

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in  
Ingegneria del cinema e dei mezzi di comunicazione



Tesi di laurea magistrale

**Misura del coefficiente di scattering acustico  
in camera riverberante full scale secondo la  
norma ISO 17497-1**

***Relatore***

*Prof. Marco Carlo Masoero*

***Candidato***

*Ettore Ninni*

***Azienda***

*Zetalab s.r.l.*

Ottobre 2019



<b>Abstract</b>	<b>1</b>
<b>Introduzione</b>	<b>2</b>
<b>1. MATERIALI FONOASSORBENTI E FONODIFFONDENTI</b>	<b>4</b>
1.1. Premessa [1]	4
1.2. Materiali fonoassorbenti	7
1.2.1. Classificazione dei materiali	8
1.2.2.1. Materiali Porosi	9
1.2.2.2. Pannelli forati	13
1.2.2.3. Pannelli vibranti	15
1.3. Materiali fonodiffondenti	16
1.3.2. Diffusori geometrici [1]	23
1.3.2.1. Superfici piane	23
1.3.2.2. Triangoli e piramidi	26
1.3.2.3. Superfici concave	27
1.3.2.4. Superfici convesse	29
1.3.2.5. Superfici curve ottimizzate	30
<b>2. RIFLESSIONE SONORA: COEFFICIENTE DI SCATTERING E DI DIFFUSIONE SONORA [1]</b>	<b>32</b>
2.1. Coefficiente di diffusione sonora	35
2.1.1. Misura dei diagrammi polari di radiazione	36
2.1.2. CALCOLO DEL COEFFICIENTE DI DIFFUSIONE	43
2.2. Coefficiente di scattering	44
2.2.1. Principi concettuali	45
2.2.2. Metodi di misura	47
2.2.2.1. Metodo a campo libero	47
2.2.2.2. Misura in camera riverberante	49
2.2.3. Misura indiretta del coefficiente di scattering	51
<b>3. ANALISI PARAMETRI NORMA ISO 17497-1</b>	<b>54</b>

<b>3.1.</b>	<b>Norma ISO 17497-1 [34]</b>	<b>54</b>
3.1.1.	Intervallo di frequenze	54
3.1.2.	Camera riverberante	54
3.1.3.	Macchina rotante	55
3.1.4.	Campione di prova	56
3.1.5.	Procedura di test	57
3.1.6.	Calcolo del coefficiente di scattering ad incidenza casuale della piastra di base <i>sbase</i>	60
3.1.7.	Precisione dei risultati	60
<b>3.2.</b>	<b>Analisi fattori di incertezza della misura ISO 17497-1 [42]</b>	<b>62</b>
3.2.1.	Camera riverberante	62
3.2.1.1.	Misure in dimensioni reali o in scala ridotta	62
3.2.1.2.	Diffusività del campo sonoro	63
3.2.1.3.	Il coefficiente di scattering del piatto rotante	64
3.2.2.	Caratteristiche del campione	65
3.2.2.1.	Area e diametro del campione	65
3.2.2.2.	Effetto dei bordi	65
3.2.2.3.	Assorbimento del campione	66
3.2.2.4.	Forma del campione e metodo di montaggio	67
3.2.2.5.	Cavità d'aria sottostante il piatto rotante	68
3.2.3.	Rotazione	69
3.2.3.1.	Rotazione piatto rotante	69
3.2.3.2.	Stabilità nel tempo	70
3.2.3.3.	Numero di posizioni angolari	70
3.2.4.	Tipologia di segnale	71
<b>4.</b>	<b>MISURE SPERIMENTALI</b>	<b>75</b>
4.1.	Camera riverberante	75
4.2.	Strumentazione elettroacustica	76
4.3.	Base rotante	79
4.5.	Metodologia di misura	81
4.5.2.	Installazione delle apparecchiature di misura	81
4.5.3.	Misurazione tempi di riverbero	82
4.5.1.	Media sincrona [58]	82

<b>5. METODI ALTERNATIVI DI MISURA DIRETTA</b>	<b>84</b>
5.1. Antenna acustica con pesatura multipolare [58]	84
5.1.1. Superfici orizzontali [59]	85
5.1.2. Superfici verticali e mappatura scattering [60]	87
5.2. Metodo di misura del coefficiente di scattering di pareti e diffusori usando un campo sonoro non diffuso con un assorbimento sonoro distribuito in modo non uniforme [61]	89
5.2.1. Misura del coefficiente di scattering ad incidenza normale [62]	90
5.3. Misura del coefficiente di scattering risolvendo il problema inverso [1] [65]	94
<b>6. Conclusioni</b>	<b>97</b>
Bibliografia	99

## **Abstract**

Questo studio prende in considerazione la metodologia proposta dalla norma ISO 17497-1 per la misura del coefficiente di scattering ad incidenza casuale in camera riverberante. Il coefficiente di scattering risulta uno dei due parametri utilizzati per la descrizione della diffusione sonora di un materiale, risultando particolarmente utile come input negli algoritmi di simulazione geometrica acustica.

Dall'emanazione della norma, 2004, numerosi studi sono stati condotti per analizzarne gli aspetti non definiti dallo standard: scelta della tipologia e durata del segnale da utilizzare, possibilità di isolamento della cavità d'aria tra il campione e il pavimento, scelta tra le diverse metodologie di misura (step manuale, step automatizzato, rotazione continua automatizzata) e altezza dei microfoni rispetto al campione da testare.

L'obiettivo di questa tesi è analizzare il processo di misura secondo la norma ISO 17497-1 all'interno della camera riverberante del laboratorio di acustica Zetalab srl di volume pari a 161 m<sup>3</sup>, utilizzando strumentazione e software commerciali al fine di definire un utilizzo alternativo della strumentazione stessa. Infatti non esiste in commercio una strumentazione software e hardware concepita per questa tipologia di misura, portando a soluzioni custom.

In accordo con i numerosi studi già effettuati in tale ambito, è stato utilizzato un campione sinusoidale in fibrocemento, in modo tale da permettere un confronto corretto con i risultati sinora studiati.

Una breve panoramica sui metodi alternativi è stata considerata, nonostante non siano ancora stati validati da un sufficiente numero di test.

## Introduzione

L'acustica architettonica ha sempre interessato sia i professionisti del settore sia la vita quotidiana di ognuno di noi.

La base di questo interessamento collettivo risiede nella pura e semplice concezione di "Comfort", sia per chi parla che per chi ascolta.

I principali fattori che influenzano il comfort acustico sono: l'assorbimento, la riflessione e l'isolamento acustico.

Nonostante l'interesse per la riflessione sonora sia nato in epoca più recente, circa 30 anni fa, rispetto all'assorbimento e all'isolamento acustico, il suo contributo non può essere ignorato.

Lo studio delle riflessioni sonore permette di rendere più uniforme un ambiente di ascolto e di eliminare focalizzazioni del suono dovute, ad esempio, a superfici concave, senza togliere energia sonora e, di conseguenza, riverberazione all'ambiente; infatti l'utilizzo di pannelli fonoassorbenti renderebbe più "asciutto" il campo sonoro.

La necessità di creare un coefficiente che potesse sintetizzare il comportamento diffusivo di un materiale ha portato all'utilizzo di due coefficienti ben distinti: uno quantitativo denominato coefficiente di scattering e un altro qualitativo denominato coefficiente di diffusione sonora.

Il coefficiente di scattering è la quantità di energia che non viene riflessa in maniera speculare rispetto all'energia totale diffusa, mentre il coefficiente di diffusione sonora indica in che modo l'energia viene diffusa.

La differenza tra i due indici non è così ovvia, tanto da esigere due norme ISO distinte per la loro misurazione: la norma ISO 17497-1 per la misurazione del coefficiente di scattering e la norma ISO 17497-2 per quella del coefficiente di diffusione sonora.

La presente tesi si basa sull'analisi della norma ISO 17497-1 per la misura il coefficiente di scattering ad incidenza casuale in camera riverberante.

Tale norma presenta aspetti critici già analizzati da precedenti studi.

L'obiettivo della tesi è analizzare le difficoltà progettuali incontrate nella procedura prevista dalla norma, effettuando delle misurazioni di un campione sinusoidale nella camera riverberante dell'azienda Zetalab.

La tesi è articolata in 5 capitoli:

- il capitolo 1 mostra una panoramica generale tra i materiali fonoassorbenti e i materiali diffondenti, precisando le loro differenze e la loro importanza in soluzioni miste;
- il capitolo 2 descrive i due coefficienti per misurare le riflessioni sonore: il coefficiente di scattering e il coefficiente di diffusione sonora, enfatizzandone le differenze;
- il capitolo 3 analizza i principali aspetti previsti dalla norma ISO 17497-1, elencandone le criticità già analizzate da precedenti studi;
- il capitolo 4 descrive le misure effettuate in camera riverberante dell'azienda ospitante Zetalab, confrontando le misure con quelle presenti in bibliografia;
- il capitolo 5 offre una panoramica generale dei metodi alternativi proposti nel corso degli anni dall'uscita della norma ISO 17497-1;
- conclusioni

# 1. MATERIALI FONOASSORBENTI E FONODIFFONDENTI

## 1.1. Premessa [1]

La qualità acustica di una sala dipende sia dal suono diretto, che viaggia senza incontrare ostacoli dalla sorgente al ricevitore, sia dal suono indiretto, costituito dalle riflessioni delle pareti, soffitto e pavimento.

Il suono quando incontra una superficie oltre che poter essere riflesso può essere anche assorbito e trasmesso. Questi tre fenomeni dipendono dalle proprietà delle superfici che il suono incontra lungo il suo tragitto.

Tralasciando il fenomeno della trasmissione sonora, la Figura 1 illustra il comportamento spettrale e temporale dell'assorbimento sonoro, della riflessione speculare e di quella diffusa.

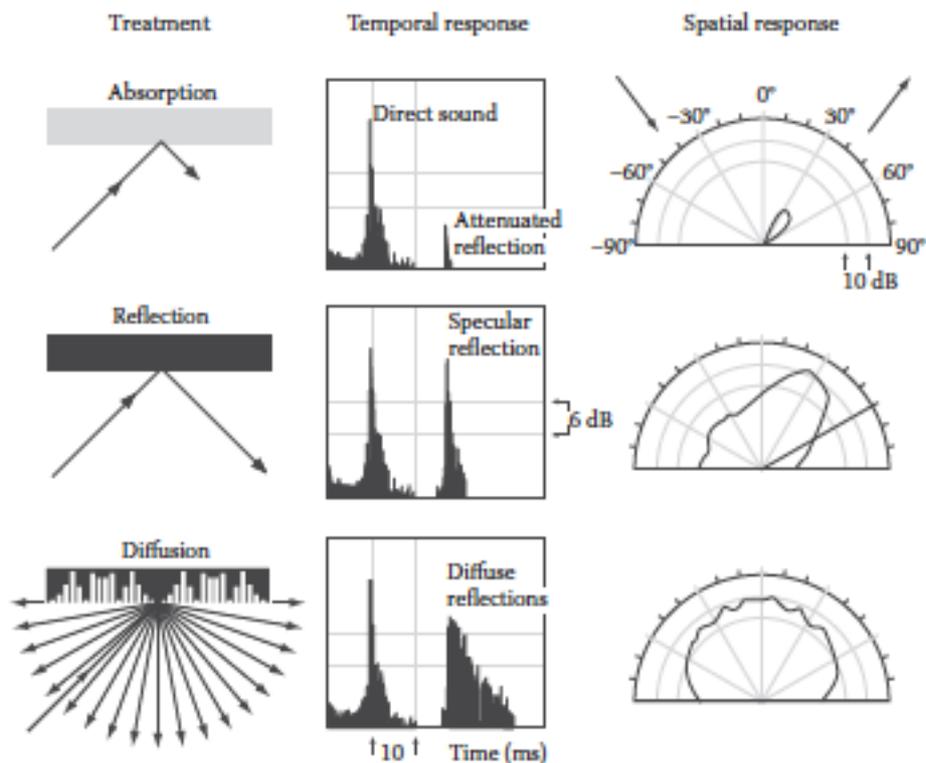


Figura 1 - Caratteristiche temporali e spettrali di superfici assorbenti, diffusive specularmente e diffusori [1].

Un buon design acustico architettonico richiede un adeguato volume, forma e trattamenti delle superfici, utilizzando appropriate combinazioni di assorbitori, diffusori e superfici piane. Gli spazi acustici possono principalmente essere divisi in spazi di produzione sonora, spazi di riproduzione sonora e ambienti di controllo del rumore. Questa suddivisione è utile per comprendere le diverse esigenze acustiche dei vari ambienti e l'importanza dei diversi trattamenti acustici richiesti:

- spazi di produzione sonora: particolare attenzione per le riflessioni speculari e diffuse, l'assorbimento può essere utile per il controllo del riverbero e ricopre un ruolo secondario;
- spazi di riproduzione sonora (ad esempio: studi di registrazione e home theatres): l'assorbimento e le riflessioni diffuse ricoprono un ruolo chiave, mentre le riflessioni speculari forniscono un contributo minore; assorbitori e diffusori sono utilizzati per controllare eventuali colorazioni del suono dovute alle prime riflessioni e ai modi in bassa frequenza della stanza;
- ambienti in cui è importante il controllo del rumore (ad esempio: palestre, piscine e fabbriche): poiché l'obiettivo principale è ridurre il riverbero e il livello sonoro, l'assorbimento ricopre un ruolo principale rispetto agli altri due fenomeni.

Poiché sia gli assorbitori che i diffusori possono essere usati per prevenire la distorsione acustica all'interno di un ambiente, controllando echi, colorazioni, e cambi di immagine sonora, dovuti a forti riflessioni, la scelta del miglior trattamento da utilizzare dipende da numerosi fattori.

Ad esempio, nelle sale da concerto, dove l'energia acustica è molto importante, si utilizzano dei diffusori per risolvere echi o problemi di colorazione sonora; mentre nelle sale da lettura o piccoli ambienti, dove l'intelligibilità è molto importante, il miglior trattamento è quello con gli assorbitori. In sale di ascolto critiche, è necessario utilizzare un mix di entrambi.

Per risolvere le risonanze modali in bassa frequenza, l'utilizzo di assorbitori porosi e diffusori richiede uno spessore considerevole, risultando un problema in quanto solitamente gli spazi sono limitati.

I diffusori hanno il vantaggio generalmente di essere più robusti degli assorbitori. Gli assorbitori, infatti, sono per la maggior parte costituiti da materiali fibrosi, che non resistono bene agli effetti del vento, della pioggia e degli ambienti tossici. Ad esempio, in campo aperto, come nelle stazioni ferroviarie o nelle strade, può essere generata una grande quantità di particolato, che col tempo può ostruire i pori degli assorbitori fibrosi, annullandone l'efficacia.

Avendo un comportamento complementare, gli assorbitori e i diffusori se usati correttamente, possono migliorare considerevolmente l'ambiente sonoro di un ambiente, per tale ragione il capitolo successivo approfondisce le varie tipologie di materiali che li costituiscono.

## 1.2. Materiali fonoassorbenti

I materiali, come accennato precedentemente, vengono utilizzati in ambienti in cui è necessario diminuire l'energia acustica, modificando il tempo di riverbero.

Quando il suono incide una superficie, parte dell'energia viene riflessa, parte viene assorbita e parte viene trasmessa, secondo la seguente equazione:

$$E_{\text{incidente}} = E_{\text{assorbita}} + E_{\text{riflessa}} + E_{\text{trasmessa}}$$

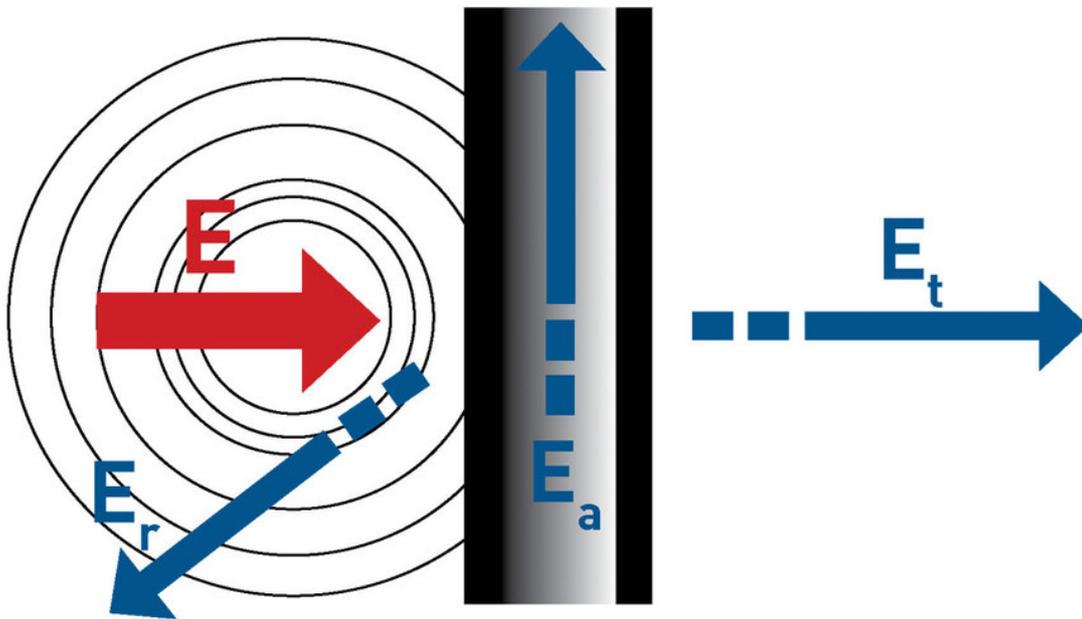


Figura 2 - Comportamento di un'onda sonora incidente un materiale:  $E$  l'energia sonora incidente,  $E_r$  l'energia sonora riflessa,  $E_a$  l'energia sonora assorbita e  $E_t$  l'energia sonora trasmessa.

Il parametro che definisce la qualità dei materiali fonoassorbenti è il coefficiente di assorbimento sonoro, detto  $\alpha$ .

Il coefficiente di assorbimento sonoro è definito come il rapporto tra l'energia assorbita e l'energia incidente, indicando la quantità di energia sonora assorbita da un materiale. Più alta è la percentuale di questo rapporto, migliore è l'assorbimento, in quanto la maggior parte del suono viene assorbito piuttosto che riflesso. Generalmente questo

rapporto viene indicato come una grandezza adimensionale che va da 0 a 1, valori maggiori di 1, sebbene teoricamente impossibili, si trovano spesso a causa dell'effetto di diffrazione sui bordi del campione.

Questo coefficiente dipende sia dall'angolo di incidenza dell'onda acustica che dalla sua frequenza, per questo esistono differenti metodi di misurazione che prendono in considerazione una determinata angolazione oppure ne fanno una media per ottenere un valore per tutte le angolazioni.

Le seguenti equazioni indicano come il coefficiente di assorbimento  $\alpha$  può essere calcolato:

$$1. \quad \alpha = \frac{E_a}{E_i}$$

$$2. \quad \alpha = 1 - \frac{E_r}{E_i}$$

$$3. \quad \alpha = 1 - |r|^2$$

$$4. \quad \alpha = \frac{I_a}{I_i}$$

dove  $E_i$  = energia incidente,  $r$  = fattore di riflessione incidente,  $I_a$  = intensità sonora assorbita e  $I_i$  = intensità sonora incidente.

I materiali fonoassorbenti sono classificati sulla loro capacità di assorbire e trasmettere il suono piuttosto che rifletterlo. Un materiale in grado di assorbire e trasmettere più onde sonore di quelle riflesse, è considerato un buon materiale fonoassorbente [2].

Inoltre la classificazione dei materiali fonoassorbenti è dovuta principalmente alla loro tipologia di funzionamento.

