energia trasportata dall'onda viene trasformata in vibrazione forzata o risonante della parete. Successivamente, l'energia della vibrazione meccanica della lastra si trasforma in:

- Energia dissipata sotto forma di calore;
- Energia acustica che ritorna per via aerea nell'ambiente da cui proviene l'onda incidente;
- Energia acustica che viene trasmessa all'ambiente adiacente

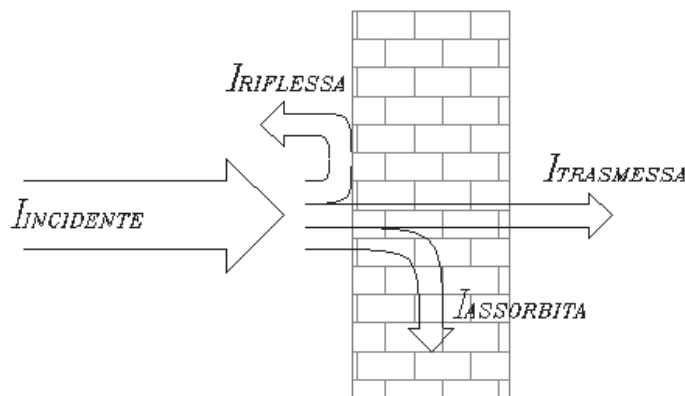


Fig.4: Distribuzione dell'energia sonora di un'onda incidente una superficie [c]

Indicando con  $I_{inc}$  la potenza che nell'unità di tempo incide sulla parete e rispettivamente con  $I_{rifl}$ ,  $I_{trasm}$  e  $I_{diss}$  le frazioni di potenza riflessa, trasmessa e dissipata dalla parete, è possibile scrivere la relazione:

$$I_{inc} = I_{rifl} + I_{trasm} + I_{diss}$$

Dividendo entrambi i membri dell'equazione per  $I_{inc}$  è possibile riscrivere tale relazione come:

$$1 = \rho + \tau + \delta$$

, dove  $\rho$  è il coefficiente di riflessione,  $\tau$  il coefficiente di trasmissione e  $\delta$  il coefficiente di assorbimento della parete. [33]

Generalmente, nell'acustica in edilizia è rivolta particolare attenzione al coefficiente di trasmissione. Infatti, questo rappresenta la capacità di una struttura che separa due ambienti di trasmettere energia acustica da un ambiente all'altro.

Di conseguenza, per ottenere un buon isolamento acustico è necessario che la parete in esame presenti un basso coefficiente di trasmissione. In questo senso, una delle grandezze più utilizzate nell'ambito dell'isolamento acustico viene definito proprio in relazione a questo coefficiente. Si definisce, infatti, il potere fonoisolante di un divisorio che separa due ambienti come:

$$R = 10 \log \left( \frac{1}{\tau} \right)$$

Tale grandezza rappresenta l'attitudine di un divisorio a ridurre la trasmissione del suono incidente su di essa. Tuttavia, dal momento che  $\tau$  non è misurabile direttamente, il potere fonoisolante viene determinato misurando i livelli sonori nell'ambiente emittente e nell'ambiente ricevente, utilizzando la relazione:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A}$$

, dove  $L_1$  è il livello di pressione sonora nell'ambiente emittente,  $L_2$  è il livello di pressione sonora nell'ambiente ricevente,  $S$  è la superficie del divisorio e  $A$  è l'assorbimento totale dell'ambiente ricevente. Quest'ultima grandezza viene utilizzata per tenere conto del contributo al campo sonoro della riflessione di onde sonore che avviene all'interno dell'ambiente ricevente e vale:

$$A = \frac{0,16 \cdot V}{T_{60}}$$

, dove  $V$  è il volume della camera ricevente e  $T_{60}$  è il tempo di riverberazione all'interno della stessa.

Il potere fonoisolante è una grandezza che dipende solo dalle caratteristiche della parete e viene misurato in laboratorio utilizzando due camere speciali tra le quali sono eliminati tutti i vincoli strutturali, in modo da ottenere solo trasmissione diretta attraverso la parete. Inoltre, si tratta di una grandezza che varia al variare della frequenza dell'onda sonora, pertanto viene generalmente misurato in bande di ottava o in bande di terzo di ottava.

Trattandosi di una grandezza misurata in laboratorio, tuttavia, non ha un grande utilizzo pratico, in quanto la conoscenza del potere fonoisolante di una parete o di un elemento di parete risulta utile soltanto in fase di progettazione. Infatti, per valutare la trasmissione di una parete o di un elemento di parete nelle condizioni di esercizio si utilizza il potere fonoisolante apparente  $R'$ . Si tratta di una grandezza del tutto analoga al potere fonoisolante, che però tiene conto anche della trasmissione indiretta. Per definizione, il potere fonoisolante apparente viene definito come:

$$R' = 10 \log \left( \frac{I_{inc}}{I_{trasm} + I_{lat}} \right)$$

$I_{lat}$  rappresenta la frazione di energia acustica trasmessa all'interno dell'ambiente ricevente attraverso strutture laterali. Si tratta di una grandezza che viene misurata in opera e dipende dalle caratteristiche di fonoisolamento del divisorio, dalle caratteristiche di fonoassorbimento del locale disturbato e dai collegamenti strutturali tra ambiente emittenti e ricevente. Anche questa grandezza dipende dalla frequenza dell'onda sonora e, a parità di livello di pressione sonora dell'ambiente emittente risulta sempre minore del potere fonoisolante.

Generalmente, viene utilizzato come misura dell'isolamento acustico in condizioni di esercizio di pareti divisorie o di facciate. Dal momento che la presente tesi tratta l'isolamento acustico di facciata, nel seguito verranno descritte soltanto le procedure descritte dalla UNI EN ISO 16283-3.

#### 2.4. LA NORMATIVA UNI EN ISO 16283-3

Per valutare il potere fonoisolante apparente di una facciata si possono utilizzare due diversi metodi. Il primo, chiamato metodo degli elementi, consiste nel determinare il potere fonoisolante apparente di un elemento che compone la facciata. Invece, il secondo metodo, chiamato metodo globale, consiste nell'effettuare le misurazioni per l'intera facciata.

La sorgente sonora da utilizzare per la valutazione dell'isolamento acustico di una facciata può essere di vario tipo. Tuttavia, le sorgenti sonore più utilizzate sono gli altoparlanti o il traffico stradale. Nel primo caso, un altoparlante deve essere una cassa chiusa contenente più unità diffusorie. Tutte le unità all'interno della cassa devono irradiare in fase e la direttività degli altoparlanti deve avere una radiazione omnidirezionale approssimativamente uniforme. Nel caso si utilizzi invece il traffico stradale, questo deve soddisfare diversi requisiti, ovvero:

- Il traffico deve fluire approssimativamente lungo una linea retta entro un angolo di visuale  $\pm 60^\circ$  dalla facciata;
- L'angolo di elevazione, osservato dal punto di minima distanza tra la facciata e la linea di traffico, deve essere minore di  $\pm 40^\circ$ ;
- Deve essere possibile la libera visuale della facciata dall'intera larghezza del flusso di traffico;
- La minima distanza orizzontale tra la linea di traffico e la facciata deve misurare almeno tre volte la larghezza della facciata sottoposta a prova, o 25 m, qualunque sia la larghezza.

##### 2.4.1. MISURAZIONE DEL LIVELLO DI PRESSIONE SONORA INTERNO

Il livello di pressione sonora interno viene misurato con la sorgente sonora in funzione all'esterno. All'interno della norma sono descritti tre diverse procedure di misurazione.

La prima consiste nell'utilizzare un minimo di cinque microfoni ripartiti uniformemente nel massimo spazio disponibile all'interno dell'ambiente ricevente. Nel secondo caso viene utilizzato un microfono che deve essere spostato meccanicamente con velocità angolare approssimativamente costante su un cerchio oppure su un percorso circolare dove l'angolo di rotazione su un asse fisso è compreso tra  $270^\circ$  e  $360^\circ$ . Nell'ultimo caso, infine, un microfono viene spostato manualmente da un operatore secondo una traiettoria che può essere un cerchio, una spirale, un percorso di tipo cilindrico o tre semicerchi.

Nel caso in cui vengano utilizzate posizioni microfoniche fisse, il livello medio di energia di pressione sonora nell'ambiente ricevente viene determinato utilizzando la formula:

$$L_2 = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{p,i}}{10}} \right)$$

, dove  $L_{p,i}$  è il livello di pressione sonora nella  $i$ -esima posizione microfonica.

Invece, quando vengono utilizzati il microfono meccanizzato a movimento continuo o il microfono a scansione manuale, il livello medio di energia di pressione sonora nell'ambiente ricevente è determinato utilizzando la formula:

$$L_2 = 10 \log \left( \frac{\frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} p^2(t) dt}{p_0^2} \right)$$

, dove  $T_m$  è il tempo di integrazione,  $p$  è la pressione sonora e  $p_0^2$  è la pressione sonora di riferimento.

Inoltre, quando vengono effettuate misurazioni all'interno dell'ambiente ricevente è essenziale determinare il livello del rumore di fondo. Questo dipende da diversi fattori, come suoni esterni all'ambiente di prova, disturbi elettrici nel sistema ricevente, dispositivi meccanici utilizzati per il microfono a movimento continuo e gli operatori all'interno dell'ambiente di prova. Il rumore di fondo viene misurato quando la sorgente sonora non è in funzione, con la stessa modalità in cui è stato misurato il livello di pressione sonora interna. Il livello del rumore di fondo deve essere almeno 6 dB minore del livello di pressione sonora interna misurato per ciascuna banda di frequenza. In particolare, se la differenza tra i livelli è minore di 10 dB ma maggiore di 6 dB, deve essere calcolata una correzione al livello medio di energia di pressione sonora attraverso la formula:

$$L_2 = 10 \log \left( 10^{\frac{L_{sb}}{10}} - 10^{\frac{L_b}{10}} \right)$$

, dove  $L_2$  è il livello corretto del segnale,  $L_{sb}$  è il livello medio di energia di pressione sonora interna misurato e  $L_b$  è il livello del rumore di fondo.

Nel caso in cui, invece, la differenza tra i livelli è minore o uguale a 6 dB in qualsiasi banda di frequenza, è necessario apportare una correzione di 1,3 dB.

#### 2.4.2. MISURAZIONE DEL TEMPO DI RIVERBERAZIONE

Il tempo di riverberazione è considerato l'indicatore principale delle caratteristiche di un ambiente. Deve essere misurato seguendo le procedure indicate dalla ISO 3382. Tale norma descrive due diversi metodi per la misurazione del tempo di riverberazione, ovvero il metodo del rumore interrotto e il metodo della risposta integrata all'impulso. Entrambi i metodi hanno lo stesso valore di probabilità, tuttavia il secondo richiede strumenti più sofisticati. Per questo motivo, per la determinazione dell'isolamento acustico in edilizia è solitamente utilizzato il primo metodo.