### **1.2.1. Classificazione dei materiali**

Come accennato precedentemente, i materiali fonoassorbenti possono essere suddivisi in base al meccanismo con cui l'energia viene dissipata in tre categorie principali: materiali porosi, pannelli vibranti, pannelli forati [3].

Ogni tipologia ha un suo range di assorbimento di frequenze, come mostrato in Figura 3.

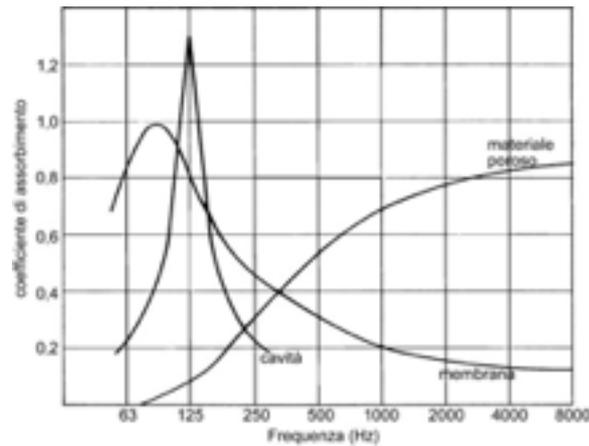


Figura 3 - Andamento in frequenza del coefficiente di assorbimento sonoro  $\alpha$  per differenti materiali fonoassorbenti [3].

### 1.2.2.1. Materiali Porosi

In questa tipologia di materiali l'assorbimento sonoro è dovuto alla perdita di energia per attrito viscoso attraverso il passaggio dell'onda sonora all'interno delle microcavità.

Affinché avvenga questa dissipazione, i percorsi tra i pori devono essere interconnessi attraverso una struttura a celle aperte.

Questa struttura a cella aperta può avere pori aperti da entrambi i lati, detti pori "passanti", oppure avere un lato aperto e uno chiuso, detti pori "ciechi".

Come si può notare dalla precedente Figura 3, i materiali porosi vengono utilizzati per l'assorbimento delle frequenze medie e medio-alte.

Esistono principalmente tre tipologie di materiali porosi:

- Materiali fibrosi (lana di vetro, lana di roccia, truciolati di legno, sughero, fibre di poliestere, gesso, cartongesso, lino)
- Materiali a cellule aperte (schiume poliuretatiche, poliuretano espanso, foam melamminico, vetro cellulare, argilla espansa)
- Materiali a struttura granulare

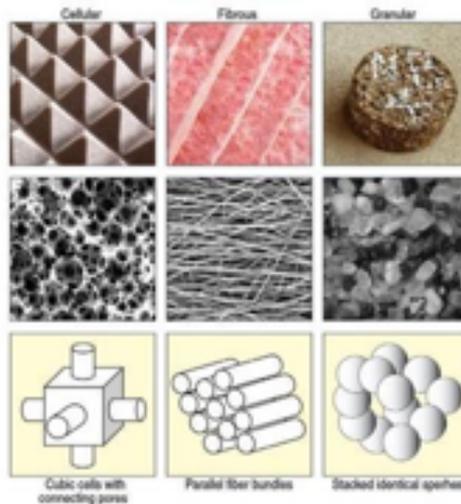


Figura 4 - Le tre tipologie principali di materiali porosi [4].

I materiali fonoassorbenti porosi dipendono principalmente dai seguenti fattori:

- **Porosità dei materiali:** è strettamente connesso alla configurazione del materiale, coinvolgendo il volume dei fori e il volume totale [5]:

$$\text{Porosità } (H) : \frac{V_a}{V_m}$$

$V_a$  = volume d'aria nei fori,  $V_m$  = Volume totale del materiale.

Al contatto, i canali o i pori contengono molecole d'aria che vibrano e perdono energia a causa dell'energia delle molecole d'aria dell'onda sonora convertita in calore per via delle perdite termiche e viscosive dovute alle pareti interne dei pori e dei canali. In definitiva, ci deve essere un sufficiente trasferimento di energia con un intervallo accettabile di porosità, il che significa che un poro aperto con canali continui comporterà un migliore assorbimento del suono, grazie alle molteplici reazioni tra l'onda sonora e le pareti dei pori. Di conseguenza, più energia sarà trasformata in energia termica [6].

- **Resistenza al flusso d'aria:** una delle maggiori qualità che influisce sulle caratteristiche fonoassorbenti di un materiale fibroso è la resistenza al flusso d'aria per unità di spessore di un materiale. Le fibre interlacciate in questi tipi di materiale sono gli elementi responsabili dell'attrito che incontra l'onda sonora incidente al materiale. In generale, quando un suono attraversa questi materiali, la sua ampiezza subisce un'attenuazione dovuta all'attrito delle onde sonore che

cercano di attraversare i passaggi tortuosi costituiti dalle fibre. Tutto questo porta a convertire l'energia acustica in energia termica [7]. La resistenza al flusso d'aria per unità di spessore di un materiale poroso è proporzionale al coefficiente della viscosità di taglio del mezzo coinvolto ed inversamente proporzionale al quadrato della dimensione dei pori caratteristici del materiale. Per un materiale fibroso con una porosità data, questo significa che la resistenza al flusso per unità di spessore è inversamente proporzionale al quadrato del diametro della fibra [8].

- **Spessore dei materiali:** lo spessore dei materiali è direttamente connesso all'intervallo delle basse frequenze (100-2000 Hz) mentre è insignificante per le alte frequenze (>2000 Hz) [9]. L'aumento dello spessore migliora l'assorbimento sonoro e riflette meno energia sonora. La ragione è che alle basse frequenze, dove il suono ha una lunghezza d'onda maggiore, sono necessari materiali più spessi per assicurare il contatto con il materiale [10]. Punto fondamentale da notare è che lo spessore del materiale dovrebbe essere un decimo della lunghezza d'onda della frequenza per la quale il materiale fonoassorbente è stato progettato (sempre nel range delle basse frequenze) [11]. Ad esempio, se la frequenza di un materiale è 1000 Hz, la sua lunghezza d'onda sarà 0,34 m, allora il suo spessore dovrebbe essere circa un decimo della lunghezza d'onda, cioè 0,03m (qualora lo spessore fosse superiore a questo valore, perderebbe il suo alto coefficiente sonoro in quella frequenza).

Tuttavia si può compensare lo spessore con un'intercapedine d'aria dietro al pannello con una dimensione pari a  $\lambda/4$ , con  $\lambda$  = lunghezza d'onda, o suoi multipli, poiché a queste distanze si intercettano i valori massimi di velocità delle particelle dell'onda sonora, come mostrato in Figura 5.

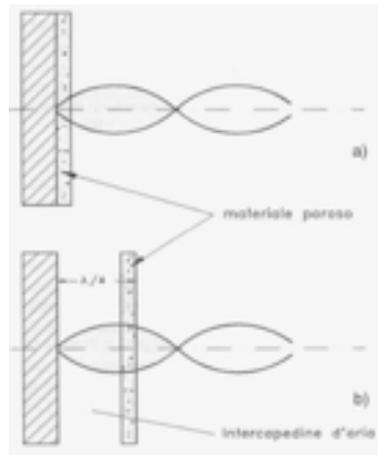


Figura 5 - Esempio di installazione con intercapedine d'aria.

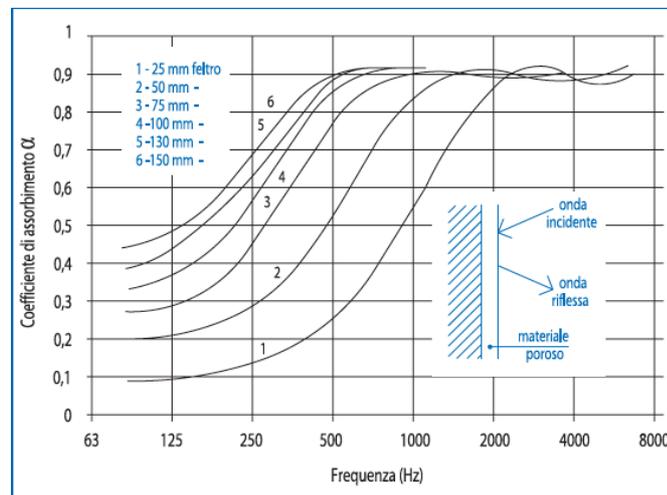


Figura 6 - Analisi del coefficiente di assorbimento  $\alpha$  in funzione della frequenza e dello spessore del materiale.

- **Posizione materiali fonoassorbenti:** la collocazione dei materiali fonoassorbenti incide sul potere fonoassorbente di un materiale. Uno studio condotto da Alton Everest [12] ha dimostrato che differenti tipi di assorbitori acustici posizionati lungo tutte le pareti della stanza (compreso il soffitto), risultano efficaci in quanto intercettano tutti e tre gli assi modali di una stanza. Inoltre in una stanza rettangolare è stato dimostrato che posizionando i materiali fonoassorbenti negli angoli e lungo i bordi delle pareti, questi risultano estremamente efficaci.
- **Tortuosità:** la tortuosità è la misura di quanto si allunga il percorso per attraversare i pori ed è confrontato con lo spessore del materiale. Uno studio

effettuato da Horoshenkov et al [13] ha affermato che la tortuosità influenza la posizione del picco del quarto di lunghezza d'onda, mentre la porosità e la resistenza al flusso influenzano l'altezza e la larghezza del picco. E' stato anche affermato che il valore della tortuosità determina il comportamento fonoassorbente alle alte frequenze dei materiali porosi.

E' definita dalla seguente equazione:

$$T = \frac{\langle \lambda \rangle}{L}$$

dove  $\langle \lambda \rangle$  = lunghezza media dei percorsi del fluido e  $L$  = lunghezza geometrica del campione [14].

### 1.2.2.2. Pannelli forati

I pannelli forati sfruttano il principio dell'assorbimento per risonanza di cavità. L'assorbimento avviene per viscosità che si realizza all'imboccatura (collo) di un'area cava all'interno del materiale, che pertanto si presenta forato o fessurato, tramite il principio del cosiddetto "risuonatore di Helmholtz".

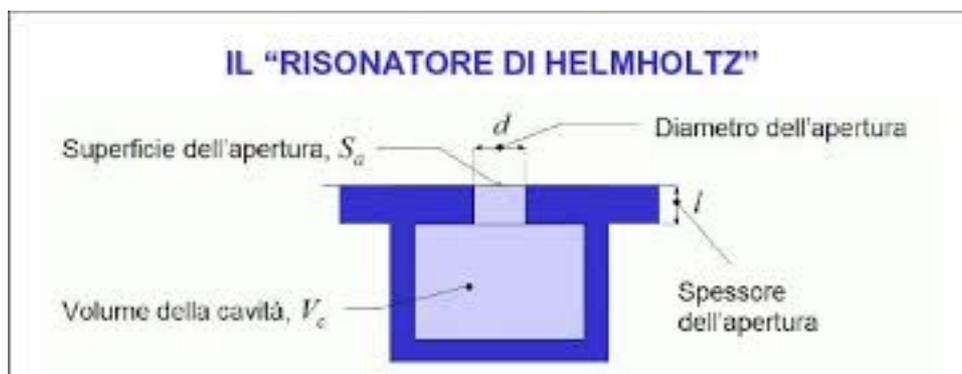


Figura 7 - Risuonatore di Helmholtz [15].

Come si può notare dalla precedente Figura 3, questo tipo di assorbimento è molto selettivo, ma riempiendo la cavità d'aria con del materiale poroso, si può ottenere uno spettro di frequenze più ampio, come mostrato nella seguente Figura 8:

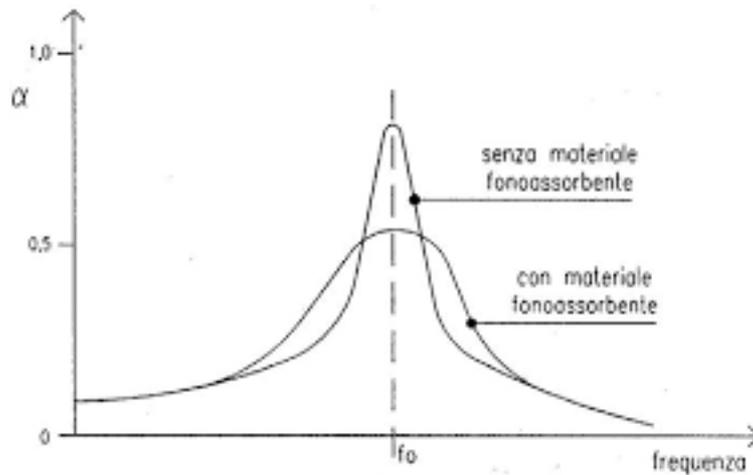


Figura 8 - Comportamento pannelli forati con e senza materiale fonoassorbente all'interno della cavità d'aria.

L'assorbimento raggiunge il suo massimo alla frequenza di risonanza, data dalla seguente equazione [1]:

$$f_r = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S_a}{V_c(l + \frac{16d}{3\pi})}}$$

dove, come riportato in Figura 7,  $c_0$  = velocità di propagazione del suono nell'aria,  $S_a$  = superficie dell'apertura,  $V_c$  = volume della cavità,  $d$  = diametro dell'apertura e  $l$  = spessore dell'apertura.

Tuttavia, nel caso dei pannelli forati, composti da numerosi risonatori di Helmholtz, la frequenza di risonanza è data da:

$$f_r = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{P\%}{h(l + 1,6d)}}$$

dove  $P\%$  = percentuale di foratura del pannello,  $h$  = spessore dell'intercapedine d'aria e  $d$  = raggio dei fori [1].

### 1.2.2.3. Pannelli vibranti

Questa tipologia di materiali sfrutta il fenomeno dell'assorbimento per risonanza di membrana. L'assorbimento avviene tramite il posizionamento di un pannello di buona densità ad una certa distanza dalla parete di modo che lo smorzamento si verifica tramite il sistema massa-aria-massa. Il pannello risuona alla sua frequenza di risonanza [1] che può essere calcolata in due modi:

$$1. f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{MC}}$$

dove: M = massa del pannello (Kg) e C = cedevolezza del pannello (m/N).

$$2. f_r = \frac{60}{\sqrt{M_s H}}$$

dove:  $M_s$  = massa per unità di superficie (Kg/m<sup>2</sup>) e H = spessore dell'intercapedine (m).

Come analizzato nella precedente Figura 3, questa tipologia di materiali agisce alle basse frequenze, tuttavia con l'aggiunta di materiale fonoassorbente poroso all'interno dell'intercapedine d'aria, è possibile aumentare l'efficacia su un più ampio range di frequenze.

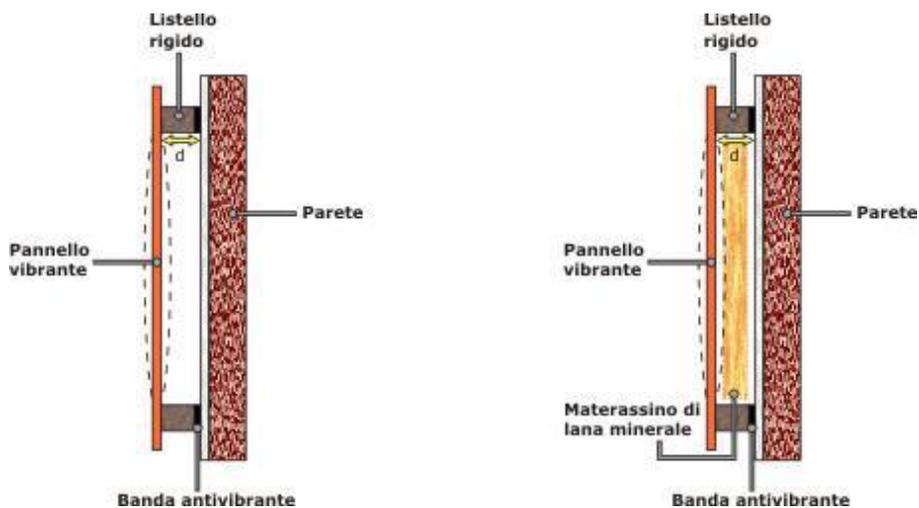


Figura 9 - Schema di un pannello vibrante con e senza materiale poroso [16].

## **1.3.Materiali fonodiffondenti**

### **1.3.1. Diffusori di Schroeder [1]**

Il più semplice diffusore a resto quadrato (in inglese, quadratic residue sequence, QRD) è stato commercializzato nel 1983 e consiste in una serie di incavi della stessa larghezza ma profondità differenti. Queste profondità sono determinate da una sequenza a resto quadratico basata sul numero primo 7.

Nel 1995 è stato introdotto un diffusore frattale, chiamato Difffrattale (in inglese, Difffractal), nel quale gli incavi piani del QRD sono stati modificati con repliche scalate della forma originale, permettendo un'estensione della risposta diffusiva alle alte frequenze. Si tratta di strutture nidificate: diffusori all'interno di altri diffusori [12].

Nel 2004 è stato introdotto un diffusore modulato, ottimizzato e non basato sul calcolo numerico, chiamato, in inglese, Modffusor. Ha otto incavi con profondità in relazione non intera, permettendo di ridurre la risposta in frequenza piana dovuta alla riflessione in fase di tutti gli incavi.

Infine, nel 2009, è stato introdotto il Modffractal, un frattale modulato e ottimizzato, dove gli incavi piani del Modffusor sono sostituiti con repliche scalate. Quest'ultimo diffusore rappresenta la migliore soluzione per questa tipologia di diffusori a reticolo di fase.

La seguente Figura 10 mostra graficamente l'evoluzione del diffusore di Schroeder sopra descritta.

Tutti i modelli analizzati sono diffusori 1D, cioè diffondono il suono su un solo piano; nell'altra direzione si comportano come una superficie piana.

Per la loro costruzione è adatto qualsiasi materiale liscio, riflettente e non diaframmatico. L'onda sonora che incide su questa tipologia di diffusori viene riflessa dal fondo degli incavi e re-irradiata nell'ambiente circostante. La pressione sonora misurata in un punto esterno al diffusore è determinata dall'interferenza tra le onde re-irradiate da ogni incavo. Nonostante le onde sonore re-irradiate abbiano la stessa ampiezza, possiedono fasi differenti, dovute alla differenti profondità degli incavi.

Schroeder ha dimostrato che scegliendo una sequenza a resto quadratico per la progettazione degli incavi, si ottengono lobi riflessi con la stessa energia. La Figura 11

mostra 11 lobi della stessa energia in questo caso, chiamati in inglese “grating (o diffraction) lobes”, generati dalla periodicità della superficie presa in esame.

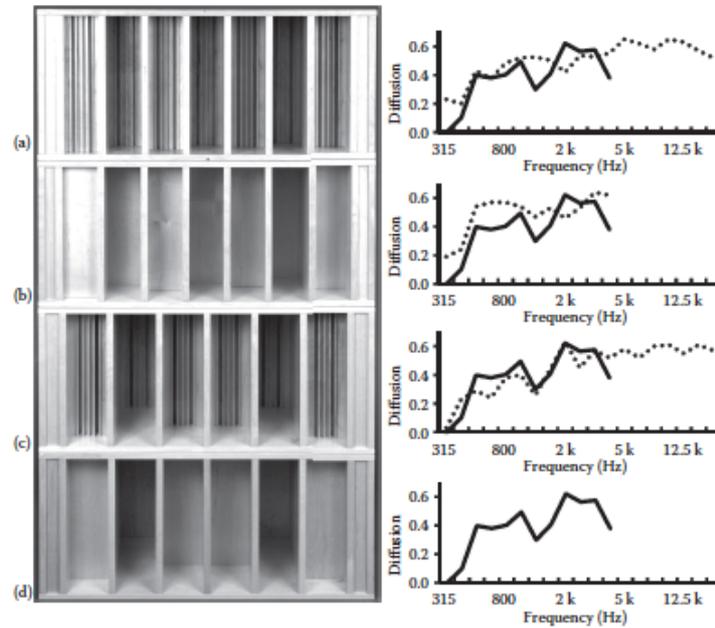


Figura 10 - L'evoluzione del diffusore di Schroeder. Le immagini mostrano: (a) Modfractal, (b) Modffusor, (c) DiffRACTal, e (d) QRD. La linea tratteggiata mostra la risposta in fase del coefficiente di diffusione normalizzato per ognuno di essi, comparato con quello originale del QRD (linea in grassetto continua) [1].