Il metodo del rumore interrotto consiste nell'eccitare l'ambiente in esame tramite una sorgente ad altoparlante in cui il segnale in ingresso deve essere derivato dal rumore elettrico a larga banda casuale o pseudocasuale.

Essenzialmente, una volta che l'altoparlante emette a regime, questo deve essere spento, andando così ad osservare il decadimento del campo sonoro. In particolare, la valutazione del tempo di riverberazione a partire dalla curva di decadimento deve iniziare a 5 dB sotto il livello iniziale di pressione sonora. L'intervallo di valutazione può essere di 20 dB o di 30 dB. In tale intervallo, si deve calcolare una linea adeguata ai minimi quadrati per la curva. La pendenza di tale linea fornisce il tasso di decadimento in decibel/secondo da cui è possibile calcolare il tempo di riverberazione  $T_{60}$ . [34]

### 2.4.3. MISURAZIONE DEL LIVELLO DI PRESSIONE SONORA ESTERNO

La misurazione del livello di pressione sonora esterno varia in base al metodo utilizzato.

Infatti, qualora si utilizzi il metodo degli elementi la misurazione deve essere eseguita sulla superficie dell'elemento in esame. Nel caso la sorgente sonora sia un altoparlante, allora si devono utilizzare un minimo di tre e un massimo di dieci posizioni microfoniche fisse a seconda della variazione del livello di pressione sonora tra le differenti posizioni. Normalmente, si inizia con tre posizioni microfoniche e se la differenza nel livello di pressione sonora tra qualsiasi due posizioni in una banda di frequenza è maggiore di 3 dB, allora è necessario aumentare il numero di posizioni. Nel caso, invece, in cui la sorgente sonora è il traffico stradale, è necessario valutare la geometria della facciata. In particolare, se la facciata è piatta e senza grandi rientranze o balconi si utilizzano tre posizioni microfoniche distribuite in modo uniforme ma asimmetricamente sulla superficie di misurazione. Se invece la facciata presenta grosse discontinuità o balconate si utilizzano cinque posizioni microfoniche. Comunque, in entrambi i casi il livello medio di pressione sonora esterna sulla superficie di prova deve essere determinato utilizzando la formula:

$$L_{1,s} = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right)$$

, dove  $L_i$  è il livello di pressione sonora misurato nella  $i$ -esima posizione microfonica.

Nel caso in cui si utilizzi il metodo globale, invece, la misurazione del livello di pressione sonora esterna deve essere effettuato a una distanza di 2 m davanti alla facciata. Tuttavia, se la facciata presenta ringhiere o sporgenze simili, la misurazione deve essere effettuata a 1 m da essa. L'altezza del microfono deve essere di 1,5 m dal pavimento dell'ambiente ricevente. Questo tipo di misurazione è la medesima utilizzando sia altoparlanti che il traffico stradale. Una volta effettuata la misurazione, il livello di pressione sonora esterno viene calcolato attraverso la formula:

$$L_{1,2m} = 10 \log \left( \frac{\frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} p^2(t) dt}{p_0^2} \right)$$

, dove  $T_m$  è il tempo di integrazione,  $p$  è la pressione sonora e  $p_0^2$  è la pressione sonora di riferimento.

### 2.4.4. DETERMINAZIONE DEL POTERE FONOISOLANTE DELLA FACCIATA

La determinazione del potere fonoisolante della facciata varia a seconda che si utilizzi un metodo degli elementi o un metodo globale.

Infatti, il metodo degli elementi fornisce come risultato della misurazione il potere fonoisolante apparente dell'elemento in esame attraverso la formula:

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} - K$$

, dove  $K$  è una costante che tiene conto del contributo della trasmissione laterale e vale 1,5 dB nel caso in cui la sorgente sonora sia un altoparlante e vale 3 dB se la sorgente è il traffico stradale. Va aggiunto che questa formula si basa sull'ipotesi che il campo sonoro nell'ambiente ricevente si approssimi a un campo diffuso.

#### 2.4.5. DETERMINAZIONE DELL'INDICE DI VALUTAZIONE $R'_w$

Dal momento che sia il potere fonoisolante  $R$  che il potere fonoisolante apparente  $R'$  vengono misurati in bande ottava o in bande di terzo d'ottava, la norma UNI EN ISO 717-1 fornisce un metodo per ridurre questi a un valore a singolo indice. Nel caso del potere fonoisolante apparente  $R'$  si parla di indice di valutazione del potere fonoisolante apparente  $R'_w$ , il quale è importante per poter confrontare il comportamento complessivo di pareti o di facciate in esercizio dal punto di vista dell'isolamento acustico e, soprattutto, per verificare la rispondenza ai valori limite previsti dalla legislazione italiana.

Il metodo descritto dalla ISO 717-1 consiste nel ricavare il valore del potere fonoisolante della parete o della facciata alle diverse bande di frequenza, così da poter costruire una curva sperimentale da confrontare con una curva teorica fornita dalla stessa norma. In particolare, il potere fonoisolante ponderato corrisponde al valore del potere fonoisolante della banda con frequenza centrale di 500 Hz indicato dalla curva teorica traslata a passi di 1 dB, quando la somma di tutti gli scostamenti positivi di questa dalla curva sperimentale sono minori di 32. [ISO 717-1]

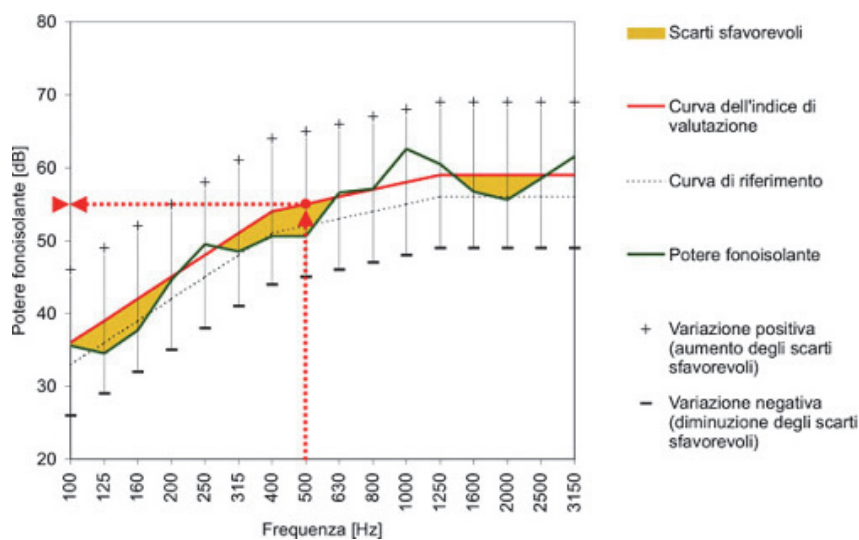


Fig.5: Grafico del metodo ISO 717-1 [d]



### 3. VALUTAZIONE DELL'INCERTEZZA DI MISURA ATTRAVERSO IL MODELLO ANALITICO

Nonostante allo stato attuale delle conoscenze sia impossibile formulare modelli analitici appropriati per la valutazione dell'incertezza nelle differenti grandezze dell'acustica in edilizia, frequentemente vengono utilizzati i principi di una simile valutazione per comprendere come le incertezze delle grandezze misurate contribuiscono all'incertezza complessiva. Infatti, effettuando un'analisi di questo tipo è possibile determinare a grandi linee quanto l'incertezza complessiva dipenda dalle varie incertezze di misura.

#### 3.1. IL MODELLO ANALITICO

In generale, un misurando  $Y$  è determinato da  $N$  grandezze in ingresso  $X_1, X_2, \dots, X_N$  per mezzo di una relazione funzionale, ovvero:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$$

Le grandezze in ingresso  $X_1, X_2, \dots, X_N$  possono a loro volta essere viste come misurandi e potrebbero dipendere da altre grandezze. Per questo motivo, ad ogni grandezza in ingresso è associata una distribuzione di probabilità. La sua attesa è la stima migliore del valore della grandezza in ingresso, indicata come  $x_i$ , e il suo scarto tipo è una misura della dispersione dei valori, definita incertezza.

L'incertezza associata alle grandezze in ingresso può essere di due tipi:

- Incertezza di tipo A:

Per ricavare l'incertezza di tipo A di una determinata grandezza si procede statisticamente con il metodo campionario, ripetendo  $N$  volte la misura. L'insieme di  $N$  misure è trattato come un campione estratto da una popolazione idealmente costituita da un numero infinito di misure la cui media coincide con la media della distribuzione di valori. Dagli  $N$  dati si ottengono la media del campione:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

E la stima dello scarto tipo:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

La misura sarà rappresentata dalla media mentre l'incertezza tipo sarà lo scarto tipo della media:

$$u(x) = \frac{S}{\sqrt{N}}$$

L'utilizzo dello scarto tipo della media deriva dall'assunzione che il valore che si vuole ottenere dalla misura è la media della popolazione di misure.

- Incertezza di tipo B:

Si differenzia dall'incertezza di tipo A in quanto la modalità con cui si ottiene non è di tipo "statistico-inferenziale" bensì è basata su conoscenze pregresse sull'operazione di misura, lo strumento utilizzato ecc. Questo tipo di incertezza è la sola applicabile qualora la ripetizione della misurazione non sia possibile. Inoltre è di notevole importanza nel caso si voglia effettuare una valutazione dell'incertezza di misura prima dell'effettiva misurazione, per capire quali grandezze siano più importanti nella determinazione del misurando.

Una stima  $y$  del misurando viene ottenuta da tale equazione utilizzando le stime  $x_1, x_2, \dots, x_N$  delle grandezze di input  $X_1, X_2, \dots, X_N$ .

Nel caso in cui le grandezze  $X_1, X_2, \dots, X_N$  non siano correlate fra loro, ovvero non dipendono da nessuna grandezza in comune, l'incertezza tipo composta della stima del misurando  $y$  è calcolabile come:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum c_i^2 u^2(x_i)}$$

, dove  $c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$  è definito coefficiente di sensibilità.

Quando è necessario definire un intervallo per il risultato di una misurazione  $y$  che contenga una larga frazione della distribuzione di valori che potrebbero essere ragionevolmente attribuiti al misurando viene usata l'incertezza estesa (?), ricavabile tramite:

$$U = k \cdot u_c(y)$$

, dove  $k$  è il fattore di copertura e dipende dal livello di confidenza dell'intervallo.

In definitiva, la valutazione della propagazione delle incertezze può essere schematizzata in questo modo:

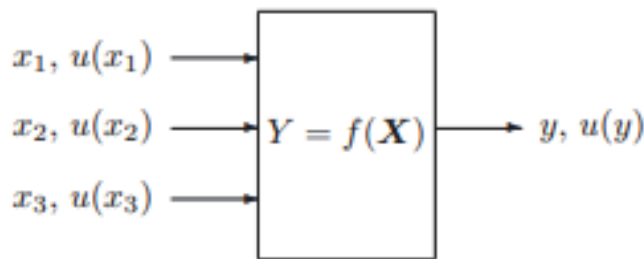


Fig.6 Schema del modello analitico di valutazione dell'incertezza [d]

### 3.2. PROPAGAZIONE DELLE INCERTEZZE NEL CALCOLO DEL POTERE FONOIOLANTE

Nel seguito viene illustrato il modello analitico di propagazione dell'incertezza, nel quale sono state considerate soltanto cinque grandezze, ovvero:  $L_1, L_2, b, h, l$  e  $T_{60}$ . La scelta di queste grandezze non è casuale, infatti sono le uniche grandezze che compaiono all'interno della formula che viene utilizzata per determinare il potere fonoisolante di una facciata. Inoltre, per tutte queste grandezze è stato considerato un grado di correlazione trascurabile. Le incertezze associate a ogni grandezza sono di tipo B e sono state assunte pari a:

- $u(L_1) = u(L_2) = 1 \text{ dB}$ :  
Questi valori di incertezza sono quelli solitamente utilizzati nelle misure di acustica in edilizia.
- $l = 3250 \text{ mm}$  ,  $u(l) = 10 \text{ mm}$ : tale incertezza corrisponde alla risoluzione dei metri a nastro
- $T_{60} = 1 \text{ s}$  ,  $u(T_{60}) = r_{30}$ :  $r_{30}$  rappresenta la ripetibilità che si osserva per la determinazione del tempo di riverberazione effettuando dieci mediazioni. Infatti, a causa della natura casuale del segnale di eccitazione, l'incertezza di misurazione del metodo del rumore interrotto dipende fortemente dal numero delle mediazioni eseguite.  $r_{30}$  può essere inteso come incertezza di  $T_{30}$ , quindi non è del tutto corretto assegnare una simile incertezza a  $T_{60}$ . Tuttavia, dal momento che  $T_{30}$  è un parametro necessario a ricavare il tasso di decadimento, è possibile assumere a grandi linee un'incertezza di  $T_{60}$  pari a  $r_{30}$ .

Inoltre, per entrambi i metodi è stato ricavato un budget dell'incertezza. Si tratta di uno strumento utile a pianificare e gestire in maniera controllata tutte le componenti dell'incertezza che incidono sulla misura. Inoltre, rappresenta l'acquisizione di una dimestichezza con alcuni termini significativi, un approfondimento di come i metodi di prova o taratura operano, nonché una disamina delle componenti delle apparecchiature e dell'ambiente che possono influenzare il sistema di misura. [35]

La formula fornita dalla normativa UNI EN ISO 16283-3 è la seguente:

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log\left(\frac{S}{A}\right) = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log\left(\frac{T_{60}}{0.16 \cdot l}\right)$$

I coefficienti di sensibilità avranno i seguenti valori:

- $\frac{\partial R}{\partial L_1} = 1$
- $\frac{\partial R}{\partial L_2} = 1$
- $\frac{\partial R}{\partial l} = \frac{10}{l \cdot \ln 10} = 1.34$
- $\frac{\partial R}{\partial T_{60}} = \frac{10}{T_{60} \cdot \ln 10} = 7.24$

Quindi, l'incertezza combinata del potere fonoisolante apparente  $R'$  sarà pari a:

$$u(R') = \sqrt{(1 \cdot u(L_1))^2 + (1 \cdot u(L_2))^2 + \left(\frac{10}{l \cdot \ln 10} \cdot u(l)\right)^2 + \left(\frac{10}{T_{60} \cdot \ln 10} \cdot u(T_{60})\right)^2}$$

Di seguito vengono mostrati i valori di incertezza del potere fonoisolante apparente per ogni banda di frequenza e il relativo budget dell'incertezza:

BANDA DI FREQUENZA:	$u(R')$
100	1.71
125	1.65
160	1.6
200	1.57
250	1.54
315	1.51
400	1.49
500	1.48
630	1.46
800	1.45
1000	1.45
1250	1.44
1600	1.43
2000	1.43
2500	1.43
3150	1.42

Tab.1: incertezza del potere fonoisolante valutata analiticamente

$x$	$\frac{\partial R'}{\partial x}$	$u(x)$		$\frac{\partial R'}{\partial x} * u(x)$	$\left(\frac{\partial R'}{\partial x} * u(x)\right)^2$
$L_1$	1	1		1	1
$L_2$	1	1		1	1
$b$	0	0.01		0	0
$h$	0	0.01		0	0
$l$	1.34	0.01		0.0134	0.00018
$T_{60}$	7.24	100 Hz	0.132 s	0.955	0.911
		125 Hz	0.118 s	0.854	0.729
		160 Hz	0.104 s	0.755	0.569
		200 Hz	0.093 s	0.675	0.456
		250 Hz	0.083 s	0.604	0.364
		315 Hz	0.074 s	0.538	0.289
		400 Hz	0.066 s	0.477	0.228
		500 Hz	0.059 s	0.427	0.182
		630 Hz	0.052 s	0.38	0.145
		800 Hz	0.047 s	0.337	0.114
		1000 Hz	0.042 s	0.302	0.091
		1250 Hz	0.037 s	0.270	0.073
		1600 Hz	0.033 s	0.239	0.057
		2000 Hz	0.029 s	0.213	0.046
		2500 Hz	0.026 s	0.191	0.036
3150 Hz	0.023 s	0.170	0.029		

Tab.2: budget dell'incertezza

#### 4. VALUTAZIONE DELL'INCERTEZZA TRAMITE METODO MONTE CARLO

Quando non è possibile effettuare una valutazione dell'incertezza secondo i principi descritti dalla GUM, un approccio alternativo è quello di effettuare una valutazione tramite il metodo Monte Carlo. Tale metodo consiste nel valutare in che modo le distribuzioni di probabilità delle grandezze in ingresso si propagano determinando la distribuzione di probabilità associabile al misurando.

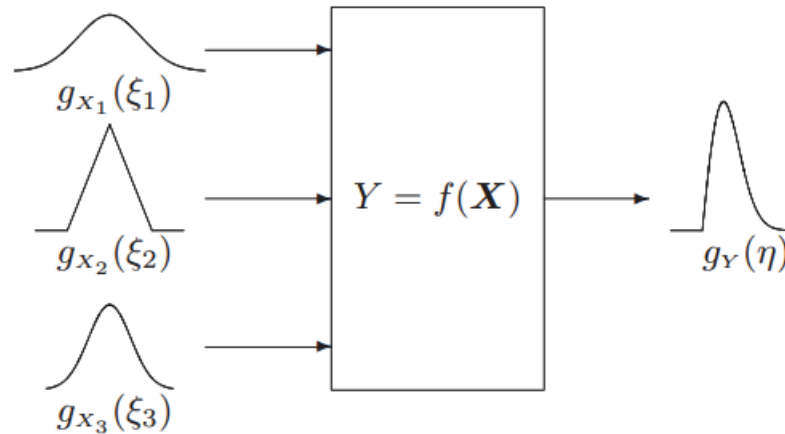


Fig.7: Schema del metodo Monte Carlo [e]

Una valutazione dell'incertezza di misura attraverso il metodo Monte Carlo è costituita da quattro principali elementi, ovvero:

- Parametri: grandezze che influenzano il modello, ma vengono specificate e sono dunque controllabili;
- Variabili di input: grandezze di ingresso dipendenti da eventi non controllabili, il cui andamento è tuttavia descrivibile sotto forma di probabilità;
- Variabili di output: corrispondono ai risultati della simulazione, che in questo particolare caso sono i valori del potere fonoisolante apparente  $R'$  alle diverse bande di frequenza;
- Modello: le relazioni funzionali che legano le grandezze di ingresso con quella in uscita. In questo caso, il modello utilizzato consiste nella relazione funzionale fornita dalla norma UNI EN ISO 16283-3.

Questo particolare metodo è fondato sul problema per cui una soluzione analitica del problema, che consente di ricavare in maniera diretta la relazione che lega l'output e i dati di ingresso, può risultare molto complesso, o addirittura impossibile. Per questo motivo, si procede attraverso un approccio numerico, in cui viene prodotto un numero  $M$  sufficientemente elevato di possibili combinazioni che le variabili di input possono assumere e calcolandone le variabili di output tramite le relazioni funzionali che costituiscono il modello. In particolare, il numero  $M$  di possibili combinazioni deve essere maggiore di  $N = 1000000$ , così da avere una popolazione di campioni il più possibile completa. Essenzialmente, ad ogni variabile di input viene associato un valore generato in maniera pseudo-casuale, ovvero all'interno delle distribuzioni di probabilità assunte per ogni variabile. Iterando questo procedimento per  $M$  volte, si ottengono  $M$  valori pseudo-casuali che l'output in questione può ragionevolmente assumere. Quindi, si ottiene una distribuzione di valori che può essere associata alla grandezza di uscita, dalla quale possono essere ricavati parametri descrittivi, come la media e la deviazione standard.

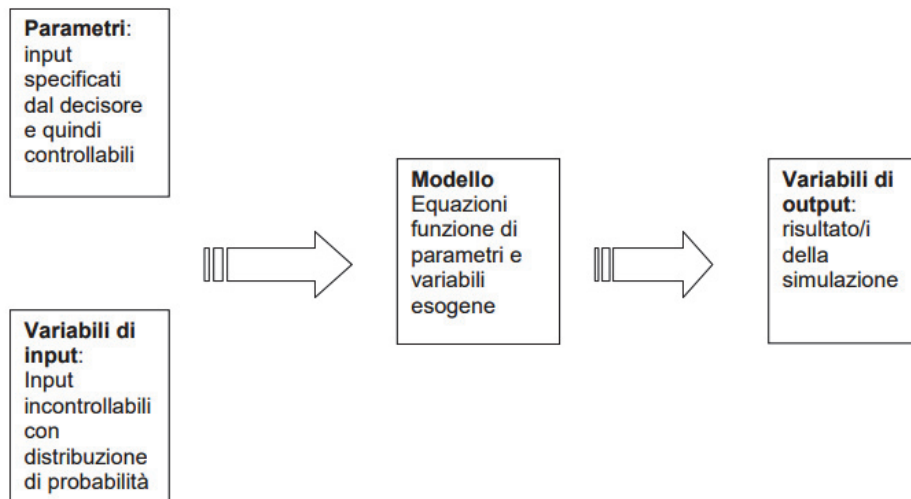


Fig.8: elementi del metodo Monte Carlo

Essenzialmente, gli step necessari all'applicazione di una tale simulazione sono i seguenti:

- a. Identificazione dei parametri e delle variabili di input:  
Occorre innanzitutto determinare gli elementi che influenzano la variabile di output, definendo quindi parametri e variabili di input. Uno dei pregi del metodo Monte Carlo è quello di poter includere all'interno del modello un ampio numero di parametri e variabili, così da avvicinarsi il più possibile alla realtà. Tuttavia, è necessario trovare un compromesso fra l'accuratezza della simulazione e la complessità di implementazione, pertanto generalmente ci si limita a definire soltanto le variabili più importanti per una simile analisi;
- b. Definizione del modello:  
In modo da ottenere la distribuzione di valori associabili alla grandezza in uscita, è importante definire le relazioni funzionali che legano tale grandezza ai parametri e alle variabili di input.
- c. Associazione delle distribuzioni di probabilità alle variabili di input:  
Ad ogni variabile di input deve essere attribuita una distribuzione di probabilità. Tale assegnazione può essere effettuata sia sulla base di dati quantitativi sia attraverso pareri soggettivi derivanti da conoscenza pregresse;
- d. Svolgimento della simulazione:  
Avendo gettato le basi per il metodo Monte Carlo, si definisce il piano degli esperimenti, fissando il numero di iterazioni necessarie, individuando la modalità migliore con cui riprodurre in maniera numerica le distribuzioni di probabilità delle variabili in ingresso, implementando gli algoritmi che generano i valori pseudo-casuali, ecc. Così facendo, è possibile effettuare la simulazione in modo da ricavare la distribuzione di valori che può essere attribuita alla grandezza di output

#### 4.1. VALUTAZIONE DELL'INCERTEZZA DI R' TRAMITE MONTECARLO

La seguente valutazione tramite metodo Monte Carlo è stata effettuando attraverso un programma apposito su Python. Tale programma consiste nel generare due vettori con valori pseudo casuali compresi fra  $-1$  e  $+1$ , con lo scopo di ottenere due diverse distribuzioni, una normale e una uniforme. Successivamente, a seconda della distribuzione di valori che si è ipotizzato

caratterizzare ogni grandezza di ingresso, è stata associata una delle due distribuzioni a ciascuna di tali grandezze. In particolare:

- Per i livelli di pressione sonora e il tempo di riverberazione è stata considerata una distribuzione normale;
- Per le grandezze che caratterizzano la geometria dell'ambiente interno è stata considerata una distribuzione uniforme.

Avendo ottenuto quindi una dispersione di dati per ogni grandezza di ingresso, è stato calcolato il potere fonoisolante apparente  $R'$  ad ogni banda di frequenza utilizzando tutte le combinazioni possibili date dalla perturbazione delle variabili di input. Infine, noti tutti i valori che  $R'$  può assumere, per ogni banda di frequenza sono state ricavate media e deviazione standard. Così facendo, sono stati ottenuti i seguenti risultati:

Banda	Media	Deviazione standard
100	26,18	0,88
125	24,58	0,85
160	23,17	0,82
200	16,17	0,80
250	25,16	0,79
315	23,86	0,78
400	33,86	0,77
500	32,95	0,76
630	35,65	0,75
800	33,85	0,75
1000	33,65	0,74
1250	36,34	0,74
1600	38,84	0,74
2000	41,84	0,73
2500	44,54	0,73
3150	39,04	0,73

Tab.3: Risultati della valutazione con metodo Monte Carlo

#### 4.2. ANALISI DI SENSITIVITÀ

Attraverso il metodo Monte Carlo è possibile effettuare anche un'analisi di sensibilità. L'analisi di sensibilità ha lo scopo di studiare come l'incertezza del misurando varia in base alla variazione delle differenti grandezze da cui dipende. Un'analisi di questo tipo è fondamentale per comprendere quali grandezze influiscano maggiormente nell'incertezza del misurando.

Per effettuare un'analisi di sensitività è necessario:

- Assegnare a ogni grandezza una determinata distribuzione;
- Perturbare il modello variando una determinata grandezza di input, mantenendo le altre alla condizione di riferimento;
- Calcolare la varianza del misurando dovuta alla variazione della grandezza in esame  $V_{x_i}$ ;
- Ripetere i punti precedenti per tutte le variabili di input;
- Perturbare il modello variando tutte le grandezze di ingresso e calcolare la varianza del misurando  $V_{tot}$ ;
- Calcolare l'indice di sensitività attraverso la formula:

$$S_i = \frac{V_{x_i}}{V_{tot}}$$

Effettuando questo tipo di analisi sono stati ottenuti i seguenti risultati:

Varianza $L_1$	Varianza $L_2$	Varianza $l$	Varianza $T_{60}$
34,31	34,31	0,01	31,37
36,63	36,63	0,01	26,73
38,92	38,92	0,01	22,15
40,73	40,73	0,01	18,53
42,30	42,30	0,01	15,38
43,69	43,69	0,01	12,60
44,90	44,90	0,01	10,19
45,83	45,83	0,01	8,32
46,63	46,63	0,01	6,72
47,31	47,31	0,01	5,37
47,82	47,82	0,01	4,34
48,24	48,24	0,01	3,51
48,61	48,61	0,01	2,76
48,88	48,88	0,01	2,22
49,10	49,10	0,01	1,79
49,28	49,28	0,01	1,42

Tab.4: risultati dell'analisi di sensitività effettuata tramite metodo Monte Carlo

In particolare, si nota che i livelli di pressione sonora sono le grandezze che influenzano maggiormente il potere fonoisolante apparente  $R'$ , mentre quelle meno influenti sono le grandezze che definiscono la geometria dell'ambiente. Inoltre, si nota che il tempo di riverberazione ha una discreta influenza alle basse frequenze, mentre risulta quasi trascurabile alle alte.

Bande	MODELLO ANALITICO				METODO MONTE CARLO			
	$S_{L_1}$	$S_{L_2}$	$S_l$	$S_{T_{60}}$	$S_{L_1}$	$S_{L_2}$	$S_l$	$S_{T_{60}}$
100	34,35	34,35	0,01	31,30	34,31	34,31	0,01	31,37
125	36,64	36,64	0,01	26,71	36,63	36,63	0,01	26,73
160	38,92	38,92	0,01	22,16	38,92	38,92	0,01	22,15
200	40,72	40,72	0,01	18,55	40,73	40,73	0,01	18,53
250	42,29	42,29	0,01	15,41	42,30	42,30	0,01	15,38
315	43,68	43,68	0,01	12,63	43,69	43,69	0,01	12,60
400	44,88	44,88	0,01	10,22	44,90	44,90	0,01	10,19
500	45,82	45,82	0,01	8,35	45,83	45,83	0,01	8,32
630	46,62	46,62	0,01	6,74	46,63	46,63	0,01	6,72
800	47,30	47,30	0,01	5,39	47,31	47,31	0,01	5,37
1000	47,82	47,82	0,01	4,36	47,82	47,82	0,01	4,34
1250	48,24	48,24	0,01	3,52	48,24	48,24	0,01	3,51
1600	48,61	48,61	0,01	2,77	48,61	48,61	0,01	2,76
2000	48,88	48,88	0,01	2,23	48,88	48,88	0,01	2,22
2500	49,10	49,10	0,01	1,79	49,10	49,10	0,01	1,79
3150	49,28	49,28	0,01	1,43	49,28	49,28	0,01	1,42

Tab.5: coefficienti di sensibilità a confronto fra il modello analitico e il metodo Monte Carlo



In ogni caso, è da osservare che questi risultati rispecchiano del tutto il trend già riscontrato nel budget dell'incertezza ottenuto tramite il modello analitico descritto dalla GUM. Questo è dovuto al fatto per cui fra le due valutazioni sono state assunte le stesse incertezze relative alle variabili di input, mentre i loro coefficienti di sensibilità si sono mantenuti in proporzione fra le due valutazioni. Infatti, calcolando i coefficienti di sensibilità degli input nella simulazione di Monte Carlo, come indicato dalla guida, si nota che, seppure assumendo valori diversi da quelli del modello analitico, mantengono comunque gli stessi contributi.

## 5. MISURAZIONI

Lo scopo della presente tesi è quello di valutare l'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente  $R'_w$  di una facciata posta in corrispondenza di un sottopasso.



Fig.9: Facciata su cui sono state effettuate le procedure di prova

La facciata in questione misura  $4,430\text{ m}$  in larghezza e  $3,380\text{ m}$  in altezza, mentre la profondità della stanza a cui appartiene misura  $3,250\text{ m}$ . In seguito vengono descritte le procedure di prova effettuate per determinare i valori del potere fonoisolante alle diverse bande di frequenza.

### 5.1. PROCEDURA DI PROVA PER LA DETERMINAZIONE DEL TEMPO DI RIVERBERAZIONE

Per determinare il tempo di riverberazione all'interno dell'ambiente ricevente la sorgente sonora è stata posta all'interno della stanza. Utilizzando il metodo del rumore interrotto, si è ottenuto un segnale che corrisponde alla variazione di pressione sonora nel tempo.

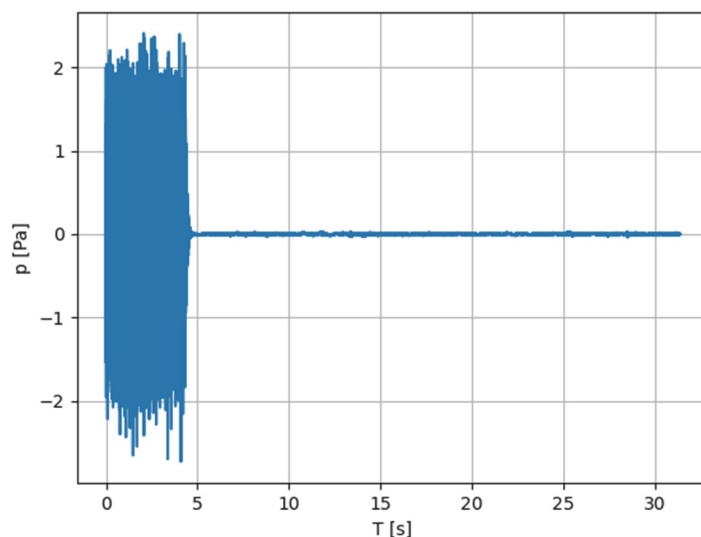


Fig.10: Segnale digitale ottenuto da una misurazione per il tempo di riverberazione  $T_{60}$

Dal momento che il tempo di riverberazione di un ambiente rappresenta il tempo necessario affinché il livello di pressione sonora decada di 60 dB a seguito dello spegnimento della sorgente sonora, si è reso necessario convertire i valori di pressione sonora in livelli di pressione sonora, attraverso la formula:

$$L = 10 \log \left( \frac{p^2}{p_{rif}^2} \right)$$

, dove  $p_{rif} = 20 \cdot 10^{-6} Pa$  corrisponde alla minima variazione di pressione sonora percettibile dall'orecchio umano in aria. Così facendo, si è ottenuto un segnale molto più utile per determinare il tempo di riverberazione come descritto nella ISO 3382, cioè:

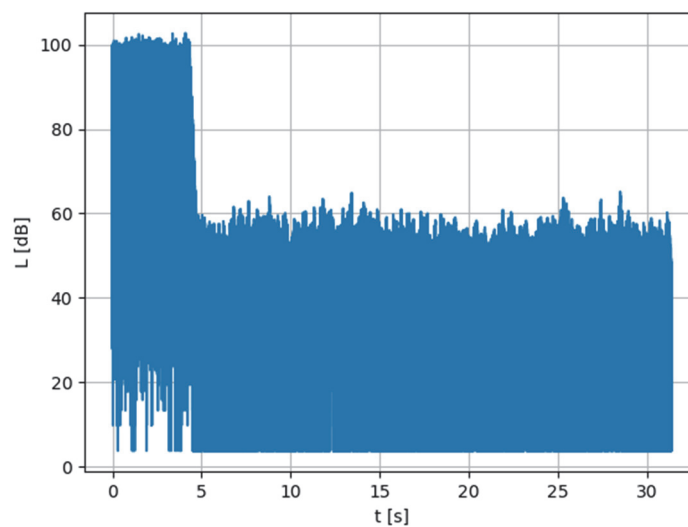


Fig.11: Segnale convertito in termini di livelli di pressione sonora

Tuttavia, tale segnale non era ancora analizzabile a causa del rumore presente all'interno di esso. Pertanto, per ridurre significativamente il contributo del rumore, il segnale è stato filtrato nei seguenti modi:

- Operando una media mobile semplice. Si tratta di un'operazione molto utilizzata nell'analisi delle serie storiche. Essenzialmente, consiste nel calcolare la media di un set di  $n$  dati che si susseguono temporalmente all'interno di un set di  $m$  dati (quindi  $m > n$ ). Successivamente, dallo stesso set viene sostituito il primo dato con l'  $n + 1$ -esimo dato, andando nuovamente a effettuare la media. Si continua ad eseguire questo procedimento fino a che la media non comprende l'ultimo dato disponibile, ovvero l'  $m$ -esimo.
- Operando una media mobile esponenziale. Essenzialmente, si tratta di un'operazione che riprende il procedimento visto nel punto precedente. Tuttavia, la particolarità di questo metodo è che il numero  $n$  di dati su cui si effettua la media non è fisso, ma variabile. In particolare, il numero di dati su cui si effettua la media decresce esponenzialmente man mano che ci si avvicina all'ultimo dato. Questo procedimento viene effettuato nei casi in cui si vuole dare più importanza ai dati più recenti
- Ricavando l'involuppo superiore del segnale. In pratica, si ottiene una curva che passa per tutti i punti di massimo locale del segnale considerato. Viene considerato il metodo più efficace, in quanto l'involuppo di un segnale

rappresenta in maniera migliore la forma della curva di decadimento rispetto ai metodi elencati sopra.

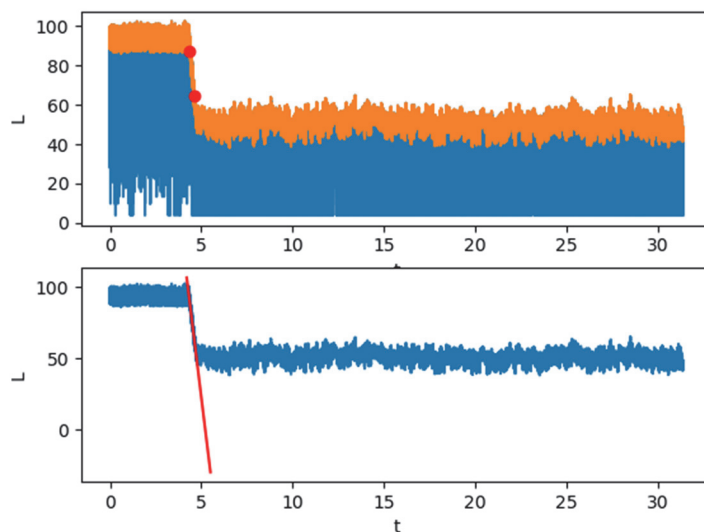


Fig.12: Nel grafico in alto, in blu è rappresentato il segnale di variazione del livello di pressione sonora nel tempo, in arancione l'involuppo di tale segnale. Nel grafico in basso viene rappresentata la linea dei minimi quadrati della curva di decadimento

Una volta filtrato il segnale, si è ricavato il tasso di decadimento individuando la curva di decadimento, seguendo il procedimento descritto nel capitolo precedente. In ogni caso, si è notato che, filtrando il segnale in tutti i modi elencati sopra, il tempo di riverberazione all'interno dell'ambiente ricevente assumeva valori intorno agli 0,6 s.

## 5.2. PROCEDURA DI PROVA PER LA DETERMINAZIONE DEI LIVELLI DI PRESSIONE SONORA ESTERNO E INTERNO

Per la determinazione dei livelli di pressione sonora esterno e interno sono stati utilizzati un altoparlante e ventuno microfoni. In particolare, all'esterno, in prossimità della facciata, è stato posto un microfono, mentre nell'ambiente interno sono stati posizionati quattro supporti microfonici, su ognuno dei quali sono stati collegati cinque microfoni.



Fig.13: Due supporti microfonici con 5 microfoni ciascuno

Le procedure di prova effettuate sono otto in totale. Infatti, sono state utilizzate quattro diverse configurazioni, con ognuna delle quali si è impostato il guadagno dell'altoparlante prima a tre quarti e poi a metà del fondo scala. Il cambio di settaggio dell'altoparlante è stato operato per valutare se, diminuendo il livello di pressione sonora esterno, anche l'isolamento fornito dalla facciata diminuisce.

Le quattro diverse configurazioni sono:

- Sorgente sonora inclinata di 0° rispetto alla normale alla superficie della facciata con finestre chiuse;
- Sorgente sonora inclinata di 45° rispetto alla normale alla superficie della facciata con finestre chiuse;
- Sorgente sonora inclinata di 0° rispetto alla normale alla superficie della facciata con una finestra aperta;
- Sorgente sonora inclinata di 45° rispetto alla normale alla superficie della facciata con una finestra aperta.

Riguardo alle prime due, la seconda configurazione è quella indicata dalla normativa UNI EN ISO 16283-3, mentre la prima non viene nemmeno descritta all'interno di essa. L'esigenza di utilizzare questa particolare configurazione è data dal fatto che, trovandosi in presenza di un sottopasso, la riflessione sulla facciata che si ottiene utilizzando la configurazione indicata può determinare un aumento del livello di pressione sonora interno a causa della trasmissione indiretta che avviene attraverso il soffitto del sottopasso. Invece, le configurazioni con una finestra aperta sono state effettuate per valutare la perdita di isolamento acustico fornito dalla facciata nel caso in cui questa si rovini.

#### 5.2.1. RISULTATI DELLE PROCEDURE DI PROVA CON FINESTRA CHIUSA

Banda di frequenza	D con 0° G=3/4 finestre chiuse	D con 0° G=1/2 finestre chiuse	D con 45° G=3/4 finestre chiuse	D con 45° G=1/2 finestre chiuse
100	25,4	26,2	25,6	24,9
125	25,2	25,7	23,9	24,9
160	21,2	21,8	22,6	22,4
200	18,9	18,5	15,5	15,6
250	23,1	22,4	24,5	24,9
315	21,9	21,7	23,2	22,7
400	31,3	30,4	33,2	32,4
500	31,7	31,3	32,3	31,7
630	36,6	35,6	34,9	34,6
800	33,8	32,9	33,2	32,8
1000	33,2	33,0	32,9	32,7
1250	34,1	33,9	35,7	35,5
1600	37,9	37,5	38,2	38,0
2000	42,6	41,9	41,1	41,1
2500	43,8	43,6	43,9	43,8
3150	39,7	39,6	38,5	38,6

Tab.6: Risultati delle diverse procedure di prova effettuate sulla facciata con le finestre chiuse

Osservando i risultati di prova, si nota che in entrambe le configurazioni adottate, la variazione di guadagno comporta una leggera differenza nei valori di isolamento acustico. In particolare, si osserva che, nel caso in cui si utilizzi la configurazione predefinita, tale differenza è concentrata soprattutto alle basse frequenze, mentre utilizzando la configurazione alternativa tale differenza è estesa anche alle medie frequenze.

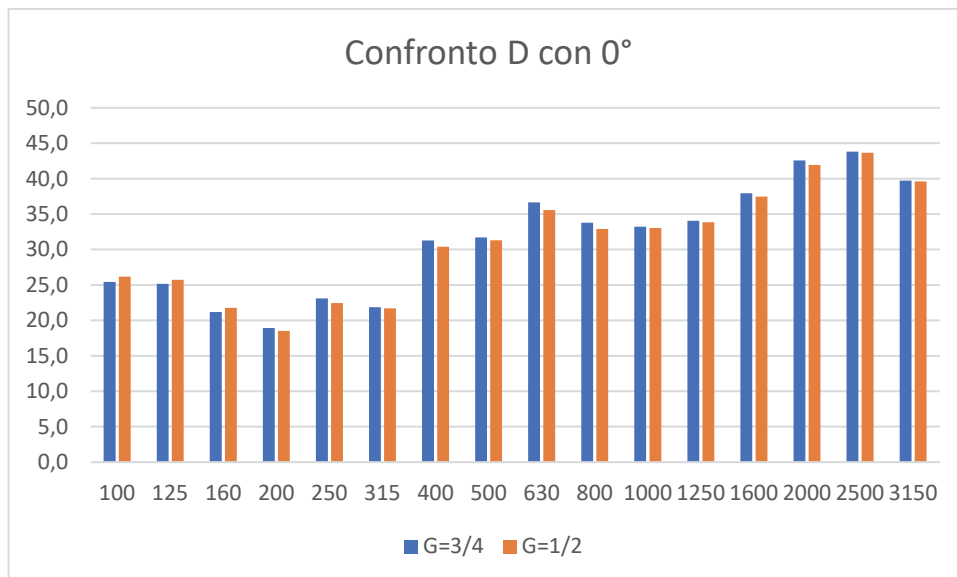


Fig.14: Confronto dei valori di isolamento acustico ottenuti inclinando la sorgente sonora di 0°