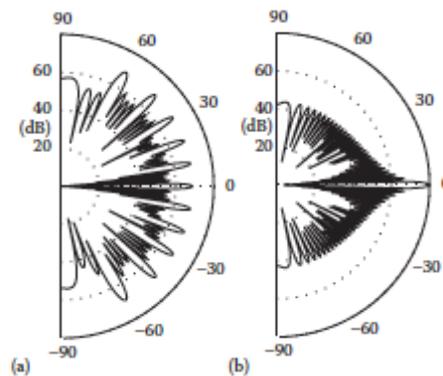


Figura 11 - Livello di pressione diffusa da (a) un diffusore di Schroeder e (b) una superficie piana della stessa dimensione [1].

Di seguito si riportano le equazioni che governano i diffusori di Schroeder:

- $w = \lambda_{\min}/2$  , dove  $\lambda_{\min}$  è la lunghezza d'onda minima prima che si verifichino interferenze tra i modi presenti negli incavi e  $w$  è la larghezza dell'incavo. Questa equazione definisce la frequenza superiore per la quale il diffusore fornisce un'adeguata diffusione;
- $s_n = n^2 \text{ modulo } N$ , dove modulo indica il resto non negativo di  $N$  (numero generatore). Questa equazione restituisce il numero della sequenza per l'ennesimo incavo, denominato anche fattore di proporzionalità della profondità della scanalatura [12], considerando la tipologia di sequenza più usata che è quella a resto quadratico.
- $d_n = \frac{s_n \lambda_0}{2N}$ , dove  $\lambda_0$  è la lunghezza d'onda di progetto,  $d_n$  la profondità dell'ennesimo incavo. Il risultato varia tra 0 ad approssimativamente  $\lambda_0/2$ . La frequenza di progetto è solo la prima frequenza alla quale si ottengono lobi di diffusione con la stessa energia.

Nonostante le suddette equazioni permettano di progettare diffusori ad una larghezza di banda desiderata, ci sono altri aspetti da prendere in considerazione:

- **larghezza del periodo (Nw) o larghezza degli incavi:** determinano la più bassa frequenza dove il diffusore fornisce una diffusione uniforme; questa frequenza limite, infatti, non dipende dalla massima profondità degli incavi. Ad esempio, come si può notare in Figura 12 utilizzare incavi più stretti (in inglese “narrow wells”) porta ad una traslazione della suddetta frequenza limite a 1500 Hz, tre volte superiore alla reale frequenza limite di progetto di 500 Hz, ottenuta con incavi più ampi (in inglese “wide wells”).

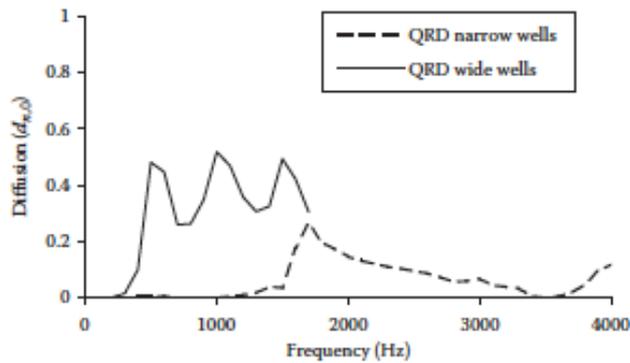


Figura 12 - Spettro del coefficiente di diffusione normalizzato per due QRD. Sottolinea che la frequenza più bassa alla quale si verifica una diffusione significativa può essere determinata dalla larghezza del periodo piuttosto che dalla profondità degli incavi. La frequenza di progetto era 500 Hz [1].

- **periodicità:** per ottenere lobi con la stessa energia in direzioni differenti, la struttura deve essere periodica. Senza la periodicità, le equazioni per la progettazione dei diffusori precedentemente analizzate, indicherebbero soltanto che in certe direzioni, la diffusione (o scattering) avrà un livello simile. Come mostrato nella Figura 13, utilizzare strutture periodiche permette di avere un allineamento tra la posizione dei lobi e le direzioni calcolate con le equazioni di progetto dove lo scattering avrebbe la stessa energia.

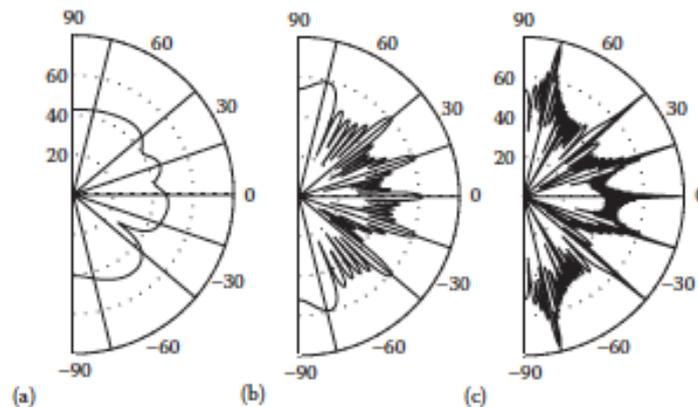


Figura 13 - The scattering di diffusori QRD con  $N=7$  e differenti numeri di periodi. (a) 1 periodo; (b) 6 periodi; (c) 50 periodi. La posizione dei lobi e le direzioni di livelli sonori simili sono contrassegnati da linee radiali a  $\pm 76^\circ$ ,  $\pm 40^\circ$ ,  $\pm 19^\circ$  e  $0^\circ$  [1].

- **scelta del numero primo generatore:** questa scelta è limitata dal costo della manodopera, comportamento in bassa frequenza e dalle frequenze critiche che

potrebbero verificarsi. Per una data profondità massima  $d_{max}$ , la frequenza di progetto è calcolata nel seguente modo:

$$f_0 = \frac{s_{max}}{N} \frac{c}{2d_{max}}$$

dove  $s_{max}$  è il numero più grande in una sequenza a resto quadratico. Il rapporto  $\frac{s_{max}}{N}$  determina l'efficienza in bassa frequenza del diffusore [17], di conseguenza un diffusore con numero primo inferiore avrà un comportamento migliore in bassa frequenza. Tuttavia, è possibile incrementare il comportamento in bassa frequenza di un diffusore introducendo un cambiamento di fase costante, secondo questa equazione:

$$s_n = (n^2 + m) \text{ modulo } N$$

dove  $m$  è un numero intero costante. Questa tecnica di incremento funziona solo se la larghezza del periodo non è troppo stretta.

- **frequenze critiche:** si verificano a  $mNf_0$  e sono le frequenze dove il diffusore si comporta come una superficie piana, poiché tutti gli incavi re-irradiano in fase l'onda sonora. Questo si verifica quando le profondità sono multiple intere di  $\frac{\lambda}{2}$ , con  $\lambda$  lunghezza d'onda del suono incidente il diffusore. Per evitare queste frequenze critiche, è necessario posizionare la prima frequenza critica sopra alla frequenza massima in cui opera il diffusore, secondo la seguente equazione:

$$N > \frac{c}{2wf_0}$$

- **sequenze numeriche:**
  - *sequenze di massima lunghezza (MLS):* è la prima sequenza utilizzata da Schroeder. La scelta fu dovuta alla caratteristica del segnale MLS (maximum length sequences) di avere la stessa energia in tutte le frequenze. Utilizzando questa tipologia di sequenza, si ottiene un diffusore adatto ad una sola ottava di frequenze, limite risolvibile utilizzando differenti sequenze numeriche per coprire un intervallo di frequenze maggiore;
  - *sequenze a resto quadratico:* permette di ottenere lobi radiali con la stessa energia proporzionale alla radice del numero primo generatore della sequenza:

$$|p_m| \propto \sqrt{N}; m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

dove  $m$  è l'ordine dei lobi e  $p_m$  la pressione di un lobo di ordine  $m$ ;

- *sequenze a radice primitiva*: il fattore di proporzionalità della profondità della scanalatura è data dalla seguente equazione:

$$s_n = (r \times s_{n-1}) \bmod N$$

con  $N$  numero primo dispari,  $r$  radice primitiva di  $N$ . I diffusori che utilizzano questa sequenza vengono denominati “diffusori a radice primitiva (PRD)” e vengono utilizzati per ridurre l'energia riflessa nella direzione speculare. La prestazione dei PRD nell'eliminare l'energia speculare aumenta con l'incremento del numero primo  $N$ .

- *altre sequenze*: secondo il teorema di Wiener-Khinchine, la trasformata di Fourier di una funzione di autocorrelazione restituisce lo spettro di autopotenza. Se applichiamo una trasformata di Fourier all'autocorrelazione dei coefficienti di riflessione speculare, si otterrà la distribuzione dell'energia scatterizzata. Conseguentemente, un buon diffusore ha una funzione di autocorrelazione dei coefficienti di riflessione simile ad una funzione Delta di Dirac.

I diffusori a reticolo di fase possono essere sia monodimensionali che bidimensionali. Quando avviene una diffusione semicilindrica, i diffusori sono unità monodimensionali, quando, invece, avviene una diffusione semisferica, i diffusori sono unità bidimensionali, come mostrato nella seguente Figura 14 [12].

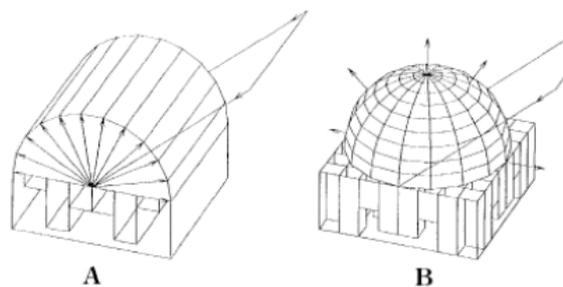


Figura 14 - Diagrammi di diffusione: semicilindrico, di un diffusore a resto quadratico monodimensionale (A) e semisferico, di un diffusore bidimensionale (B) [12].

Tra i diffusori bidimensionali si riporta un'illustrazione dell'Omniffusor, costituito da una matrice simmetrica di 64 celle quadrate, la cui profondità viene calcolata con la sequenza dei resti quadratici relativa al numero 7 [12].

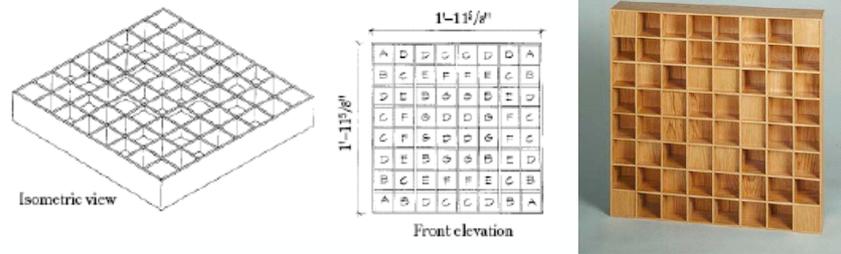


Figura 15 - L'Omniffusor è un'unità bidimensionale che diffonde il suono nel piano orizzontale e nel piano verticale per qualunque angolo di incidenza [12] [18].

### 1.3.2. Diffusori geometrici [1]

In questo paragrafo si analizzano le varie superfici diffondenti con forme differenti da quella di Schroeder. Queste tipologie di diffusori possono essere realizzati con una vasta varietà di materiali, ad esempio: legno di varie specie e finiture, plastica trasmissiva o termoformata, gesso rinforzato con fibre, cemento, polistirolo ad alta densità e metallo. La scelta del materiale da utilizzare è legata principalmente all'estetica, al peso e all'assorbimento acustico.

Di seguito si analizzano le tipologie più comuni.

#### 1.3.2.1. Superfici piane

Le superfici piane sono le più comuni tra le forme architettoniche utilizzate. Senza la rugosità superficiale, tipica dei diffusori di Schroeder, gli effetti di riflessione e diffusione sono dovuti esclusivamente al fenomeno di diffrazione dei bordi.

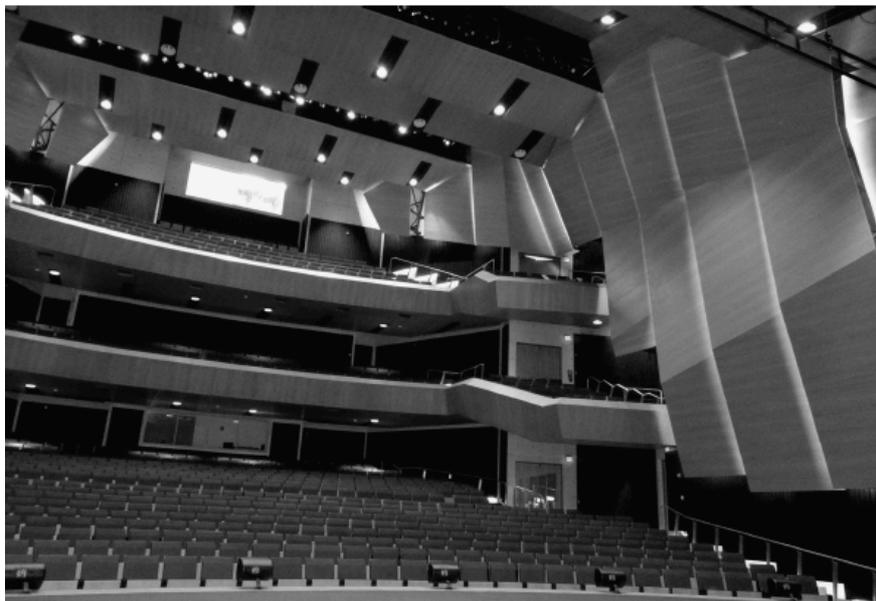


Figura 16 - Utilizzo di superfici piane sulle pareti laterali e sulla facciata del balcone nel Centro de Bellas Artes Humacao a Puerto Rico [1].

Considerando la risposta in frequenza di una singola superficie piana, mostrata in Figura 17, si può notare come l'uso di una superficie piana provochi un effetto pettine (in inglese chiamato "comb filtering"), caratterizzato da minimi e massimi di pressione sonora intervallati in maniera regolare.

Il comportamento di questa tipologia di superfici dipende molto dal rapporto tra le dimensioni della lunghezza d'onda sonora incidente e le dimensioni della superficie. Infatti alle basse frequenze, cioè a lunghezze d'onda molto grandi, la risposta scatterizzata è simile a quella di un dipolo, come se l'onda sonora consideri acusticamente invisibile la superficie, mentre al crescere della frequenza, e relativo abbassamento della lunghezza d'onda, la risposta scatterizzata diventa più selettiva nella direzione speculare; considerando  $\lambda = \text{lunghezza d'onda sonora}$  e  $d = \text{dimensione superficie}$  la Figura 18 mostra quanto detto .

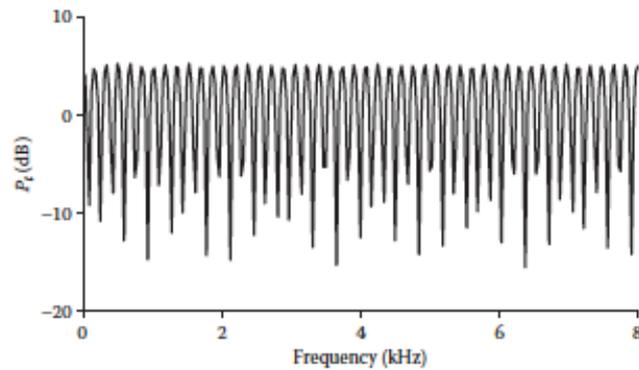


Figura 17 - Risposta in frequenza di una superficie piana [1].

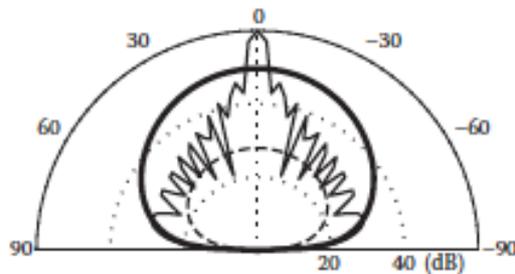


Figura 18 - Risposta polare scatterizzata di una superficie piana in campo lontano per 3 frequenze differenti: linea tratteggiata:  $\lambda \gg d$ , linea in grassetto:  $\lambda \approx d$ , linea continua:  $\lambda \ll d$  [1].

Utilizzando un array di superfici piane, caso più reale date le usuali grandi dimensioni delle superfici da trattare, la risposta in frequenza varia in base alla posizione dei ricevitori:

- **in campo lontano:** alle basse frequenze, il comportamento è identico a quello presentato da una singola superficie piana (dipolo), con un'energia più grande per la maggior superficie occupata dall'array di pannelli rispetto ad un singolo pannello piano; alle medie frequenze gli effetti della periodicità dei pannelli saranno facilmente dominati, attraverso il calcolo della posizione dei lobi maggiori; alle alte frequenze domina la riflessione speculare, assumendo un comportamento analogo a quello di un singolo pannello con una potenza irradiata maggiore dovuta ad una maggiore superficie occupata dall'array di pannelli.

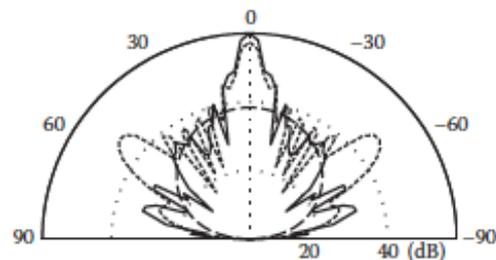


Figura 19 - Risposta polare scatterizzata di un array di superfici piane in campo lontano per 3 frequenze differenti: linea tratteggiata:  $\lambda \gg d$ , linea in grassetto:  $\lambda \approx d$ , linea continua:  $\lambda \ll d$  [1].

- **in campo vicino:** aspetto molto importante da considerare, in quanto nei casi reali i diffusori sono posizionati solitamente in prossimità della sorgente e dei ricevitori. Alle alte frequenze la riflessione speculare di ogni pannello è importante, provocando una distribuzione dell'energia diffusa molto irregolare; alle medie frequenze si nota maggiormente questa successione di massimi e minimi nella distribuzione polare, dovuta ai diversi cammini sonori tra i singoli pannelli dell'array e il ricevitore lungo l'asse x; alle basse frequenze il comportamento è simile a quello visto precedentemente in campo lontano.

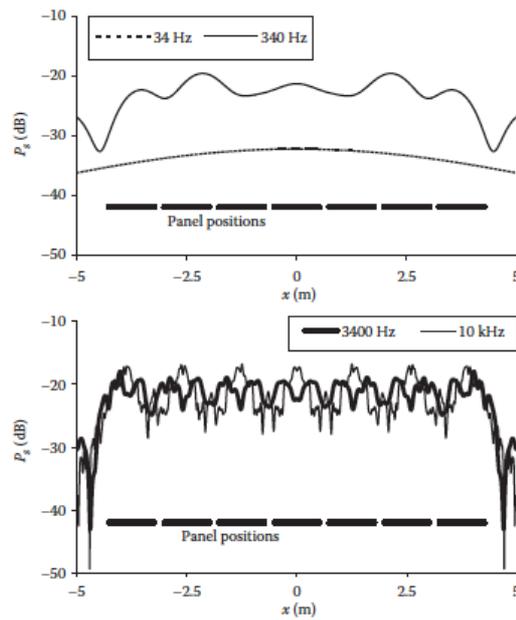


Figura 20 - Livelli scatterizzati in campo vicino da un array di pannelli piani disposti lungo una linea retta per diverse frequenze. Le posizioni dei pannelli nella direzione  $x$  sono mostrati nella parte inferiore dei grafici [1].

### 1.3.2.2. *Triangoli e piramidi*

Triangoli, cunei e piramidi possono mostrare un comportamento diffusivo molto variegato, passando da un buon diffusore a generatori di riflessioni speculari, in base alla loro geometria. Ad esempio, utilizzando il metodo ray-tracing, è possibile analizzare come modificando l'angolo dei triangoli  $\chi$  varia completamente la loro risposta diffusiva, come mostrato dalla seguente Figura 22.



Figura 21 - Modello di piramide: Golden GRG pyramid [1]

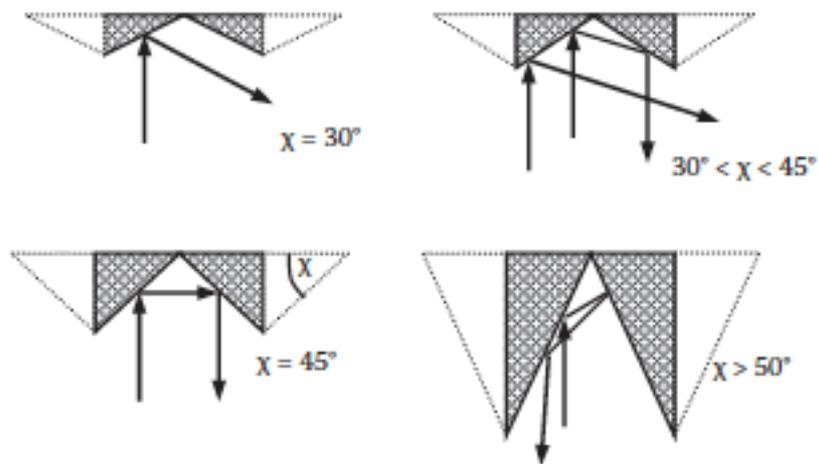


Figura 22 – Ray-tracing del suono riflesso dal centro di un paio di triangoli [1].

Ad esempio, con angoli molto stretti,  $\chi \leq 30^\circ$ , si comporta come un filtro “notch”, filtro selettivo che riduce l’energia nella direzione speculare; con  $30^\circ < \chi < 45^\circ$ , presenterà un insieme di riflessioni singole e doppie; caso particolare è con  $\chi = 45^\circ$ , in cui l’energia ritorna verso la sorgente, tipico dei “reflector corner”. Rendendo questo  $\chi$  sempre più grande, con conseguenti triangoli più stretti, questa tipologia di diffusori presenterà una struttura risonante, con conseguente rischio di assorbimento per risonanza.

In casi pratici si utilizzano array di triangoli per trattare intere superfici di una stanza ed è stato dimostrato che utilizzando sequenze di triangoli con profondità differenti porti ad un miglioramento dell’abbattimento dell’energia speculare.

Tutto quanto detto e analizzato in 2D, è valido anche per strutture piramidali 3D.

### 1.3.2.3. Superfici concave

Le superfici concave portano ad una distribuzione irregolare all’interno di una stanza, provocando echi e colorazioni del timbro, poiché il suono incidente viene riflesso e focalizzato in un punto specifico, detto appunto “punto focale”. Tuttavia, è stato dimostrato che questa focalizzazione dipende dalla posizione delle sorgente, dei ricevitori e dal raggio dell’arco concavo. La seguente Figura 23 mostra la riflessione di un arco concavo a differenti distanze dal ricevitore: come si può notare il fenomeno della focalizzazione del suono interessa solo la zona vicino al punto focale. Ponendo questo punto focale lontano dagli ascoltatori, anche le superfici concave possono essere

considerate dei diffusori. Esistono altri metodi per risolvere questo problema: ponendo ad esempio dei diffusori o degli assorbitori all'interno dell'area concava. La Figura 23 mostra il miglioramento diffusivo ottenuto utilizzando un diffusore curvo ottimizzato all'interno dell'area concava.

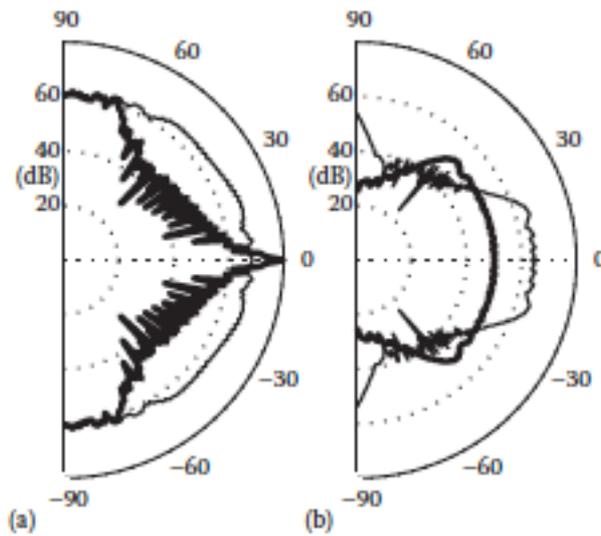


Figura 23 - Livello di pressione riflessa da un arco concavo per differenti raggi di distanza dei ricevitori,  $r$ .  $r_f$  è la lunghezza focale della superficie concava. (a) linea continua  $r < r_f$ , linea spessa  $r = r_f$ ; (b) linea continua  $r > r_f$ , , linea spessa  $r \gg r_f$  [1].

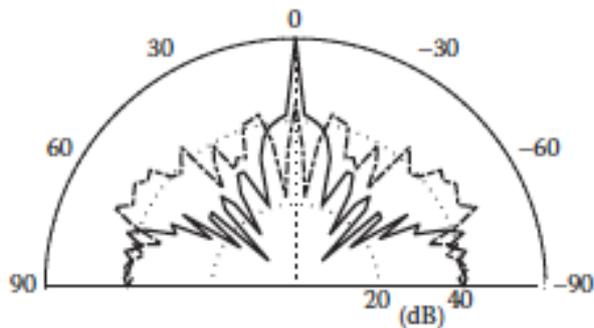


Figura 24 – A sinistra: riflessione di un arco concavo confrontato con un diffusore curvo ottimizzato a 3 KHz, linea continua: arco concavo e linea tratteggiata: diffusore curvo ottimizzato. A destra: superficie curva ottimizzata (Waveform) nella Edwina Palmer Hall [1].

#### 1.3.2.4. *Superfici convesse*

In questa tipologia di superfici rientrano i semi-cilindri e le semi-sfere. I diagrammi polari dei semi-cilindri sottolineano un buon comportamento diffusivo, tuttavia questi rappresentano una tipologia ancora poco studiata perché suonano in maniera differente dal buon diffusore che dovrebbero essere. Infatti, la risposta in frequenza di un grande semi-cilindro risulta essere molto simile a quella di una superficie piana precedentemente vista, con conseguente “comb filtering”; l’unica differenza sembra essere la minor variazione dei massimi e minimi di pressione sonora.



Figura 25 - Esempio di diffusore policindrico: PolyFusor Evolution [19].

E' stato dimostrato che solo un semi-cilindro ad incidenza normale riesce a produrre una diffusione uniforme, qualora non si possa utilizzare un semi-cilindro, piuttosto che utilizzare ellissi (semi-cilindri appiattiti) o sezioni circolari, è consigliabile utilizzare array di semi-cilindri o forme curvate più complesse.

Qualora volessimo trattare ampie superfici, un solo semi-cilindro non basterebbe, perciò risulta necessario utilizzare un array di semi-cilindri. Quando si usa questa tipologia di array il comportamento diffusivo è una combinazione della risposta del singolo semi-cilindro e degli effetti della periodicità.

E' stato dimostrato che utilizzare sequenze casuali o pseudocasuali portano ad un miglioramento della risposta diffusiva nelle frequenze medie, mentre nelle altre il risultato è pressoché identico a quello di una sequenza periodica, con una netta diminuzione di pressione sonora riflessa a circa  $\pm 90^\circ$  in caso di incidenza normale.

Inoltre utilizzare una sequenza casuale migliora la risposta in frequenza limitando le variazioni del comb filtering, come mostrato nella seguente Figura 26.

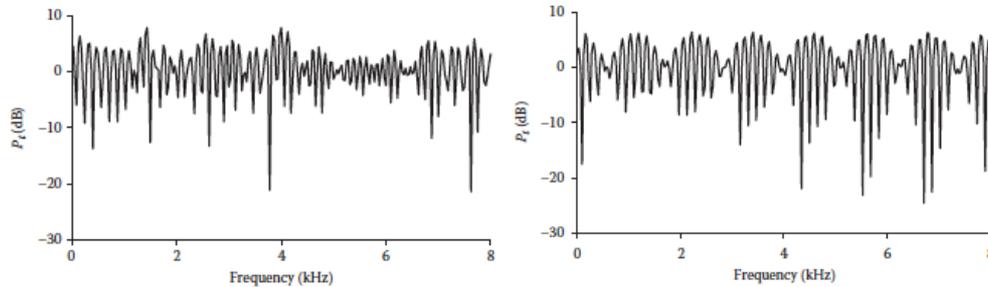


Figura 26 - Risposta in frequenza di un campo sonoro: a sinistra quello ottenuto con un array disposto in maniera casuale, a destra quello di un array di semi-cilindri disposti periodicamente [1].

### 1.3.2.5. Superfici curve ottimizzate

Create per rispondere alla domanda crescente dei designer riguardo la possibilità di ottenere forme estetiche dei diffusori che si amalgamassero con l'ambiente piuttosto che essere considerate delle aggiunte funzionali. Utilizzando una vecchia tecnica di valutazione della diffusione sonora con la deviazione standard diffusiva STD, secondo cui più questo parametro è basso migliore è la distribuzione spaziale, si è notato che le superfici curve ottimizzate presentano il comportamento migliore per incidenze sonore casuali rispetto a superfici piane e archi circolari. Come accennato per le altre tipologie di diffusori, in casi pratici si utilizzano più superfici curve con conseguente periodicità della struttura. Questa periodicità porta a generare numerosi lobi radiali alle basse e alte frequenze. Per ottenere una distribuzione diffusa più uniforme si può utilizzare una modulazione pseudocasuale che ne allunga il periodo con conseguente miglioramento diffusivo. Fattore importante è il completo allineamento tra i moduli che costituiscono la sequenza, altrimenti si creerebbero spigoli di cattivo gusto estetico.

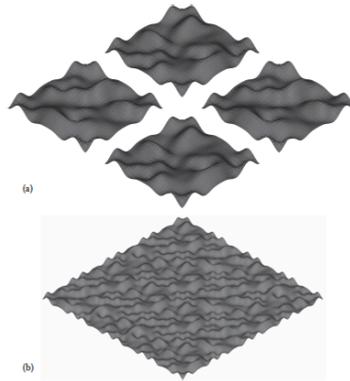


Figura 27 - (a) Un modulo base usato per la modulazione in differenti possibili orientazioni. (b) Un array 4 x 4 modulato del modulo base [1].

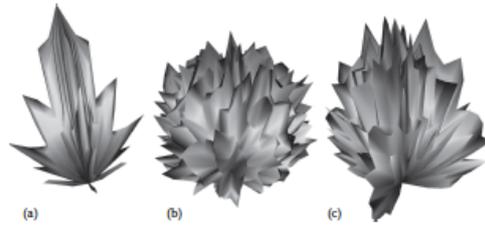


Figura 28 - Tre risposte polari per scattering a 2 KHz. (a) Superficie piana; (b) array modulato ottimizzato; (c) archi periodici [1].

## 2. RIFLESSIONE SONORA: COEFFICIENTE DI SCATTERING E DI DIFFUSIONE SONORA [1]

La riflessione sonora è un fenomeno che si verifica ogni volta che l'onda lungo il suo tragitto incontra un ostacolo: in base alle caratteristiche fisiche dell'ostacolo, l'onda verrà riflessa in una direzione piuttosto che un'altra, oppure equamente in tutte le direzioni.

Per questa ragione, le dimensioni geometriche dell'ostacolo, o meglio del diffusore, rappresentano un aspetto importante da prendere in considerazione nelle simulazioni. Infatti, affinché si verifichi il fenomeno di riflessione diffusa, le irregolarità superficiali del materiale diffondente devono essere di dimensione paragonabile alla lunghezza d'onda del suono incidente. Grandezze superiori o inferiori, porterebbero a riflessioni speculari, ossia alla riflessione in una sola direzione con angolo uguale a quello dell'onda incidente, come mostrato in Figura 29 [20].

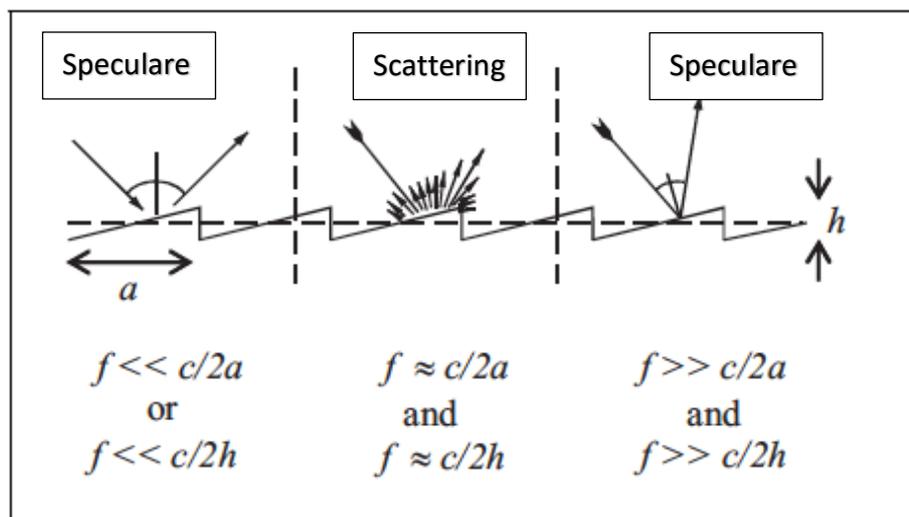


Figura 29 - Intervalli di frequenza per scattering per una superficie periodica con periodo lungo  $a$  e profondità rugosa  $h$  [20].

L'interesse nei confronti delle proprietà diffondenti dei materiali e, di conseguenza, dei metodi per misurarle, è sorta soltanto negli ultimi due decenni.

Questa tendenza è dovuta principalmente a due fattori: migliorare l'accuratezza dei modelli di acustica geometrica ( Geometric Room Acoustic Model: GRAM) e conferire un valore che potesse classificare i materiali diffondenti in base al loro grado di diffusività.

Due aspetti che rispondono ad esigenze diverse, seppur correlate, hanno richiesto l'utilizzo di due coefficienti separati: il coefficiente di scattering da utilizzare nei GRAM e il coefficiente di diffusione sonora utile per i produttori di materiali diffondenti.

Questa distinzione, tuttavia, non risulta essere così ben definita, tanto da portare studiosi e ricercatori a chiarire l'utilizzo di un coefficiente piuttosto che un altro: il coefficiente di scattering è un valore quantitativo che rappresenta quanta energia si riflette in maniera non speculare, invece il coefficiente di diffusione sonora fornisce utili informazioni riguardo l'uniformità delle riflessioni sonore [ [1], [20]].

Un'ulteriore conferma della loro natura differente è data dalla standardizzazione di due norme ISO: la ISO 17497-1 per il coefficiente di scattering e la ISO 17497-2 per il coefficiente di diffusione sonora.

Il seguente schema chiarisce le loro differenze [1] :

	Scattering, ISO 17497-1	Diffusione, ISO 17497-2
Utilizzo	GRAM	Valutazione diffusività e specifiche comportamento diffusivo
Tipo	Incidenza casuale in camera riverberante	in Metodo a campo libero in camera anecoica o in zone libere da riflessioni
Predizione coefficienti?	Possibile ma lenta	Si e veloce
Requisiti campione		
Assorbimento	Basso, $\alpha < 0.5$	Nessun limite
Fattore di scala	Full scale o in scala	Full scale o in scala
Profondità campione	Superficiale	Nessun limite

*Tabella 1 - Confronto tra coefficiente di scattering e coefficiente di diffusione sonora*

Prima di analizzare accuratamente i due coefficienti, un confronto grafico è dato dalla Figura 30 : si può notare come l'andamento dei due coefficienti sia differente, tanto da avere un coefficiente di diffusione sonora notevolmente inferiore al coefficiente di scattering; questo è dovuto ad un'interpretazione sbagliata del fenomeno di

reindirizzamento verso la sorgente sonora che viene visto dal coefficiente di scattering come quantità di energia riflessa non specularmente.

L'esempio, inoltre, sottolinea come risulti utile il coefficiente di diffusione sonora quando è importante la qualità della dispersione spaziale, piuttosto che il coefficiente di scattering.

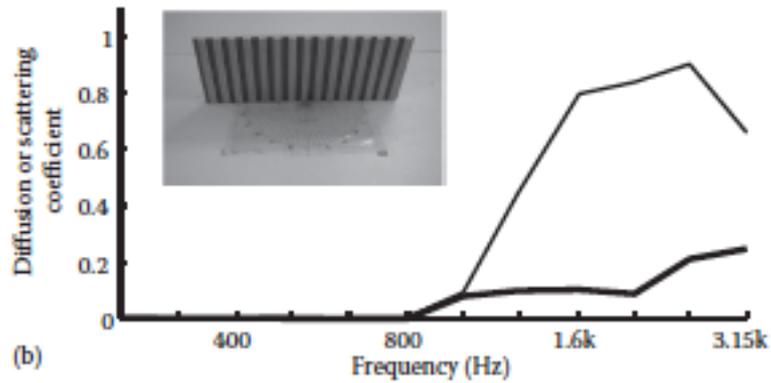


Figura 30- Risposta in frequenza del coefficiente di diffusione e di scattering di listelli in legno: linea normale è il coefficiente di scattering correlato e la linea in grassetto è il coefficiente di diffusione normalizzato. Il campione è fatto di listelli in legno come mostrato in figura [1].

## 2.1. Coefficiente di diffusione sonora

Il coefficiente di diffusione sonora si è rivelato un importante strumento di valutazione da parte dei produttori di diffusori, poiché restituisce una stima di quanto uniformemente il diffusore distribuisce l'energia incidente, ovvero fornisce una stima della qualità della diffusione sonora.

Come analizzato nel precedente capitolo, il primo a definire un criterio per valutare il grado di diffusività di un materiale è stato Schroeder, definendo un materiale un ottimo diffusore se produceva lobi polari con la stessa energia in tutte le direzioni.

Tuttavia, questo criterio si è rivelato poco utile, in quanto la maggior parte dei diffusori non-periodici non presentavano lobi distintivi con sufficiente energia rispetto ad altri.

Questo ha portato allo sviluppo di nuovi criteri, dei quali il più utilizzato è l'ottimizzazione numerica che ha portato alla realizzazione di diffusori con un design che si integra meglio con l'arredamento dell'ambiente di installazione, senza essere legato ai principi originali di Schroeder, analizzati nel precedente capitolo e denominati come "superfici curve ottimizzate".

La necessità di avere un coefficiente di diffusione sonora è dovuta principalmente a due motivi:

1. alla richiesta da parte dei produttori di un parametro standardizzato che possa classificare la qualità diffusiva dei materiali diffondenti;
2. condensare i dati relativi alle risposte polari, dal momento che esse contengono di per sé una considerevole quantità di informazioni, che si amplificano per ogni banda di frequenza e angolo di incidenza.

Tuttavia, solo in epoca recente questa necessità ha trovato risposta nell'emanazione di un metodo di misura standardizzato: la norma ISO 17497-2 [21], derivante dalla AES-4Id-2001 [22] che di seguito verrà approfondita.