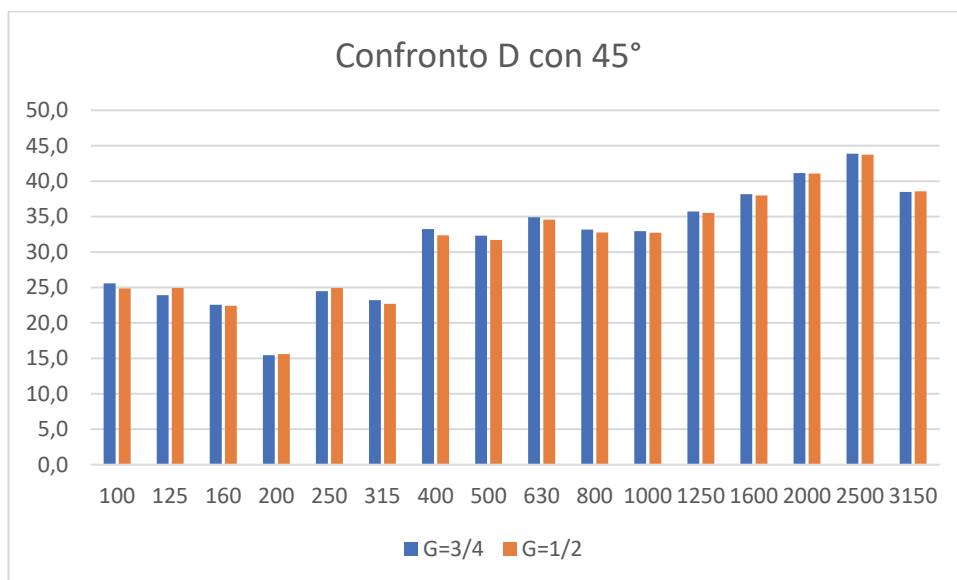


Fig.15: Confronto dei valori di isolamento acustico ottenuti inclinando la sorgente sonora di 45°

Invece, confrontando i dati ottenuti con stesso guadagno dell'altoparlante ma con diversa configurazione, si osserva che, generalmente, i valori di isolamento acustico ottenuti attraverso la configurazione predefinita sono minori rispetto a quelli ottenuti inclinando la sorgente sonora di 0°.

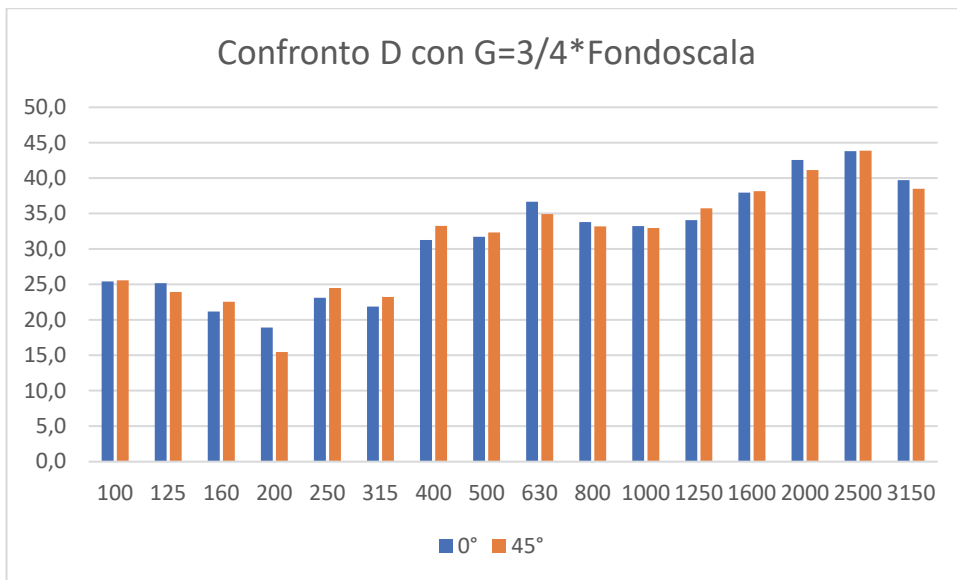


Fig.16: Confronto dei valori di isolamento acustico ottenuti con  $G=3/4*FS$  utilizzando diverse inclinazioni

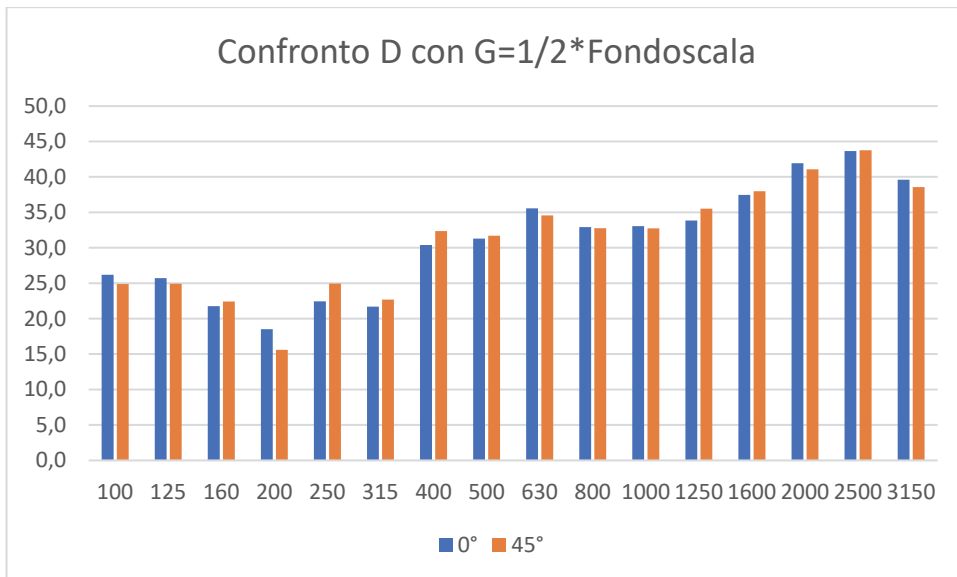


Fig.17: Confronto dei valori di isolamento acustico ottenuti con  $G=1/2*FS$  utilizzando diverse inclinazioni

Pertanto, sebbene le diverse configurazioni presentino risultati di misura leggermente diversi, inclinare la sorgente sonora di  $0^\circ$  rispetto alla normale alla superficie della facciata non comporta risultati di misura incompatibili in confronto a quelli ottenibili tramite la configurazione indicata dalla norma UNI EN ISO 16283-3. Inoltre, si è notato che modificando il guadagno dell'altoparlante e, quindi il livello di rumore a cui viene sottoposta la facciata, l'isolamento acustico fornito dalla facciata non cambia.

Per sottolineare quanto scritto in precedenza, di seguito viene mostrato che i risultati delle diverse procedure effettuate restituiscono in ogni caso valori compatibili fra loro. Infatti, si osserva che per ogni banda di frequenza, lo scostamento dei risultati di ogni configurazione dalla media rimane al di sotto del 5%, tranne che nella banda di frequenza con frequenza centrale di 200 Hz.

Bande di frequenza	Media	u(D)	Scarto% con 0° G=3/4 finestra chiusa	Scarto% con 0° G=1/2 finestra chiusa	Scarto% con 45° G=3/4 finestra chiusa	Scarto% con 45° G=1/2 finestra chiusa
100	25,5	0,3	0,4	2,6	0,3	2,5
125	24,9	0,4	0,9	3,1	4	0
160	22	0,3	3,7	-1	2,6	2
200	17,1	0,9	10,5	8,2	9,7	8,9
250	23,7	0,6	2,7	5,5	3,1	5
315	22,4	0,4	2,3	-3	3,8	1,4
400	31,8	0,6	1,7	4,5	4,5	1,7
500	31,8	0,2	0,2	1,4	1,8	0,2
630	35,4	0,5	3,5	0,4	1,4	2,4
800	33,2	0,2	1,9	0,8	0	1,2
1000	33	0,1	0,7	0,2	0,1	0,8
1250	34,8	0,5	2,1	2,7	2,7	2,1
1600	37,9	0,2	0,1	1,1	0,7	0,3
2000	41,7	0,4	2,1	0,6	1,3	1,4
2500	43,8	0	0,1	0,3	0,2	0
3150	39,1	0,3	1,6	1,3	1,6	1,3

Tab.7: Scarti dei risultati delle varie procedure dalla media dei risultati ottenuti

Infine, osservando la variabilità dei livelli di pressione sonora interna misurati dai diversi microfoni posizionati all'interno della stanza, si nota che il campo sonoro all'interno dell'ambiente ricevente può essere approssimato a un campo sonoro perfettamente diffuso, come indicato nella norma UNI EN ISO 16283-3. Questo è dovuto al massiccio campionamento effettuato nell'ambiente interno attraverso i 20 microfoni.

Banda di frequenza	$u(L_2)$ con 0° G=3/4 finestre chiuse	$u(L_2)$ con 0° G=1/2 finestre chiuse	$u(L_2)$ con 45° G=3/4 finestre chiuse	$u(L_2)$ con 45° G=1/2 finestre chiuse
100	1,1	1,0	1,1	1,0
125	0,6	0,6	0,7	0,6
160	0,6	0,5	0,7	0,7
200	0,7	0,6	0,7	0,6
250	0,5	0,4	0,6	0,6
315	0,6	0,6	0,6	0,6
400	0,5	0,5	0,5	0,5
500	0,6	0,6	0,5	0,5
630	0,4	0,4	0,5	0,4
800	0,4	0,4	0,3	0,3
1000	0,4	0,3	0,5	0,5
1250	0,4	0,4	0,4	0,4
1600	0,4	0,4	0,4	0,4
2000	0,4	0,4	0,4	0,4
2500	0,4	0,4	0,4	0,4
3150	0,4	0,4	0,3	0,4

Tab.8: Variabilità del campo sonoro osservata utilizzando le diverse configurazioni



## 5.2.2. RISULTATI DELLE PROCEDURE DI PROVA CON UNA FINESTRA APERTA

Banda di frequenza	D con 0° G=3/4 finestra aperta	D con 0° G=1/2 finestra aperta	D con 45° G=3/4 finestra aperta	D con 45° G=1/2 finestra aperta
100	15,4	18,2	16,2	16,1
125	12,0	13,3	9,6	9,6
160	7,2	11,3	11,4	11,3
200	9,4	11,1	7,0	7,0
250	6,6	7,8	10,6	10,3
315	9,8	9,8	9,3	9,6
400	10,1	10,7	10,8	10,9
500	10,1	10,3	10,8	10,8
630	9,4	9,5	11,5	11,5
800	7,8	7,7	9,7	9,8
1000	9,7	9,7	10,2	10,1
1250	8,8	9,1	10,9	10,9
1600	10,0	10,6	12,3	12,3
2000	9,6	10,2	12,5	12,6
2500	11,2	11,8	12,5	12,5
3150	10,9	11,3	13,5	13,4

Tab.9: Risultati delle diverse procedure di prova effettuate sulla facciata con una finestra aperta

I dati ottenuti effettuando delle procedure di prova con una finestra aperta mostrano che la configurazione indicata dalla norma fornisce risultati più affidabili alle basse frequenze rispetto a quelli ottenibili con la sorgente sonora inclinata di 0° rispetto alla normale alla superficie della facciata. Infatti, variando il livello di emissione della sorgente sonora si nota che i valori di isolamento acustico misurati variano maggiormente utilizzando un'inclinazione di 0° rispetto a quelli ottenibile con un'inclinazione della sorgente di 45°.