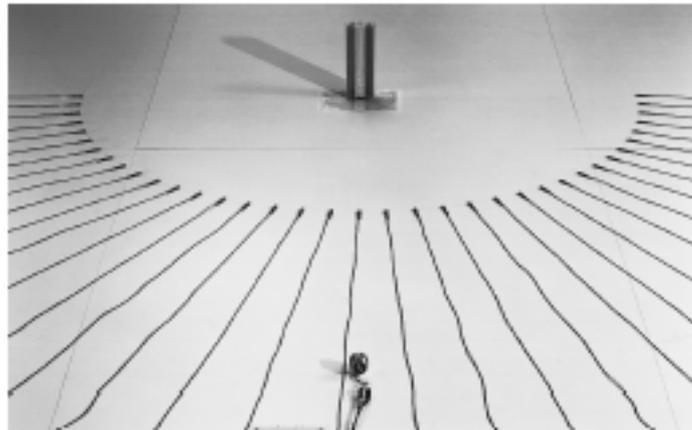
### 2.1.1. Misura dei diagrammi polari di radiazione

La misura dei diagrammi polari di radiazione in campo libero è il primo passo da seguire per ottenere il coefficiente di diffusione sonora.

La metodologia deriva da quella utilizzata per ottenere le risposte polari degli altoparlanti, che prevede la misura della distribuzione dell'energia sonora su un semicerchio o emisfero intorno alla sorgente.

Generalmente le distribuzioni polari dipendono dall'angolo di incidenza e dalla frequenza, anche se un diffusore ideale dovrebbe avere distribuzioni polari indipendenti dall'angolo di incidenza, dall'angolo di osservazione e dalla frequenza.

Le misure vengono fatte facendo variare l'angolo di incidenza e quindi spostando la sorgente: i ricevitori sono posti su un semicerchio, nel caso di una risposta polare 2D (Figura 31), oppure su una semisfera, nel caso di risposta polare 3D (Figura 32).



*Figura 31 - La figura mostra il sistema di misura della diffusione su piano riflettente. Si vedono: in alto il diffusore, al centro di un arco di 37 microfoni e in basso la sorgente [22].*



*Figura 32 – La figura mostra il sistema di misura della diffusione emisferica, in camera anecoica. Si vedono: arco esterno dove è posta la sorgente, un arco interno trasparente dove sono posti i microfoni, ed al centro il diffusore [22].*

La scelta di una delle due metodologie è principalmente dovuta alla tipologia di diffusore da testare: se si tratta di diffusori monodimensionali, si utilizza la misura su un semicerchio, mentre se dobbiamo testare diffusori bidimensionali, utilizzeremo la metodologia su una semisfera [21], [23].

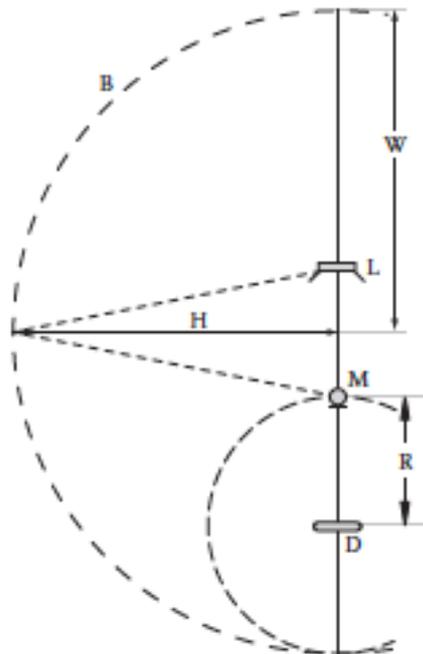
La prima prevede l'uso di postazioni microfoniche fisse, mentre la seconda prevede l'uso di un singolo microfono che si muove lungo l'arco emisferico.

Grazie alla semplicità costruttiva e alla possibilità di effettuarla anche in ambienti non anecoici (purché molto più grandi del diffusore da testare), l'utilizzo di postazioni microfoniche su un semicerchio è preferibile rispetto all'altra metodologia.

Infatti, la norma ISO 17497-2 stabilisce anche le distanze necessarie affinché un ambiente ordinario possa essere considerato privo di riflessioni.

La procedura viene sinteticamente così descritta: considerando il raggio di distanza tra il microfono e il diffusore, le dimensioni della stanza possono essere definite secondo lo schema mostrato in Figura 33, portando le dimensioni minime richieste per la camera a  $H = 2.45R$  e  $W = 2.5R$ .

Le notevoli dimensioni suggeriscono, di conseguenza, l'uso di un modello in scala.



*Figura 33 - Pianta della geometria di una zona libera da riflessione per la misura su singolo piano. Altoparlante (L), microfono (M), diffusore (D), raggio microfono (R), bordi camera (B), e assi ellisse (H) e (W) [21].*

Inoltre, la norma ISO 17497-2 definisce la posizione dei microfoni tale da avere una risoluzione minima accettabile di  $5^\circ$  e separazione tra due angoli di incidenza non

superiore a  $10^\circ$ ; tuttavia, si reputa spesso sufficiente considerare solo posizioni sorgente a  $0^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$  e  $\pm 60^\circ$ .

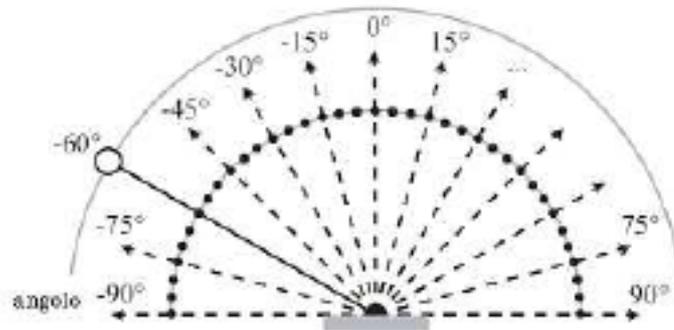


Figura 34 - La figura mostra lo schema di misura della diffusione su piano riflettente [24].

Un ultimo fattore da tenere in considerazione nelle misure del coefficiente di diffusione sonora è la presenza dei ricevitori in campo lontano piuttosto che in campo vicino rispetto al campione.

Nonostante nelle applicazioni reali la distanza degli ascoltatori dai materiali diffondenti è piuttosto piccola, rientrando di fatto nelle condizioni di campo vicino, è necessario valutare il comportamento diffusivo dei materiali in campo lontano. Infatti, in campo vicino la riflessione è come se fosse irradiata da una sorgente immagine con la stessa energia su tutti i ricevitori, portando ad una sovrastima della qualità di diffusione sonora [25].

Per tale motivo, la norma ISO, stabilisce che almeno l'80% dei ricevitori deve essere fuori dalla zona di riflessione speculare (Figura 35).

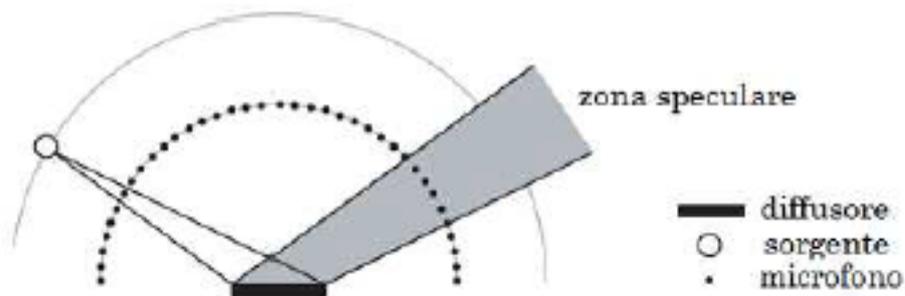


Figura 35 - La zona di riflessione speculare [24].

Tuttavia, la misura in campo vicino può essere utile nel caso si voglia valutare gli effetti diffusivi nelle vicinanze del dispositivo, come ad esempio all'interno di ambienti reali, oppure per valutare eventuali effetti di focalizzazione dovuti a particolari geometrie, come i diffusori concavi.

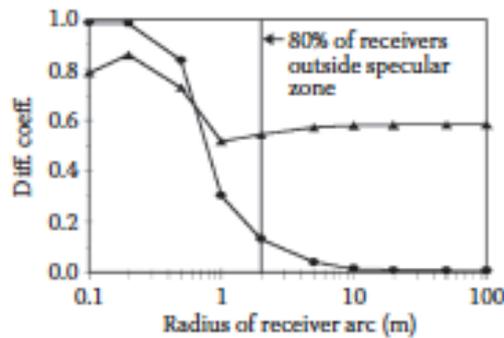


Figura 36 - Effetto del raggio di distanza dell'arco dei ricevitori sul coefficiente di diffusione. Linea con pallino per pannello di riferimento piano, linea con triangolo per diffusore binario a diffusività casuale [21].

La figura seguente illustra la metodologia sulla quale si fonda l'estrapolazione dei dati per ottenere la sola risposta all'impulso scatterizzata.

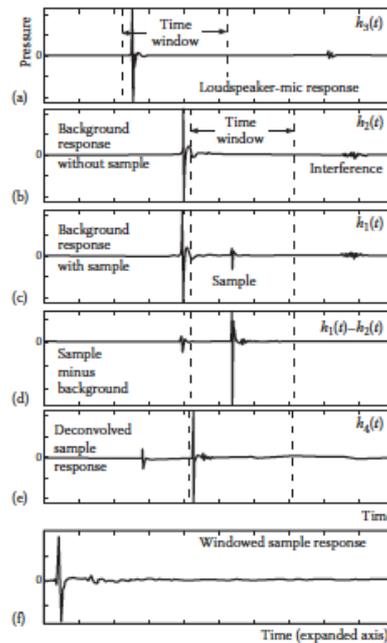


Figura 37 - (a) - (f) Processo di riduzione dati per l'estrapolazione della risposta all'impulso scatterizzata da un campione ad un dato angolo di osservazione [21].

Il processo schematizzato è brevemente descritto:

- è necessario deconvolvere la risposta sorgente-microfono prodotta dalla catena di misura, ottenendo  $h_3(t)$ ;
- si misura la risposta all'impulso senza campione, ottenendo la risposta all'impulso  $h_2(t)$ ;

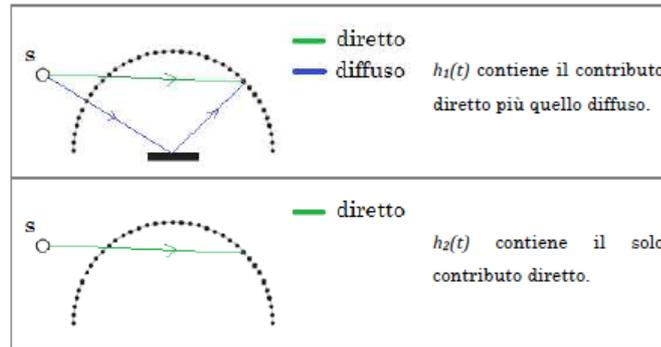


Figura 38 - Modalità di misura  $h_1(t)$  e  $h_2(t)$  [24].

- si misura la risposta all'impulso con campione, ottenendo la risposta all'impulso  $h_1(t)$ ;
- si sottraggono le risposte all'impulso,  $h_1(t) - h_2(t)$ , portando ad una netta diminuzione del suono diretto, divenendo praticamente trascurabile, e delle interferenze ambientali nella finestra temporale considerata;
- infine, si ottiene la risposta all'impulso del diffusore,  $h_4(t)$ , utilizzando la seguente formula:

$$h_4(t) = \text{IFT} \left\{ \frac{\text{FT}[h_1(t) - h_2(t)]}{\text{FT}[h_3(t)]} \right\}$$

dove FT e IFT sono rispettivamente Fourier Transform e Inverse Fourier Transform.

Tutte le applicazioni vengono ripetute per tutti i ricevitori e quindi vengono calcolati i valori RMS per ogni terzo di ottava di interesse.

Un'ulteriore immagine aiuta alla comprensione della metodologia: in questo caso sono state considerati solo 5 risposte all'impulso microfoniche delle 37 presenti e effettuata

una normalizzazione rispetto ad un campione di riferimento piano, per rimuovere l'effetto di diffrazione dei bordi che enfatizza il coefficiente di diffusione alle basse frequenze.

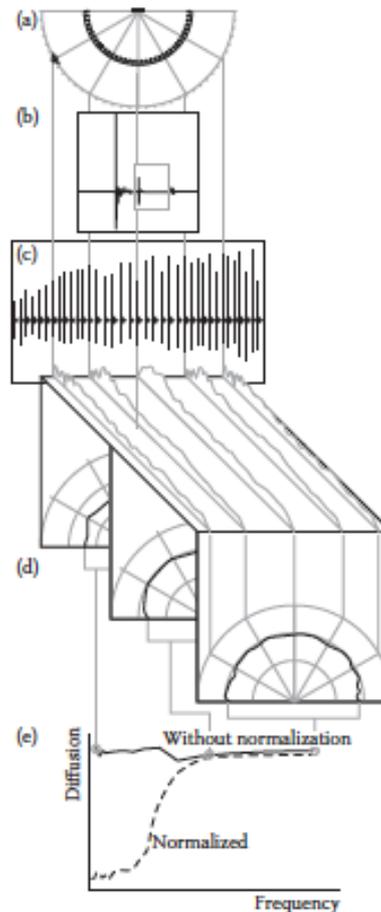


Figura 39 - (a) - (e) Sintesi del processo di estrapolazione dati da un diffusore posto a  $-60^\circ$  di incidenza [25].

Da considerare, come risulti più appropriato misurare il coefficiente di diffusione su almeno 4 periodi del campione per simulare accuratamente la realistica installazione in ambienti reali [21].

Questo infatti porta a valori prossimi a 0.6 piuttosto che a 1, valore massimo riscontrabile con un solo periodo del campione.

Di seguito si analizzerà come sia possibile calcolare il coefficiente di diffusione, attraverso semplici operazioni statistiche.

### 2.1.2. CALCOLO DEL COEFFICIENTE DI DIFFUSIONE

A questo punto i valori RMS vengono usati per il calcolo del coefficiente di diffusione angolare  $d_\vartheta$

Si utilizza poi una funzione intermedia di autocorrelazione ciclica tra i valori ottenuti e i vari ricevitori  $R_j$ , dove i ricevitori sono  $k = 1, 2, \dots, (N - 1)$  ed  $L_k$  i valori RMS di diffusione ad una determinata frequenza per gli  $N$  ricevitori:

$$R_j = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} 10^{\frac{L_k}{10}} 10^{\frac{L_{((k+j) \bmod N)}}{10}}}{\sum_{k=0}^{N-1} \left(10^{\frac{L_k}{10}}\right)^2} \quad \text{dove } j = 1, 2, \dots, N - 1$$

da questa se ne calcola la media per ottenere una singola figura di merito  $d_\varphi = \bar{R}_j$ .

L'operazione di autocorrelazione e media può essere compattata in una sola formula:

$$d_\varphi = \frac{\left(\sum_{k=0}^{N-1} 10^{\frac{L_k}{10}}\right)^2 - \sum_{k=0}^{N-1} \left(10^{\frac{L_k}{10}}\right)^2}{(N - 1) \sum_{k=0}^{N-1} \left(10^{\frac{L_k}{10}}\right)^2}$$

Infine, in accordo con quanto analizzato con il processo di misura, di seguito è riportata l'equazione per effettuare la normalizzazione di un diffusore, calcolando il coefficiente di diffusione normalizzato  $d_{\varphi,n}$ :

$$d_{\varphi,n} = \frac{d_\varphi - d_{\varphi,r}}{1 - d_{\varphi,r}}$$

dove  $d_\varphi$  è il coefficiente di diffusione per il test campione e  $d_{\varphi,r}$  il coefficiente di diffusione per la superficie piana di riferimento con le stesse dimensioni del campione.

## 2.2. Coefficiente di scattering

Il coefficiente di scattering è la quantità che definisce il rapporto dell'energia riflessa non specularmente con l'energia totale riflessa (Figura 40).

Come accennato precedentemente, la necessità di calcolare il coefficiente di scattering è legata principalmente alla maggiore accuratezza che fornisce nei modelli acustici geometrici (GRAM).

Infatti, in origine i modelli di simulazione acustica non consideravano lo scattering dei materiali portando ad una sovrastima dei tempi di riverbero [26], [27], [28], [29] soprattutto in ambienti con un campo sonoro non uniforme, come molte sale da concerto; oppure ad un'errata valutazione dei parametri fortemente correlati con le prime riflessioni sonore, come la frazione dell'energia sonora laterale iniziale e la chiarezza [30].

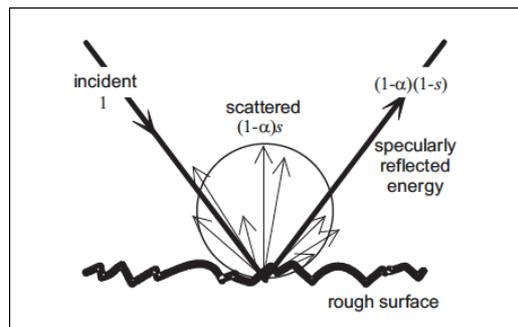


Figura 40 - Illustrazione della separazione dell'energia riflessa nella componente scatterizzata e speculare [31].

Il coefficiente di scattering è un valore quantitativo e come tale non restituisce alcuna informazione riguardo la direttività dell'energia scatterizzata, dimostrandosi uno strumento di valutazione nettamente differente dal coefficiente di diffusione.

Infatti, questo valore viene utilizzato come input nell'algoritmo di simulazione per trattare la parte dell'energia restante da quella trattata in maniera speculare [1], poiché nelle simulazioni acustiche la distribuzione dell'energia diffusa segue la legge del coseno di Lambert [32], [33].

La scelta della legge del coseno di Lambert risulta particolarmente appropriata poiché rispetta la filosofia dei modelli di acustica geometrica che si basano sulle tecniche ad alta frequenza.

Un'altra caratteristica del coefficiente di scattering è la sua stretta correlazione con il coefficiente di assorbimento e, a dimostrazione di ciò, anche il coefficiente di scattering dipende dalla frequenza e dall'angolo di incidenza del suono; per tale motivo, si utilizza il suo valore medio angolare per ottenere il coefficiente di scattering ad incidenza casuale s.

Di seguito si approfondiranno le metodologie di misura e il principio che vi sono alla base.

### 2.2.1. Principi concettuali

Il principio sulla quale si fonda la misura del coefficiente di scattering è dato dallo studio condotto da Vorlander e Mommertz [31], che, misurando diverse risposte all'impulso a differenti orientazioni del campione, hanno notato come la prima parte di esse restava immutata mentre la parte finale tendeva ad eliminarsi, come si può notare in Figura 41.

Infatti, il fenomeno è verificato dal principio di Fermat (Figura 42), secondo cui la prima parte di ogni riflessione percorre il cammino tra la sorgente e il ricevitore nel minor tempo possibile. Questa prima parte, come si può dedurre, si riferisce alla prima parte della risposta all'impulso, ossia alla riflessione speculare.

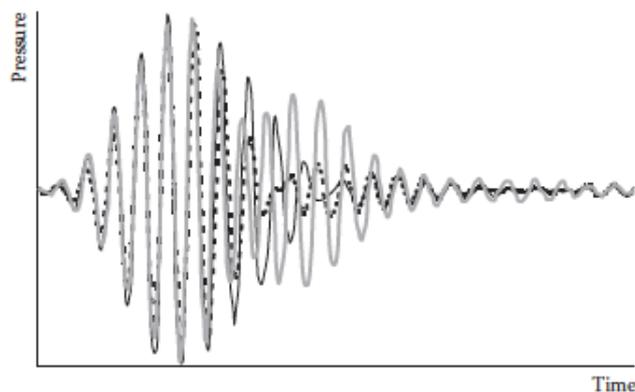


Figura 41 - Impulsi riflessi limitati in banda per differenti orientazioni del campione [31].

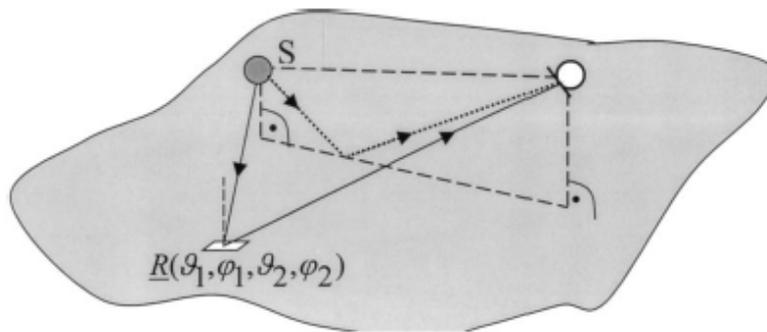


Figura 42 - Cammini delle riflessioni: linea tratteggiata riflessioni speculari secondo il principio di Fermat e linea continua riflessione scatterizzata [31].

Le energie contenute nelle riflessioni in Figura 42, possono essere espresse in termini di:

$$E_{\text{spec}} = (1 - \alpha)(1 - s) = 1 - \alpha_{\text{spec}}$$

$$E_{\text{total}} = (1 - \alpha)$$

$$s = \frac{\alpha_{\text{spec}} - \alpha}{1 - \alpha} = 1 - \frac{E_{\text{spec}}}{E_{\text{total}}}$$

Dove  $s$  è il coefficiente di scattering,  $\alpha$  il coefficiente di assorbimento,  $E_{\text{spec}}$  l'energia riflessa specularmente e  $E_{\text{total}}$  l'energia totale riflessa.

Particolare attenzione necessita il coefficiente  $\alpha_{\text{spec}}$ : è il "coefficiente di assorbimento speculare" e non viene dissipato in calore, ma riflesso in direzioni non speculari [1].

Come si può dedurre da questo ragionamento, l'approccio seguito è di estrarre la componente speculare  $E_{\text{spec}}$  dagli impulsi riflessi, utilizzando la media sincrona a fase bloccata, per poi sottrarla all'energia totale riflessa  $E_{\text{total}}$ .

Chiarita l'importanza di questo parametro e compreso il ragionamento su cui si basano i metodi di misura, di seguito si analizzano i principali metodi di misura.

## 2.2.2. Metodi di misura

Per dimostrare il ragionamento sulla quale si fonda la misura in campo libero e quella in camera riverberante, inerenti la misura del coefficiente di scattering ad incidenza casuale, risulta più semplice iniziare dal metodo a campo libero, nonostante il più performante risulti essere quello in camera riverberante.

### 2.2.2.1. Metodo a campo libero

Questa tipologia di misura, come suggerisce il nome stesso, è effettuata in camera anecoica o in qualsiasi ambiente privo di riflessioni.

In accordo al principio fondante per cui si sottrae l'energia riflessa specularmente da quella totale, il ricevitore è posto nella direzione speculare, come mostrato in Figura 43.

Il test campione viene fatto ruotare su un piatto e le risposte all'impulso riflesse vengono mediate attraverso una media sincrona a fase bloccata.

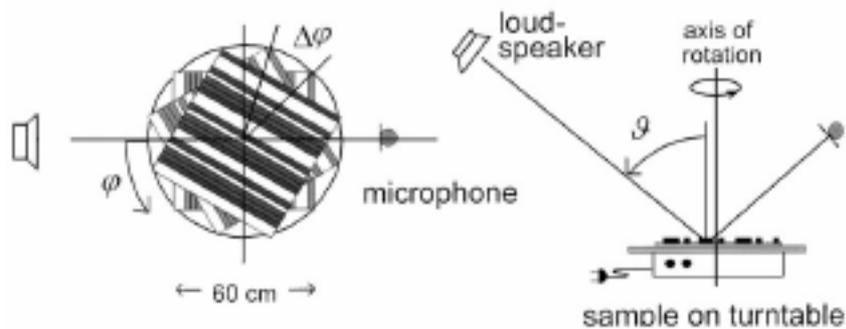


Figura 43 - Strumentazione per misura diretta coefficiente di scattering [31].

Alla base dell'utilizzo di questa particolare media, vi è sempre il ragionamento di Vorlander e Mommertz, per tale motivo risulta necessario approfondirne la formulazione teorica.

Considerando  $R_i(f)$  il fattore di riflessione complessa  $i$ -esimo, questo può essere espresso in termini di componente speculare e diffusa:

$$R_i(f) = R_{spec}(f) + S_i(f)$$

Poiché la componente speculare  $R_{spec}$  è ottenuta dalla somma coerente di  $n$  coefficienti di riflessione complessa in base alla variazione di orientamento del campione di prova  $\varphi_i$ , l'energia delle componenti speculari  $|R_{spec}(f)|^2$  si somma coerentemente in proporzione a  $n^2$ , mentre le componenti di scattering risultano incoerenti (infatti la loro energia aumenta proporzionalmente a  $n$  piuttosto che a  $n^2$ ).

Mediando su un numero abbastanza grande di orientazioni, la parte incoerente diventa trascurabile (Figura 44), portando alla seguente relazione:

$$R_{spec}(f) \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i(f) \quad \text{per } n \gg 1$$

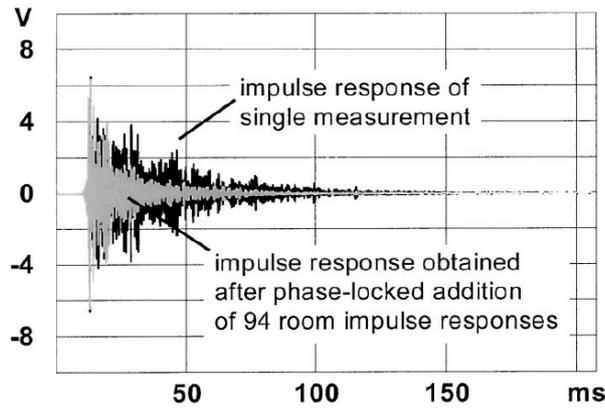


Figura 44 - Risposte all'impulso misurate in camera riverberante [31].

Di conseguenza, il coefficiente di assorbimento speculare è calcolato secondo questa equazione:

$$\alpha_{spec}(f) = 1 - |R_{spec}(f)|^2$$

Per il coefficiente di assorbimento ad incidenza casuale, invece, l'equazione è la seguente:

$$\alpha_s(f) \cong 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R_i(f)|^2$$

Infine, per ottenere il coefficiente di scattering ad incidenza casuale, sarebbe necessario mediare tutti gli angoli in un emisfero completo sopra il campione. Tuttavia, la formula di Paris [33] permette di calcolare la media su tutti gli angoli  $\theta$ , misurando soltanto la media sull'asse orizzontale  $\varphi$  per un solo angolo azimutale  $\theta$ .

Il procedimento in camera riverberante è molto simile, anche se deriva dalla ISO 354 e, come tale, ne rispecchia metodologia e condizioni ambientali.

### 2.2.2.2. *Misura in camera riverberante*

Come già anticipato, la misura in camera riverberante del coefficiente di scattering ad incidenza casuale secondo la ISO 17497-1, segue il procedimento del metodo a campo libero e di quello dettato dalla norma ISO 354 riguardo la misura del coefficiente di assorbimento ad incidenza casuale in camera riverberante.

Infatti, nei paragrafi precedenti, si può notare come il coefficiente di scattering dipenda da due coefficienti di assorbimento: il coefficiente di assorbimento ad incidenza casuale  $\alpha_s$  (misurato secondo la ISO 354) e il coefficiente di assorbimento speculare  $\alpha_{spec}$ .

Il coefficiente di assorbimento, per definizione, è dato dalla differenza di due tempi di riverbero, con e senza campione, perciò in questo caso, misureremo 4 tempi di riverbero: due per quello ad incidenza casuale e 2 per quello ad incidenza speculare.

Se per ottenere il coefficiente  $\alpha_s$  si necessita solo di una media spaziale, per ottenere l'energia nella sola direzione speculare, e di conseguenza  $\alpha_{spec}$ , sarà necessario utilizzare la media sincrona a fase bloccata.

Le formule seguenti, chiariscono quanto detto:

$$\alpha_s = 55,3 \frac{V}{S} \left( \frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_2 - m_1)$$

$$\alpha_{spec} = 55,3 \frac{V}{S} \left( \frac{1}{c_4 T_4} - \frac{1}{c_3 T_3} \right) - \frac{4V}{S} (m_4 - m_3)$$

Dove:

- i 4 tempi di riverbero saranno misurati nelle seguenti condizioni:

Tempo di riverbero	Test campione	Piatto rotante
--------------------	---------------	----------------

T <sub>1</sub>	Non presente	Fermo
T <sub>2</sub>	Presente	Fermo
T <sub>3</sub>	Non presente	In rotazione
T <sub>4</sub>	Presente	In rotazione

- V è il volume della camera riverberante
- S è l'area del test campione
- c è la velocità del suono nell'aria, precisamente:

Tempo di riverbero	Velocità del suono c
T <sub>1</sub>	c <sub>1</sub>
T <sub>2</sub>	c <sub>2</sub>
T <sub>3</sub>	c <sub>3</sub>
T <sub>4</sub>	c <sub>4</sub>

- m è il coefficiente di attenuazione sonora durante la misura, precisamente:

Tempo di riverbero	Coefficiente di attenuazione sonora m
T <sub>1</sub>	m <sub>1</sub>
T <sub>2</sub>	m <sub>2</sub>
T <sub>3</sub>	m <sub>3</sub>
T <sub>4</sub>	m <sub>4</sub>

Un'ulteriore dimostrazione del rispetto del ragionamento di Mommertz e Vorlander è data dalla sottrazione dell'energia speculare (presente solo in T<sub>3</sub> e T<sub>4</sub>) dall'energia riflessa totale (presente in T<sub>1</sub> e T<sub>2</sub>).

La norma ISO 17497-1 [34] verrà ulteriormente approfondita nel capitolo successivo.

Di seguito, invece, si analizzeranno i metodi per ricavare indirettamente il coefficiente di scattering.

### 2.2.3. Misura indiretta del coefficiente di scattering

In accordo con la definizione di Mommertz [35], il coefficiente di scattering può essere determinato dalla correlazione tra la direttività di riflessione del campione e quella di un campione piano di riferimento in campo libero, richiedendo la media di tutti gli angoli di orientazione del campione per ottenere il coefficiente di scattering ad incidenza casuale. Si tratta di un calcolo piuttosto laborioso, realizzabile da simulazioni numeriche come il metodo BEM (Boundary Element Method), metodo particolarmente indicato per lo studio dei diffusori geometrici.

Senza approfondire l'algoritmo di calcolo, si è analizzato il metodo della correlazione della direttività con la simulazione della rotazione del campione secondo il metodo di misura analizzato precedentemente [36]:

5. **Metodo della correlazione della direttività:** secondo la suddetta definizione di Mommertz, si utilizzano le due distribuzioni polari della direttività di riflessione del test campione e di un campione piano di riferimento e, integrando con la formula di Paris, si ottiene il coefficiente di scattering ad incidenza casuale:

$$s_{cor} = 1 - \frac{1}{N} \left| \sum_{n=1}^N R_{spec,n} \right|^2$$

2. **Metodo della rotazione del campione:** simulazione numerica del metodo in camera riverberante:

$$s_{rot} = 1 - \left| \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N R_{spec,n} \right|^2$$

Dalle due equazioni emerge la relazione di  $s_{rot} \geq s_{cor}$ , poichè la componente speculare  $R_{spec,n}$  non è costante ma dipende dall'angolo azimutale, come si può notare in Figura 45.

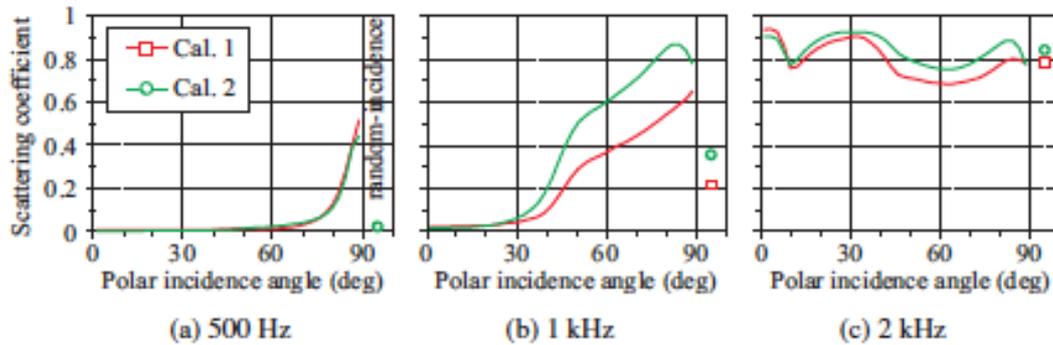


Figura 45 - Coefficiente di scattering dipendente dall'angolo di incidenza polare per un campione sinusoidale, calcolato con il metodo della correlazione della direttività (Cal. 1) e con il metodo della rotazione del campione (Cal. 2) [36].

Lo studio condotto da Sakuma e Kosaka [36] prevede l'uso di microfoni posti lungo tutto l'emisfero sovrastante il campione. In questo modo il risultato è maggiormente confrontabile con quello restituito dalla ISO rispetto a quello originale previsto da Mommertz e Vorlander [35] per superfici con scattering fortemente dipendenti dall'angolo incidente (i diffusori di Schroeder non rientrano tra questi, ma sono utili per utilizzare metodi di previsione più semplici del BEM).

I diffusori di Schroeder forniscono un'ulteriore semplificazione nel processo di predizione, data la possibilità di utilizzare il metodo di Fourier, metodo più semplice del BEM.

Nonostante sia limitato dalle basse frequenze e da grandi angoli di incidenza o riflessione, il metodo di Fourier restituisce simulazioni accurate [1].

Da precisare, che il valore del coefficiente di scattering  $s_{cor}$  si deve confrontare con quello a campo libero piuttosto che con quello restituito dalla norma ISO 17497-1. Infatti, la differenza risiede proprio al livello concettuale: come si è potuto notare sinora, il metodo a campo libero di Mommertz e Vorlander restituisce quanta energia viene riflessa in maniera non speculare mentre il campione ruota; il coefficiente di scattering correlato, invece, misura la differenza di scattering tra il campione e il campione di riferimento piano rispetto alla risposta polare, dimostrandosi un utile strumento nella comparazione tra coefficiente di diffusione e scattering.

I valori più alti di scattering si hanno con coefficienti di riflessione speculare  $R_{spec,n}$  con fase distribuita uniformemente tra 0 e  $2\pi$ .

Un esempio è dato dalla Figura 46, dove si possono notare i picchi del coefficiente di scattering ai multipli interi della frequenza per la quale è stato progettato il diffusore a radice primitiva (PRD).

Alla frequenza critica  $(N - 1)f_0 = 3 \text{ KHz}$ , invece, si ha un drastico calo del coefficiente di scattering.

Si precisa che i picchi massimi indicano semplicemente che in quelle frequenze non vi è alcuna riflessione speculare, senza fornire alcun'altra informazione sulla qualità della dispersione.

Un'ulteriore dimostrazione dell'accuratezza della predizione con Fourier è data dall'andamento simile dalle medio-basse frequenze con il coefficiente di scattering correlato.

Nel capitolo seguente si analizzerà nel dettaglio la norma ISO 17497-1 e le relative difficoltà tecniche.

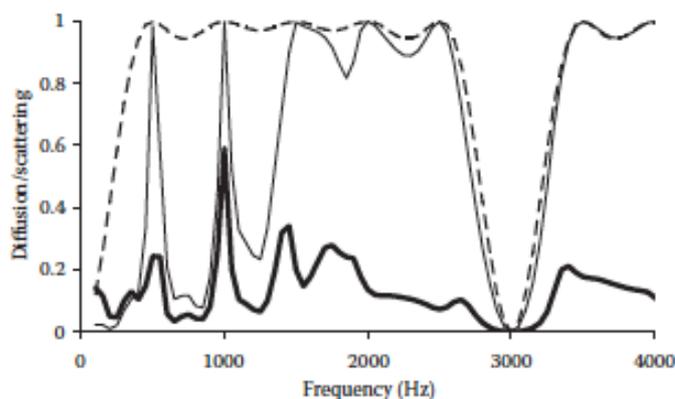


Figura 46 - Coefficienti di scattering e di diffusione per un PRD settato su una frequenza di 500 Hz: linea tratteggiata per il coefficiente di scattering predetto con Fourier, linea in grassetto per il coefficiente di diffusione normalizzato, e linea normale per il coefficiente di scattering correlato [37].

### 3. ANALISI PARAMETRI NORMA ISO 17497-1

La norma, come anticipato sinora, fornisce un metodo per la misura del coefficiente di scattering ad incidenza casuale in camera riverberante, sia a dimensione reale che in scala ridotta. Inoltre definisce anche alcuni parametri da rispettare per ottenere risultati affidabili.

Di seguito si riporta un estratto della norma ISO 17497-1 [34]:

#### 3.1. Norma ISO 17497-1 [34]

##### 3.1.1. Intervallo di frequenze

Per le misure si utilizzano bande di 1/3 d'ottava con frequenze centrali poste nell'intervallo da 100 Hz a 5000 Hz, nel caso di camera riverberante reale.

Se si utilizza un modello in scala 1:N, le frequenze di interesse sono da  $N \times 100$  Hz a  $N \times 5000$  Hz.

##### 3.1.2. Camera riverberante

Le specifiche della camera riverberante sono date dalla ISO 354 [38]:

- Volume:  $V \geq 200 \times N^{-3}$
- Forma:  $l_{max} < 1,9V^{1/3}$  dove  $l_{max}$  è la lunghezza della diagonale più lunga che collega i lati della camera. Inoltre, per ottenere una distribuzione uniforme, nessuna dimensione deve essere in un rapporto di numeri interi tra di loro.
- Diffusione del campo sonoro: si può ottenere utilizzando diffusori fissi o pannelli rotanti poco assorbenti con una densità superficiale di  $5 \text{ kg/m}^2$ . La dimensione dell'area deve variare tra  $0,8 \text{ m}^2$  e  $3 \text{ m}^2$ , leggermente curvi con un'orientazione casuale e disposti a coprire tutta la camera riverberante (solitamente per una camera rettangolare

risultano necessari pannelli diffondenti con un area totale corrispondente dal 15 al 25% dell'area totale della camera).

- Area di assorbimento equivalente della stanza vuota:  $A_1 \leq 0,30 \times V^{2/3}$

Nota: la conseguenza di ciò porta ad avere  $\frac{A_1}{S} \leq 1$ , dove S è l'area del campione di prova.

Frequenza, Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630
Area di assorbimento equivalente, m <sup>2</sup>	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5

Frequenza, Hz	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Area di assorbimento equivalente, m <sup>2</sup>	6.5	7.0	7.5	8.0	9.5	10.5	12.0	13.0	14.0

Tabella 2 - Valori massimi dell'area di assorbimento equivalente per una camera riverberante di volume  $V=200\text{ m}^3$

Se il volume  $V$  della camera differisce da  $200\text{ m}^3$ , i valori dati dalla Tabella 2 devono essere moltiplicati per  $(V/200\text{m}^3)^{2/3}$ .

### 3.1.3. Macchina rotante

La macchina rotante si utilizza per permettere la rotazione del campione di prova. Deve essere composta da una base rigida circolare e da un piastra di base di dimensione uguale alla dimensione massima del campione del materiale e simmetrica rispetto agli assi di rotazione. La macchina rotante deve essere distante almeno  $N^{-1} \times 1,0\text{ m}$  dalle pareti della stanza.