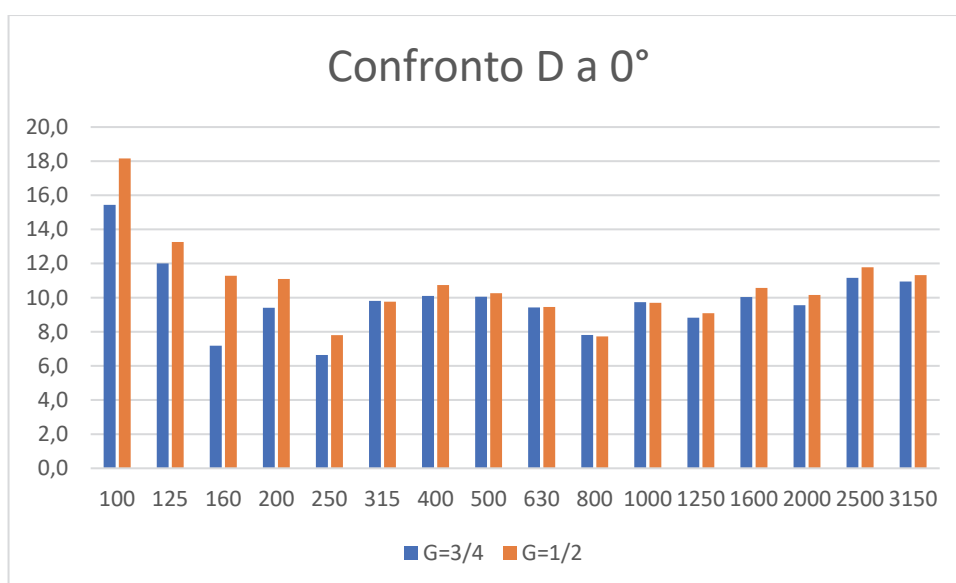


Fig.18: Confronto dei valori di isolamento acustico ottenuti inclinando la sorgente sonora di 0°

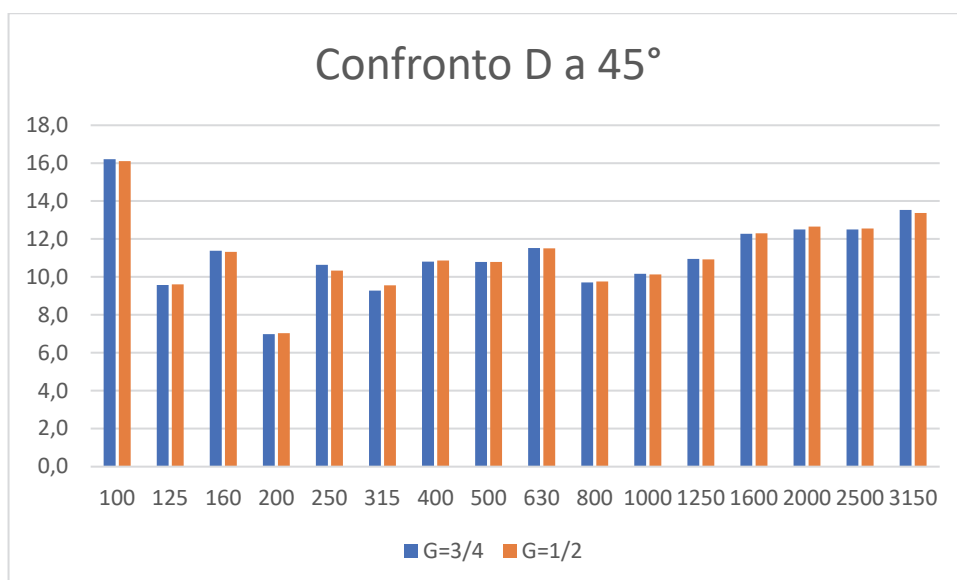


Fig.19: Confronto dei valori di isolamento acustico ottenuti inclinando la sorgente sonora di 45°

### 5.3. DETERMINAZIONE DEL POTERE FONOISOLANTE APPARENTE $R'$

Utilizzando la formula fornita dalla norma per determinare il potere fonoisolante apparente con i dati ottenuti dalle prove descritte nei paragrafi precedenti, si ottengono questi valori:

Bande di frequenza	$R'$ con 0°	$R'$ con 0°	$R'$ con 45°	$R'$ con 45°	$R'$ con 0°	$R'$ con 0°	$R'$ con 45°	$R'$ con 45°
	G=3/4 finestre chiuse	G=1/2 finestre chiuse	G=3/4 finestre chiuse	G=1/2 finestre chiuse	G=3/4 finestra aperta	G=1/2 finestra aperta	G=3/4 finestra aperta	G=1/2 finestra aperta
100	24,5	25,3	24,7	24	14,6	17,3	15,3	15,2
125	24,3	24,8	23	24,1	11,1	12,4	8,7	8,7
160	20,3	20,9	21,7	21,5	6,3	10,4	10,5	10,4
200	18	17,6	14,6	14,7	8,5	10,2	6,1	6,2
250	22,2	21,6	23,6	24,1	5,8	6,9	9,8	9,5
315	21	20,8	22,3	21,8	8,9	8,9	8,4	8,7
400	30,4	29,5	32,4	31,5	9,2	9,9	9,9	10
500	30,8	30,4	31,4	30,8	9,2	9,4	9,9	9,9
630	35,8	34,7	34	33,7	8,5	8,6	10,6	10,6
800	32,9	32	32,3	31,9	6,9	6,8	8,8	8,9
1000	32,3	32,2	32,1	31,9	8,9	8,8	9,3	9,2
1250	33,2	33	34,9	34,6	8	8,2	10,1	10
1600	37,1	36,6	37,3	37,1	9,2	9,7	11,4	11,4
2000	41,7	41	40,3	40,2	8,7	9,3	11,6	11,8
2500	42,9	42,8	43	42,9	10,3	10,9	11,6	11,7
3150	38,8	38,7	37,6	37,7	10,1	10,4	12,7	12,5

Tab.9: Valori ottenuti del potere fonoisolante apparente  $R'$  alle diverse bande di frequenza per ogni procedura effettuata

Plottando i seguenti valori, si nota che tutti le osservazioni fatte a riguardo dei diversi valori misurati di isolamento acustico possono essere fatte anche per i valori riguardanti il potere fonoisolante apparente  $R'$ .

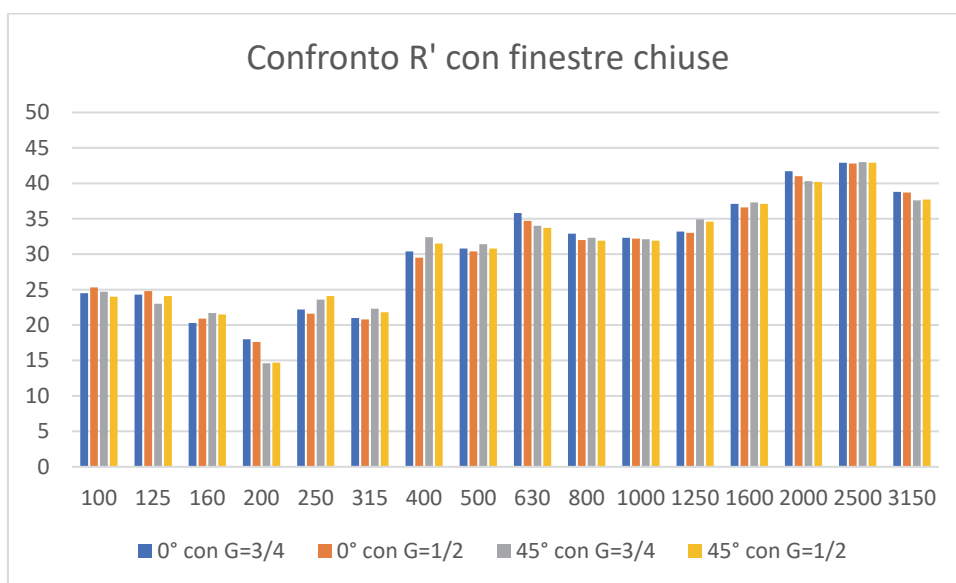


Fig.20: Confronto dei valori di potere fonoisolante apparente ottenuti attraverso le varie procedure di prova con le finestre chiuse

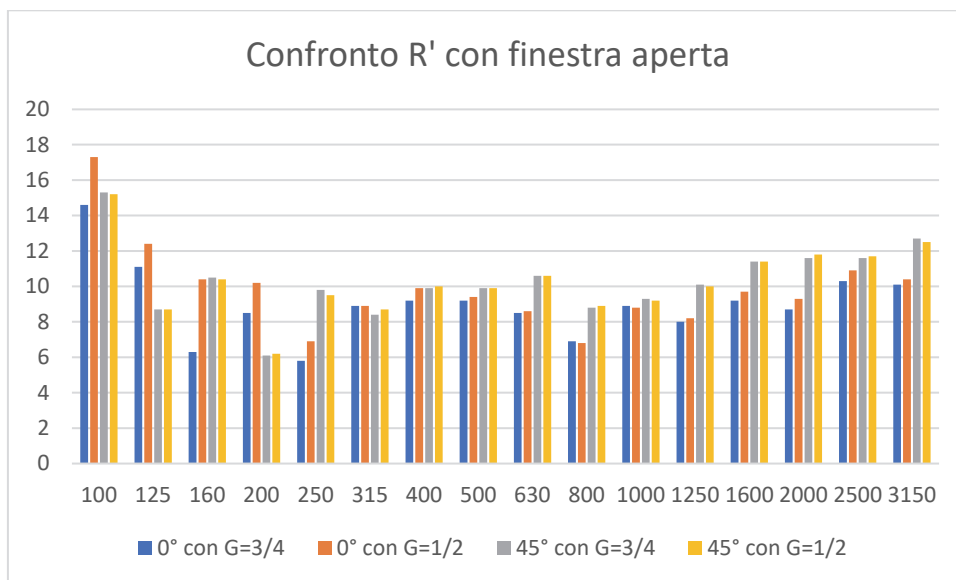


Fig.19: Confronto dei valori di potere fonoisolante apparente ottenuti attraverso le varie procedure di prova con una finestra aperta

Si evidenzia, infatti, che, nel caso in cui le procedure sono state effettuate con le finestre chiuse, i valori di potere fonoisolante apparente alle diverse bande di frequenza sono pressoché simili, mentre nel caso in cui è stata lasciata una finestra aperta, vi sono differenze sostanziali fra i valori misurati con un'inclinazione di 0° e con un'inclinazione di 45°.