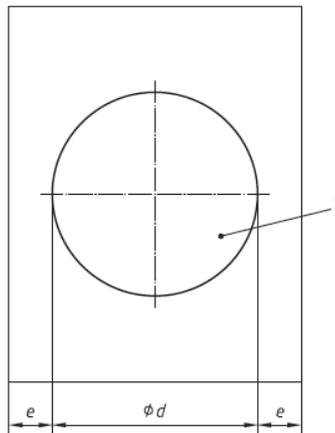


Figura 47 - Pianta di una camera riverberante con un piatto rotante per il test campione. 1 è il piatto rotante,  $d$  il diametro, e la distanza minima dalle pareti della camera

### 3.1.4. Campione di prova

Il campione di prova dovrebbe essere circolare con diametro minimo di  $N^{-1} \times 3,0 m$ . Alternativamente può essere anche di forma quadrata con angoli minimi di  $N^{-1} \times 2,65 m$  e piastra di base con diametro minimo di  $N^{-1} \times 3,75 m$ .

Se il campione di prova non è circolare, il montaggio deve essere “a filo”.

La profondità strutturale ammessa è:  $h \leq d/16$ , dove  $d$  è il diametro della macchina rotante.

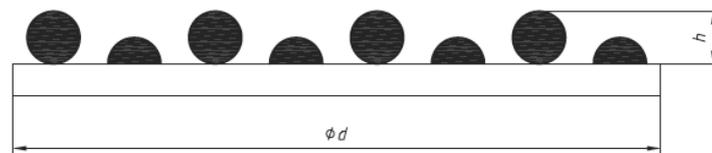


Figura 48 - Dettaglio campione secondo ISO 17497-1 [34].

Da considerare che gli effetti degli angoli provocati dalle variazioni dell'altezza del campione di prova portano a coefficienti di scattering più alti rispetto ad una superficie infinitamente estesa con la stessa struttura. Questo effetto può anche provocare coefficienti di scattering  $s > 1$ .

La superficie del perimetro del campione di prova deve essere coperta con del materiale smussato e rigido con altezza minima  $h$  e massima  $d/16$ , dove  $d$  è il diametro della macchina rotante.

Se il campione di prova ha simmetria rotazionale, può essere posizionata sulla macchina rotante in modo tale che il centro di simmetria è disallineato dal centro della macchina rotante di almeno  $d/8$ , dove  $d$  è il diametro della macchina rotante.

Il coefficiente di assorbimento ad incidenza casuale del campione di prova deve essere  $\alpha_s \leq 0.50$ , altrimenti valori più alti porterebbero a risultati non attendibili.

Ad esempio, se il coefficiente di assorbimento è maggiore di 0.5, è impossibile ottenere risultati attendibili sotto gli 800 Hz [37], a causa delle variazioni nei tempi di riverbero in camera riverberante che aumentano considerevolmente l'incertezza di misura.

### **3.1.5. Procedura di test**

Al fine di ottenere una media coerente, il segnale di test da utilizzare deve essere deterministico, portando, di conseguenza, all'utilizzo del metodo della risposta all'impulso integrata. Questa tipologia utilizza l'integrale inverso di Schroeder portando ad un risultato equivalente ad un numero infinito di decadimenti medi ottenuti con il metodo del rumore interrotto.

E' raccomandabile usare lo sweep sinusoidale per ottenere la risposta all'impulso, secondo la ISO 18233 [39].

Le posizioni delle sorgenti e ricevitori sono dettate dalla ISO 354, da notare come queste debbano essere scalate di un fattore di scala  $N$ , nel caso di modello in scala:

- Microfoni: devono essere omnidirezionali e posizionati ad una distanza di 1,5 m tra le varie posizioni microfoni, 2 m dalla sorgente sonora e 1 m dalle superfici della camera riverberante.
- Sorgente: deve essere omnidirezionale e posizionata in punti che distano 3 m gli uni dagli altri.
- Posizioni di misura sorgente-microfono: devono essere almeno 6, il numero minimo delle posizioni microfoniche deve essere 3 mentre il numero delle posizioni della sorgente deve essere almeno 2. È possibile utilizzare più

sorgenti sonori simultaneamente purchè la differenza di potenza emessa sia all'interno della tolleranza di 3 dB per ogni banda di 1/3 d'ottava.

Le risposte all'impulso sono misurate con e senza il campione di prova secondo la norma ISO 354, ottenendo i tempi di riverbero  $T_1$  e  $T_2$ . Sono necessarie almeno due posizioni sorgente e 3 posizioni microfoniche per ogni tempo di riverbero, per ottenere almeno 6 decadimenti. Il tempo di riverbero è la media aritmetica dei tempi di riverbero individuati in ogni posizione.

La durata totale del segnale per ogni combinazione sorgente-ricevitore è data dal rapporto tra tempo di rotazione completo della macchina rotante e il tempo di un periodo del segnale. Il numero di periodi di un segnale periodico pseudo-casuale  $n$  deve essere nell'intervallo di  $60 \leq n \leq 120$ . Alternativamente è possibile effettuare  $n$  misurazioni con il campione di prova a step angolari di  $\Delta\phi = 360^\circ/n$ . Il numero di medie coerenti  $n$  deve essere nell'intervallo di  $60 \leq n \leq 120$ . Un valore di  $n = 72$  è preferibile, corrispondente a step angolari di  $\Delta\phi = 5^\circ$ .

Inoltre, per evitare errori di misura dovuti a movimenti d'aria o a condizioni di instabilità nella camera, le misure non devono iniziare fino a 15/N minuti dopo aver lasciato la camera e chiuso la porta.

Poiché la temperatura e l'umidità relativa possono avere effetti rilevanti sul risultato delle misurazioni, specialmente alle alte frequenze, è necessario misurarle prima e dopo le 4 misurazioni. Il valor medio di ogni situazione è usato per le correzioni finali riguardo l'incertezza del risultato. In ogni caso, l'umidità relativa deve essere compresa nell'intervallo da 30% a 90% e la temperatura deve essere almeno di 15°C durante l'intero periodo del test.

Il decadimento dei 4 tempi di riverbero è da valutare attraverso l'integrale inverso, settando il limite a -30 dB e valutando il tempo di riverbero  $T_{15}$  tra -5 dB e -20 dB, in quanto il decadimento delle risposte all'impulso integrate, ottenute dopo la media sincrona a fase bloccata, presentano la sovrapposizione di due decadimenti indipendenti (Figura 49) e, poiché interessa solo la prime parte di decadimento, corrispondente alle prime riflessioni, si utilizza l'intervallo suddetto.

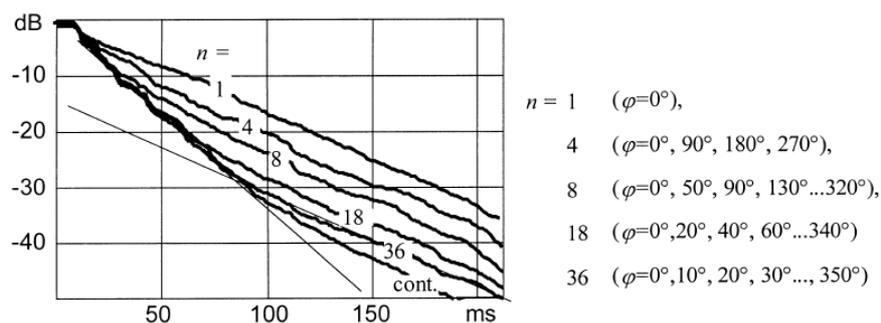


Figura 49-Risposte all'impulso integrate, ottenute con la media sincrona a fase bloccata di n risposte all'impulso.

Affinchè la misura del tempo di riverbero sia considerata attendibile, la sua deviazione standard relativa deve essere stimata secondo la seguente formula (ISO/TR 140-13, [40]) e rispettare la curva numero 3 (secondo la ISO 3382-2) [41]:

$$\varepsilon_{20}(T)/T = \sqrt{\frac{2,42 + 3,59/N}{fT}}$$

Dove:

- $\varepsilon_{20}(T)$  è la deviazione standard del tempo di riverbero  $T_{20}$
- $T$  è il tempo di riverbero misurato
- $f$  è la frequenza centrale delle bande di 1/3 d'ottava
- $N$  è il numero di curve di decadimento valutate

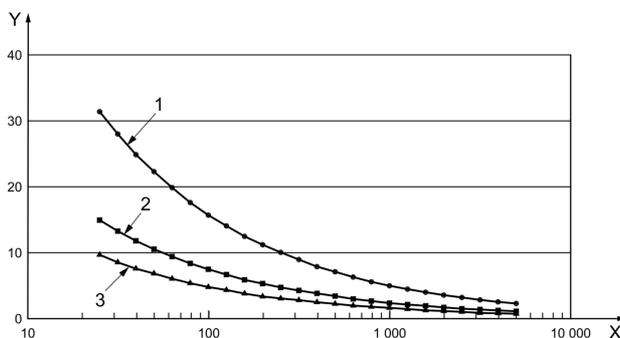


Figura 50 - Deviazione standard de tempo di riverbero [41].

### 3.1.6. Calcolo del coefficiente di scattering ad incidenza casuale della piastra di base $s_{base}$

Sotto condizioni ideali, i tempi di riverbero  $T_1$  e  $T_3$  devono essere uguali.

Tuttavia, una piastra di base non simmetrica può produrre un  $T_3$  più piccolo. Questo errore può accadere anche con un campione di prova presente. Il coefficiente di scattering per la piastra di base si calcola con la seguente formula:

$$s_{base} = 55,3 \frac{V}{S} \left( \frac{1}{c_3 T_3} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_3 - m_1)$$

Frequency ( $f/N$ ), Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630
Scattering coefficient, $s_{base}$	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,10

Frequency ( $f/N$ ), Hz	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150	4 000	5 000
Scattering coefficient, $s_{base}$	0,10	0,10	0,15	0,15	0,15	0,20	0,20	0,20	0,25

Figura 51-Valori massimi del coefficiente di scattering della piastra di base senza campione.

### 3.1.7. Precisione dei risultati

Per ogni tempo di riverbero ( $T_1, T_2, T_3$  e  $T_4$ ) l'incertezza standard ( $u_1, u_2, u_3$  e  $u_4$ ) è calcolata dalla formula seguente:

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2}{N(N-1)}}$$

Dove N è il numero di misurazioni del tempo di riverbero, e la media spaziale della camera riverberante è:

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i$$

La composizione delle incertezze dei coefficienti di assorbimenti sono:

$$u_{\alpha_s} = \frac{55.3V}{cS} \sqrt{\left(\frac{u_2}{T_2}\right)^2 + \left(\frac{u_1}{T_1}\right)^2}$$

$$u_{\alpha_{spec}} = \frac{55.3V}{cS} \sqrt{\left(\frac{u_4}{T_4}\right)^2 + \left(\frac{u_3}{T_3}\right)^2}$$

Infine per l'incertezza composta standard del coefficiente di scattering è:

$$u_s = \left| \frac{\alpha_{spec} - 1}{1 - \alpha_s} \right| \sqrt{\left(\frac{u_{\alpha_{spec}}}{\alpha_{spec} - 1}\right)^2 + \left(\frac{u_{\alpha_s}}{1 - \alpha_s}\right)^2}$$

Per estendere l'incertezza del coefficiente di scattering ad un livello di confidenza del 95%, si raddoppia l'incertezza composta standard  $u_s$ .

Di seguito si analizzano tutti gli aspetti irrisolti della procedura standard precedentemente analizzata.

### **3.2. Analisi fattori di incertezza della misura ISO 17497-1 [42]**

Dall'emanazione della norma ISO 17497-1 nel 2004, numerosi studi sono stati condotti per analizzare l'accuratezza della misura, suggerendo di prestare maggiore attenzione ai seguenti fattori:

#### **3.2.1. Camera riverberante**

##### **3.2.1.1. Misure in dimensioni reali o in scala ridotta**

Diversi studi hanno verificato la somiglianza tra le misure in camere a dimensioni reali e quelle in camere a scala ridotta [43], prediligendo quest'ultima. Infatti, l'uso frequente di modelli in scala permette ai produttori di materiali di testare materiali con dimensioni molto ridotte e ai tecnici di effettuare misurazioni in tempi molto più brevi.

Un'ulteriore verifica dell'accuratezza di questo metodo è data da uno studio condotto da Vorlander [44] che ha dimostrato che i risultati ottenuti in un modello in scala sono accurati sino alla frequenza di 12,5 KHz, ben al di sopra del range di frequenze previsto dalla norma.

Uno studio condotto da Muller-Trapet e Vorlander [45] sull'incertezza dovuta alle fluttuazioni spaziali del campo sonoro all'interno della camera riverberante ha dimostrato come il parametro che maggiormente incide è la variazione dei tempi di riverbero, piuttosto che la variazione della velocità di propagazione del suono e del coefficiente di assorbimento dell'aria. E' stata anche dimostrata la correlazione tra i tempi di riverbero e la sua importanza nel calcolo dell'incertezza, non considerata nella ISO 17497-1.

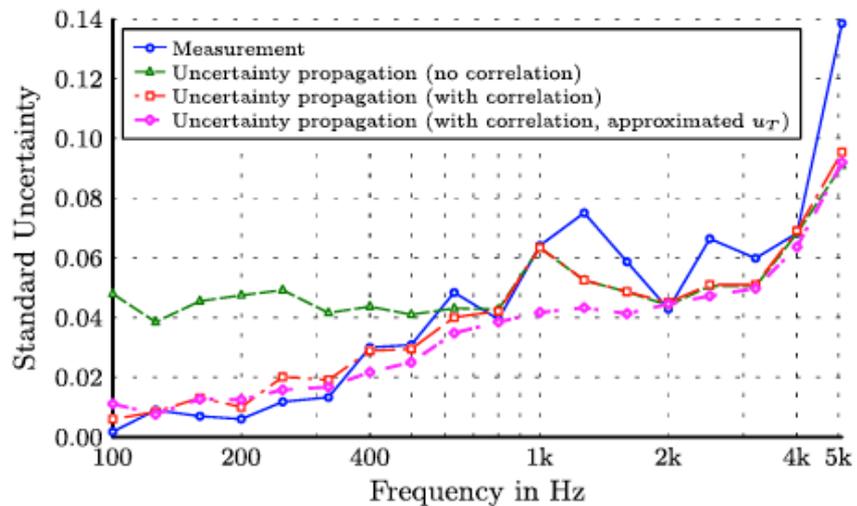


Figura 52 - incertezza standard del coefficiente di scattering con misure ( $M=10$ ) e calcolata considerando l'incertezza dei tempi di riverbero [45].

### 3.2.1.2. Diffusività del campo sonoro

E' un parametro che divide il mondo scientifico: alcuni considerano importante l'utilizzo di pannelli diffusivi per rendere uniforme il campo sonoro all'interno della camera riverberante [46], [47], [48], altri hanno dimostrato che il loro utilizzo rende i decadimenti di Schroeder meno lineari alle basse frequenze [49].

Un ulteriore studio [50] ha sottolineato come il limite imposto dalla norma inerente l'area di assorbimento equivalente della camera riverberante vuota  $A_1 \leq 0,30 \times V^{2/3}$ , restituisce valori sottostimati del coefficiente di scattering.

Suggerendo di aumentare l'area di assorbimento equivalente ( $\frac{A_1}{S} \geq 1$ ), Sakuma e Lee [50] hanno ipotizzato un intervallo entro la quale si possono ottenere risultati attendibili, proponendo un limite minimo di  $A_1$  e utilizzando come limite massimo quello previsto dalla norma ISO 354.

Frequenza [Hz]		100- 500	630- 800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Max. [m <sup>2</sup> ]	A <sub>1</sub>	6.5	6.5	7.0	7.5	8.0	9.5	10.5	12.0	13.0	14.0
Min. [m <sup>2</sup> ]	A <sub>1</sub>	3.0	4.0	5.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0

Tabella 3 - Valori minimi dell'area di assorbimento equivalente proposti A<sub>1</sub>

### 3.2.1.3. Il coefficiente di scattering del piatto rotante

Teoricamente dovrebbe essere  $T_1 = T_3$ , tuttavia la costruzione del piatto rotante in più pezzi assemblati per le misure in camera riverberante full-scale, porta ad una stima errata del coefficiente di scattering del piatto rotante e, di conseguenza, a tempi di riverbero  $T_3$  differenti da quelli in camera vuota.

Per tale motivo, la norma prevede un limite massimo in frequenza per il coefficiente di scattering del piatto rotante.

Uno studio effettuato da De Geetere e Vermeir [49], ha dimostrato che introducendo il contributo del piatto rotante nel calcolo del coefficiente di scattering, si possono ottenere risultati molto più accurati:

$$S_{\text{corretto}} = \frac{\alpha_{\text{spec}} - \alpha_s + S_b}{1 - \alpha_s - \alpha_{s,b}}$$

dove  $\alpha_{s,b}$  è il coefficiente di assorbimento casuale del piatto rotante e  $S_b$  il suo coefficiente di scattering.

Inoltre, per valutare l'incertezza aggiunta da questi due nuovi parametri, è stata riscritta la formula inerente l'incertezza complessiva del coefficiente di scattering corretto:

$$\delta_{S_{\text{corretto}}} = \frac{1}{C_1} \sqrt{C_1^2 \cdot \delta_{\alpha_{\text{spec}}}^2 + C_2^2 \cdot \delta_{\alpha_s}^2 + (C_1 + C_2)^2 \cdot \delta_{\alpha_{s,b}}^2 + C_1^2 \cdot \delta_{\alpha_b}^2}$$

dove:

$$C_1 = 1 - \alpha_s - \alpha_{s,b}$$

$$C_2 = \alpha_{spec} + \alpha_{s,b} + s_b - 1$$

Si può notare come i contributi maggiori siano  $\alpha_{spec}$  e  $\alpha_s$ , piuttosto che  $\alpha_{s,b}$  e  $s_b$ .

### **3.2.2. Caratteristiche del campione**

#### ***3.2.2.1. Area e diametro del campione***

La norma stabilisce il diametro minimo del piatto rotante e, di conseguenza, il diametro massimo del campione. Tuttavia, un'indicazione precisa dell'intervallo ottimale non è stato definito.

In risposta di ciò, sulla base di Mommertz [51] e la ISO 354, Gomes [52] ha proposto un intervallo ottimale per l'area del campione S:  $0.25V^{2/3} \leq S \leq 0.30V^{2/3}$ , dove V è il volume della camera.

Tuttavia, n scala ridotta, l'area del provino dovrebbe essere comunque rappresentativa di una superficie infinitamente grande indipendentemente dall'intervallo ottimale.

#### ***3.2.2.2. Effetto dei bordi***

La diffrazione causata dai bordi del provino porterebbe a coefficienti di scattering superiori ad 1 e, nonostante la norma suggerisca di non coprire il perimetro del campione con materiale rigido, suggerendo, in contrapposizione, anche di coprire la cavità d'aria presente tra il piatto rotante e il pavimento, diversi studi [42], [44], [50], [46], [53] hanno dimostrato che utilizzando del materiale per coprire la cavità d'aria e, di

conseguenza a coprire con del materiale rigido il perimetro del campione, porta a risultati più affidabili. Infatti, la copertura permette di mascherare anche le componenti strutturali non simmetriche sotto il piatto rotante, che vibrano a determinate frequenze di risonanze.



Figura 53 – Copertura perimetro piatto rotante con materiale acrilico in camera riverberante in scala [46].

### 3.2.2.3. Assorbimento del campione

Il limite imposto dalla norma riguardante il coefficiente di assorbimento del campione di  $\alpha_s \leq 0.5$  si basa sull'equazione di Sabine, che, tuttavia, è valida solo per coefficienti di assorbimento  $\alpha_s$  molto più bassi.

Utilizzando la formula di Eyring si ottengono valori più accurati rispetto a quella di Sabine, per materiali con coefficienti di assorbimento  $\alpha_s \geq 0.3$  [54]. Infatti come si può osservare nella Figura 54, l'equazione utilizzata dalla norma restituisce valori di scattering superiori ad 1, mentre quella di Eyring si attesta sotto il limite dell'unità.