Comunque sia, ricavando il valore dell'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente  $R'_w$  tramite la procedura fornita dalla norma ISO 717-1, si ottengono i seguenti risultati:

Configurazione	$R'_w$ a passi di 1 dB	$R'_w$ a passi di 0,1 dB
<b><math>R'</math> con 0° G=3/4 finestre chiuse</b>	33	33,2
<b><math>R'</math> con 0° G=1/2 finestre chiuse</b>	32	32,7
<b><math>R'</math> con 45° G=3/4 finestre chiuse</b>	33	33,4
<b><math>R'</math> con 45° G=1/2 finestre chiuse</b>	33	33,2
<b><math>R'</math> con 0° G=3/4 finestra aperta</b>	9	9,5
<b><math>R'</math> con 0° G=1/2 finestra aperta</b>	9	9,7
<b><math>R'</math> con 45° G=3/4 finestra aperta</b>	11	11,2
<b><math>R'</math> con 45° G=1/2 finestra aperta</b>	11	11,3

Tab.10: Valori dell'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente  $R'_w$ , ottenuti per ogni procedura effettuata

Si nota che, spostando la curva di riferimento fornita dalla ISO 717-1 a passi di 0,1 dB, nelle procedure di prova in cui le finestre sono state tenute chiuse il valore dell'indice di valutazione assume valori nell'intorno  $33,1 \pm 0,4$  dB. Invece, nelle procedure di prova in cui è stata tenuta una finestra aperta, l'indice di valutazione assume valori molto differenti a seconda della configurazione utilizzata.

## 6. CONCLUSIONI

In conclusione, in merito alla valutazione dell'incertezza nella stima dell'indice del potere fonoisolante apparente  $R'_w$  è possibile affermare che le misurazioni che richiedono maggiore attenzione sono quelle relative ai livelli di pressione sonora esterno e interno. Inoltre, si è notato che il tempo di riverberazione contribuisce all'incertezza complessiva in modo notevole alle basse frequenze, mentre alle alte frequenze è pressoché trascurabile. In ogni caso, sia la valutazione tramite il modello analitico di propagazione delle incertezze sia quella effettuate tramite il metodo Monte Carlo, danno come risultato che l'incertezza relativa all'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente  $R'_w$  è dovuta principalmente alle incertezze associate ai valori del potere fonoisolante apparente  $R'$  alle basse e alle medie frequenze.

Riguardo invece alle procedure di prova effettuate, si è osservato che, nel caso in questione, inclinare la sorgente sonora di  $0^\circ$  rispetto alla normale alla superficie della facciata non comporta risultati di misura incompatibili con quelli ottenibili inclinando la sorgente sonora di  $45^\circ$ , ovvero utilizzando la configurazione indicata all'interno della normativa UNI EN ISO 16283-3.

Un'altra osservazione interessante è che approssimare il campo sonoro all'interno dell'ambiente ricevente a un campo sonoro diffuso risulta accettabile nel caso in questione.

Inoltre, si è anche osservato che nel caso in cui venga aperta una finestra di una facciata o questa si deteriori, la perdita di prestazioni in termini di isolamento acustico è notevole.

## 7. FONTI

- [1] Sakhare, V. V., and R. V. Ralegaonkar. "Indoor environmental quality: Review of parameters and assessment models." *Architectural Science Review* 57.2 (2014): 147-154
- [2] Roulet, C. A. (2001). Indoor environment quality in buildings and its impact on outdoor environment. *Energy and buildings*, 33(3), 183-191.
- [3] F. Cotana and M. Goretti, Acoustic Classification of Buildings: Impact of Acoustic Performances of a High Energy-Efficient Building on Quality and Sustainability Indicators, 20th International Congress on Acoustics, ICA (2010): 1-6.
- [4] Altomonte, S., Rutherford, P., Wilson, R., 2015. Human factors in the design of sustainable built environments. *Intelligent Building International* 7 (4), 224–241. Special Issue: Workspaces Promoting Wellbeing.
- [5] BibLus-net. 2020. Come Misurare Il Comfort Acustico Di Un Edificio E Migliorare Il Benessere Interno | Biblus-Net. [online] Available at: <http://biblus.acca.it/come-misurare-comfort-acustico/> [Accessed 10 October 2020].
- [6] Kim, Jungsoo & de Dear, Richard. (2013). Workspace satisfaction: The privacy communication trade-off in open-plan offices. *Journal of Environmental Psychology*. 36. 18–26. 10.1016/j.jenvp.2013.06.007.
- [7] World Health Organization (WHO). *World Health Report: Prevention of Noise Induced Hearing Loss*. Geneva: World Health Organization (1997): 55.
- [8] Cesini, G., 2014. *Lezioni Di ACUSTICA APPLICATA E ILLUMINOTECNICA*. A.A. 2014/2015
- [9] EN ISO 16283 part 1, Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Airborne sound insulation, 2016
- [10] EN ISO 16283 part 2, Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Impact sound insulation, 2016
- [11] EN ISO 16283 part 3, Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Façade sound insulation, 2016
- [12] M.A. Navacerrada et al. / *Applied Acoustics* 114 (2016) 1–9. Study of the uncertainty of façade sound insulation measurements: Analysis of the ISO 12999-1 uncertainty proposal
- [13] S. Secchi, A. Astolfi, G. Calosso, D. Casini, G. Cellai, F. Scamoni, Effect of outdoor noise and façade sound insulation on indoor acoustic environment of Italian schools, *Applied Acoustics*, 126 (2017): 120-130.
- [14] W. Babisch, Cardiovascular effects of noise, *Noise and Health*, 13(52) (2011): 201
- [15] "Research for a Quieter Europe in 2020". An updated strategy paper of the CALM network. European Commission. Research Directorate - General, 2004.
- [16] *Sound Insulation in Buildings*, Jens Holger Rindel, 2018
- [17] ISO 717-1:2013, Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation
- [18] DPCM 05.12.1997, Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici in G.U. 22.12.1997 n. 297 (1997).
- [19] ISO 5725 part 1 and 2:1994 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 1: General principles and definitions and Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method, Geneva, Switzerland (1994).
- [20] ISO/IEC Guide 98-3:2008, Uncertainty of measurement - part 3: guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), Geneva, Switzerland (2008).
- [21] JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement
- [22] Prato, A., Casassa, F. and Schiavi, A., Reverberation time measurements in non-diffuse acoustic field by the modal reverberation time, *Applied Acoustics*, 110, 160–169, (2016).
- [23] Scrosati, C., Scamoni, F., Bassanino, M. and Zambon, G., Uncertainty analysis by a Round Robin Test of field measurements of sound insulation in buildings: Single numbers and low frequency bands evaluation – Airborne sound insulation, *Noise Control Engineering Journal*, 61(3), 291–306, (2013).
- [24] Scrosati, C., Scamoni, F. and Zambon, G., Uncertainty of façade sound insulation in buildings by a Round Robin Test, *Applied Acoustics*, 96, 27-38, (2015).
- [25] Argiento, R., Bissiri, P. G., Pievatolo, A. and Scrosati, C., Multilevel functional principal component analysis of façade sound insulation data, *Qual. Reliab. Engng. Int.* 31(7), 1239–1253, (2015).
- [26] Wittstock, V., On the uncertainty of single-number quantities for rating airborne sound insulation. *Acta Acustica united with Acustica*, 93, 375–386, (2007).

- [27] ISO 12999-1:2014, Acoustics - Determination and application of measurement uncertainties in building acoustics - part 1: sound insulation, Geneva, Switzerland, (2014).
- [28] Pievatolo, Antonio & Garai, Massimo & Scrosati, Chiara. (2018). ON THE UNCERTAINTY OF SOUND REDUCTION INDEX MEASUREMENTS FROM INTER-LABORATORY TESTS.
- [29] Pcfarina.eng.unipr.it. 2020. ANALISI IN FREQUENZA. [online] Available at: <http://pcfarina.eng.unipr.it/dispense00/lodigiani124188/lodigiani124188.htm#:~:text=ANALISI%20IN%20FREQUENZA&text=Lo%20scopo%20dell%27analisi%20in,diverse%20frequenze%2C%20anche%20variabili%20istantaneamente.&text=Anche%20il%20suono%20prodotto%20da,%C3%A8%20fatto%20unicamente%20di%20sinusoidi.> [Accessed 10 October 2020].
- [30] Everest, F., 1994. The Master Handbook Of Acoustics. 3rd ed. TAB Books.
- [31] Doebelin, E., Cigada, A. and Gasparetto, M., 2012. Strumenti E Metodi Di Misura. Milano: McGraw-Hill.
- [32] Claudi, L., Arnesano, M., Chiariotti, P., Battista, G. and Revel, G., 2019. A soft-sensing approach for the evaluation of the acoustic comfort due to building envelope protection against external noise. Measurement, 146.
- [33] Fausti, P., n.d. [online] Download.rockwool.it. Available at: <http://download.rockwool.it/media/74935/acustica%20in%20edilizia.pdf> [Accessed 10 October 2020].
- [34] EN ISO 3382:2000, Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters
- [35] Affidabilita.eu. 2020. Articolo. [online] Available at: <https://www.affidabilita.eu/TuttoMisure/articolo.aspx?idArt=1685#:~:text=Il%20budget%20del%27incertezza%20%C3%A8,ambiente%2C%20operatore%2C%20ecc.> [Accessed 10 October 2020].
- IMMAGINI:**
- [a] Sonora S.r.l. 2020. Curve Di Ponderazione, Definizioni E Differenze - Sonora S.R.L.. [online] Available at: <https://www.sonorasrl.com/curve-di-ponderazione-definizioni-e-differenze/> [Accessed 11 October 2020].
- [b] Dorato.altervista.org. 2020. [online] Available at: [http://dorato.altervista.org/00\\_TESI/07\\_UNI%20EN%2012354-3.pdf](http://dorato.altervista.org/00_TESI/07_UNI%20EN%2012354-3.pdf) [Accessed 11 October 2020].
- [c] Pcfarina.eng.unipr.it. 2020. Isolamento Delle Pareti. [online] Available at: <http://pcfarina.eng.unipr.it/dispense99/donetti118159/donetti118159.htm> [Accessed 11 October 2020].
- [d] Poroton.it. 2020. Le Prestazioni Acustiche Degli Elementi Edilizi: La Determinazione In Laboratorio Del Potere Fonoisolante | Consorzio POROTON® Italia. [online] Available at: [http://www.poroton.it/user/articoli/N27/Potere\\_fonoisolante/Potere\\_fonoisolante.aspx](http://www.poroton.it/user/articoli/N27/Potere_fonoisolante/Potere_fonoisolante.aspx) [Accessed 11 October 2020].
- [e] Bipm.org. 2020. [online] Available at: [https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM\\_101\\_2008\\_E.pdf](https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_101_2008_E.pdf)
- [f] Bipm.org. 2020. [online] Available at: [https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM\\_101\\_2008\\_E.pdf](https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_101_2008_E.pdf)