Un ulteriore studio [45] ha dimostrato l'importanza di questo fattore nel calcolo dell'incertezza del coefficiente di scattering, affermando che, considerando un materiale con coefficiente di assorbimento  $\alpha_s = 0.50$ , e un numero di misure superiore a quello previsto dalla norma, 12 piuttosto che 6, la frequenza limite alla quale ottenere un'incertezza massima di 0.1

è di 800 Hz, ben al di sopra di quella minima prevista dalla norma (100 Hz).

Questo porterebbe a ridefinire il limite della norma, in quanto materiali più rigidi portano a risultati più affidabili.

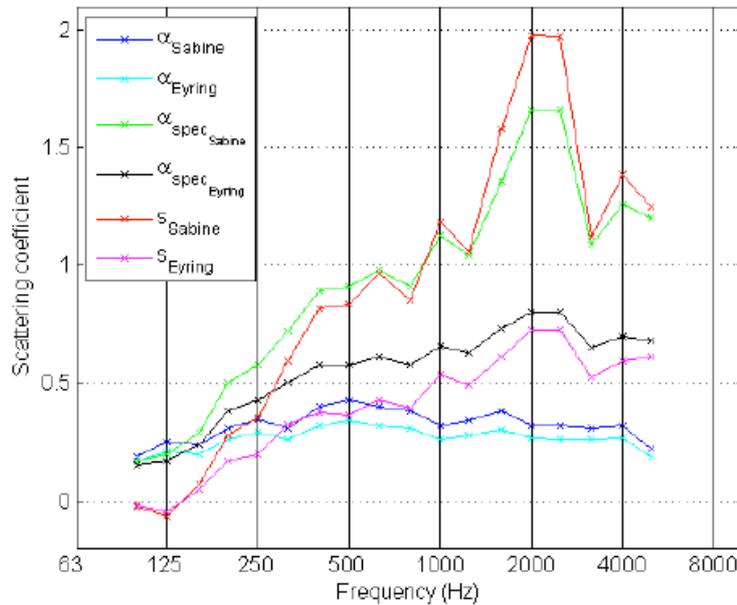


Figura 54 - Confronto parametri misurati con l'equazione di Sabine e con quella di Eyring [54].

### 3.2.2.4. Forma del campione e metodo di montaggio

Per i già discussi effetti di diffrazione dei bordi, la norma suggerisce di testare forme circolari piuttosto che squadrate. Estendendo il lavoro di Vorlander et al. [44], Shtrepi et al. [42] hanno analizzato come le forme circolari restituiscano valori di scattering superiori, in quanto la forma squadrata causa una configurazione asimmetrica che porta ad un numero più alto di riflessioni nell'ultima parte della risposta all'impulso, che, non essendo cancellate completamente dalla media sincrona a fase bloccata, aumentano il tempo di riverbero  $T_4$ . Tuttavia, per i produttori di materiali è più semplice costruire forme squadrate, per questo introdurre un recesso quadrato sul piatto rotante, permette la misura del coefficiente di scattering senza essere affetto da fenomeni di diffrazione dei bordi [44]. Per quanto riguarda i periodi rappresentativi di un materiale, Vorlander et al. [44] e

Gomes [55], hanno dimostrato che per campioni circolari risultano necessari 11 periodi, mentre per quelli quadrati 6 periodi sono insufficienti.

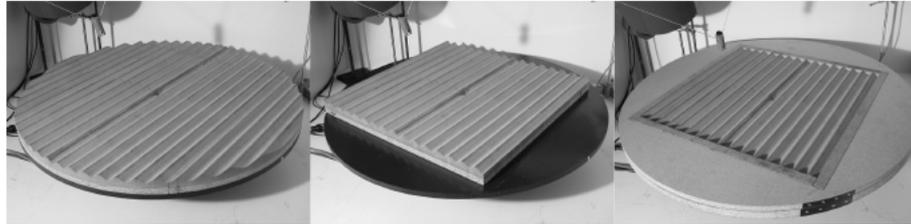


Figura 55 - Campione sinusoidale: a sinistra circolare, al centro quadrato e a destra montato in un recesso quadrato [44].

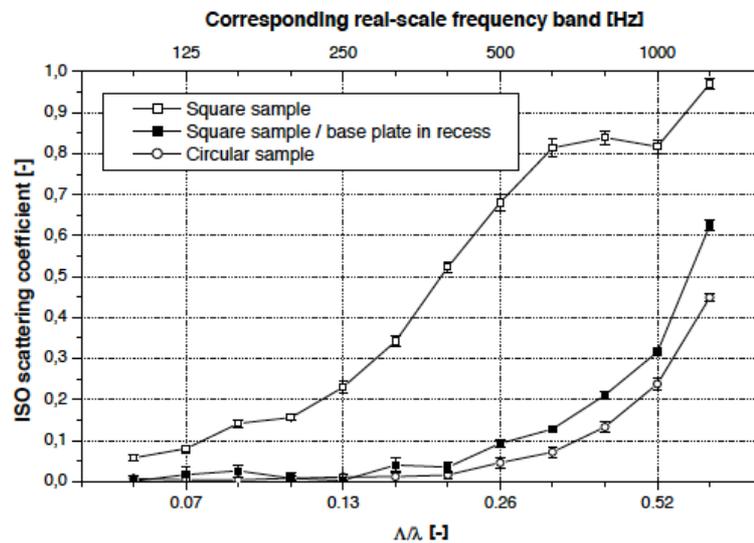


Figura 56 - Confronto coefficienti di scattering dei tre campioni in Figura 4 [44].

### 3.2.2.5. Cavità d'aria sottostante il piatto rotante

Come già accennato riguardo la copertura dei bordi del campione, risulta necessario coprire la cavità sottostante il piatto rotante per isolare sia il rumore provocato dalla rotazione del motore sia per evitare la diffrazione causata dalle sue componenti meccaniche. Un'altezza non troppo elevata è preferibile dal momento che ha portato a risultati più attendibili [44], [46]. La miglior soluzione sarebbe installare il motore sotto il pavimento.

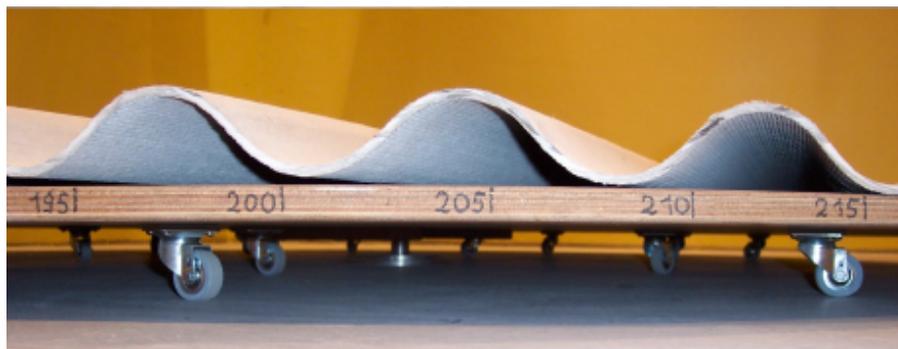


Figura 57 - Installazione del motore rotante al di sotto del pavimento [44].

### 3.2.3. Rotazione

#### 3.2.3.1. Rotazione piatto rotante

La norma propone 3 metodi di rotazione: manuale con rotazione step-by-step, automatizzato con rotazione step-by-step e automatizzato con rotazione continua. Il migliore risulta essere quello a rotazione continua, in quanto non vi è la presenza di un operatore a disturbare il campo sonoro e non necessita di lunghi periodi di misura, che porterebbero inevitabilmente a condizioni ambientali differenti durante la misura.

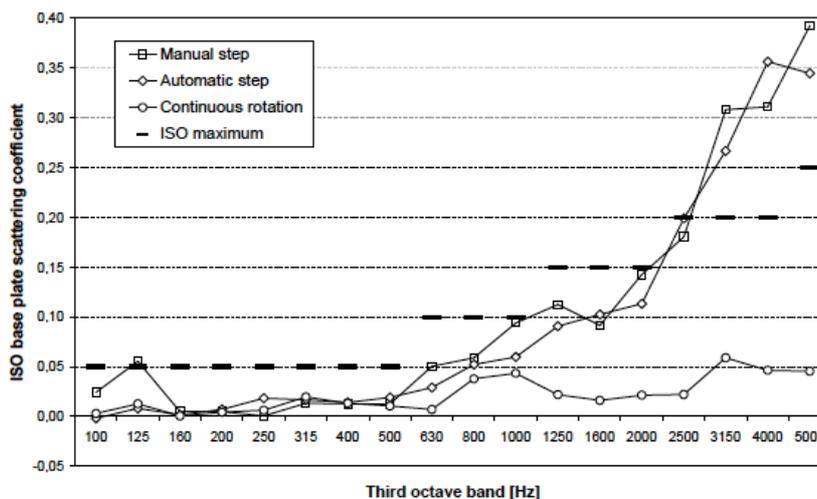


Figura 58 - Confronto tra i diversi metodi di rotazione del piatto rotante proposti dalla norma valutando il coefficiente di scattering del piatto rotante senza campione [49].

### 3.2.3.2. Stabilità nel tempo

Le condizioni ambientali durante la misura dei 4 tempi di riverbero dovrebbero restare pressoché invariate, motivo per cui la norma stabilisce che un periodo di 15/N minuti, con N fattore di scala, deve intercorrere dall'apertura e chiusura della camera riverberante. In questo modo l'ambiente interno della camera riverberante risulterà stabile. Tuttavia, è stato dimostrato che questa pausa non influisce sui risultati [49], quanto piuttosto l'intera durata della misura. Infatti è preferibile utilizzare segnali di breve durata e velocità di rotazioni ottimali [44], [50].

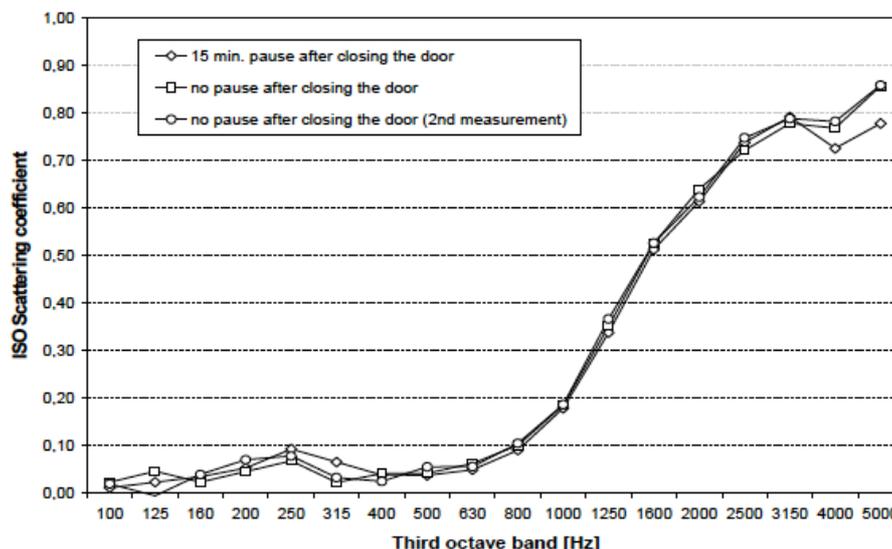


Figura 59 - Confronto delle misure del coefficiente di scattering rispetto alla pausa prevista di 15 minuti dopo la chiusura della camera [49].

### 3.2.3.3. Numero di posizioni angolari

L'intervallo ottimale proposto dalla norma è  $60 \leq N \leq 120$ , preferendo un passo angolare di  $5^\circ$ , corrispondente a  $N = 72$  ripetizioni. Numeri inferiori porterebbero ad una sottostima del coefficiente di scattering, mentre numeri superiori aumenterebbero considerevolmente il tempo di

misura con conseguente cambio delle condizioni ambientali, come precedentemente analizzato.

Diversi studi [44], [50], [49] hanno dimostrato che un ragionamento simile può essere applicato anche al numero di segnali da utilizzare in una rotazione completa con sweep sinusoidali, confermando come  $N$  ripetizioni comprese nell'intervallo suggerito dalla norma, risulta adeguato.

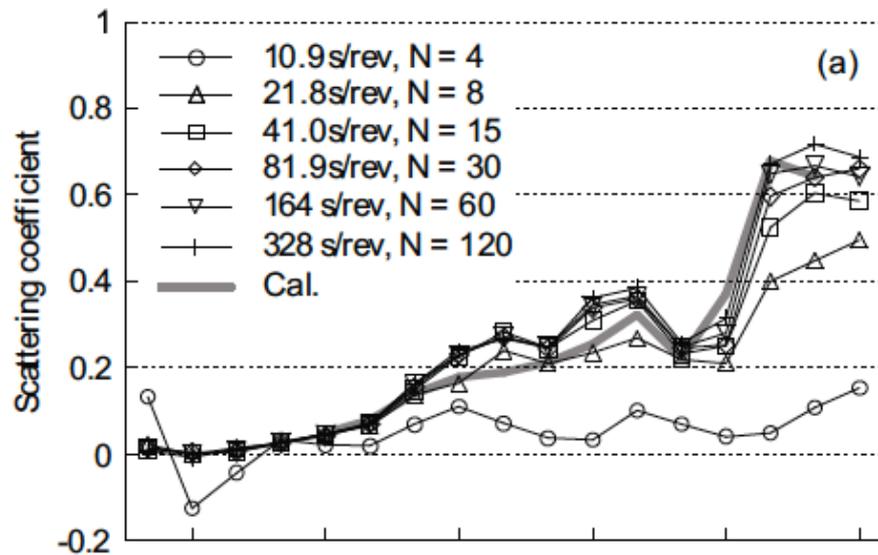


Figura 60 - Confronto delle ripetizioni di sweep sinusoidali di durata  $T=2.73s$ . In ascissa i valori in bande di 1/1 d'ottava in frequenza [50].

### 3.2.4. Tipologia di segnale

La scelta del segnale ricade tra tre tipologie: MLS (Max Length Sequence), Sweep lineare e Sweep sinusoidale (SS). Vorlander [44] ha comparato il loro rapporto segnale – rumore, dimostrando che il miglior segnale è lo sweep sinusoidale. Tuttavia, la scelta d'uso dipende anche da altri fattori come la rotazione del sistema adottato durante la misura (e relativo rumore generato) e velocità di rotazione.

Sakuma e Lee [50] hanno dimostrato che il valore del coefficiente di scattering alle alte frequenze diminuisce all'aumentare della velocità di rotazione e che nella rotazione continua è preferibile utilizzare il segnale SS.

Un confronto tra i due segnali, condotto da T. Kamisinski et al. [56], ha confermato la dipendenza del segnale SS con la velocità di rotazione del piatto rotante, al contrario del segnale MLS.

Infatti per confrontare i risultati con quelli ottenuti con il segnale MLS, è necessario porre la velocità di rotazione del piatto rotante a 0 rpm quando si utilizza lo sweep sinusoidale.

Tuttavia, lo sweep sinusoidale è preferito al segnale MLS nella rotazione continua, poiché con quest'ultima il tempo di rivoluzione del piatto rotante dipende dalla scala del campione, dal suo coefficiente di scattering e dal volume della camera, mentre con lo sweep sinusoidale l'accuratezza dovuta al numero di segnali/passi angolari risulta essere la medesima sia nel metodo di rotazione step-by-step sia in quello a rotazione continua ( $N=30$ ) e indipendente dal volume della camera [44].

Essendo anche indipendente alle variazioni climatiche, lo sweep sinusoidale è il segnale suggerito dalla norma ISO [57].

### **3.2.5. Assorbimento dell'aria**

Data l'eccessiva durata della misura secondo la ISO, risulta molto complicato mantenere stabile le condizioni ambientali, soprattutto l'umidità relativa e la temperatura. Tutto questo porta ad un assorbimento sonoro da parte dell'aria che diminuisce i tempi di riverbero, restituendo errori molto alti riguardo il coefficiente di scattering, soprattutto nelle alte frequenze di  $T_2$  e  $T_4$ .

Tutto questo in un modello in scala si può risolvere sostituendo l'aria con del nitrogeno e applicando un metodo numerico, anche se quest'ultimo potrebbe restituire coefficienti di scattering molto bassi.

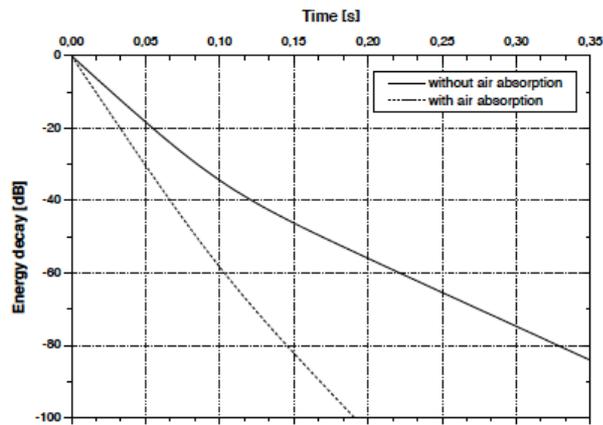
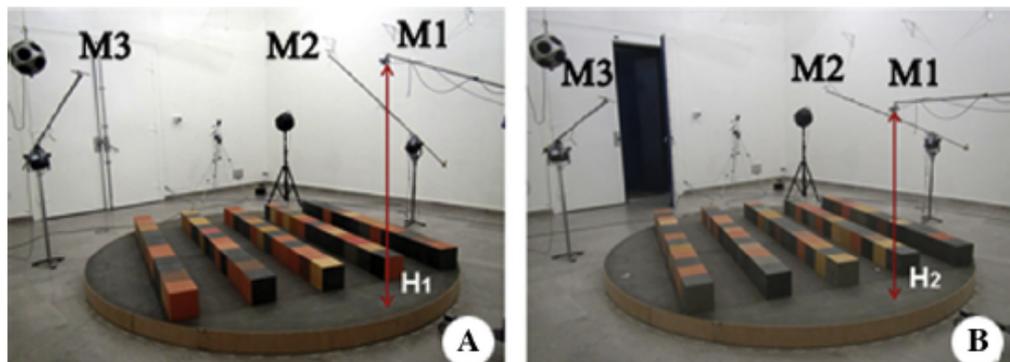


Figura 61 - Decadimento del tempo di riverbero  $T_4$  considerando il contributo dell'assorbimento dell'aria e non considerandolo [44].

### 3.2.6. Altezza microfoni

Questo aspetto è stato analizzato da uno studio di Shtrepi et al [42], dimostrando come sia un aspetto molto importante per l'accuratezza dei risultati. Infatti, rispettando le distanze imposte dalla norma ISO, diminuendo l'altezza dei microfoni dal campione, risultano coefficienti di scattering nettamente inferiori nelle medio-alte frequenze. La generazione di un campo sonoro diffuso non uniforme vicino al campione, quando non sono rispettate le condizioni di campo sonoro stazionario, influenza significativamente la media sincrona a fase bloccata, soprattutto alle alte frequenze. Di conseguenza, una soglia di distanza dovrebbe essere considerata dalla norma.





## 4. MISURE SPERIMENTALI

Secondo le considerazioni analizzate nel precedente capitolo, sono state realizzate delle misure presso la camera riverberante dell'azienda denominata Zetalab srl.

Lo scopo delle misure è di verificare alcuni aspetti considerati negli studi fatti in questi anni riguardo la procedura di misura della norma ISO 17497-1, utilizzando strumentazione software e hardware commerciale, in modo da sottolineare la possibilità di eseguire la misura del coefficiente di scattering in camera riverberante anche con strumentazione non concepita in tal senso.

### 4.1. Camera riverberante

La camera utilizzata ha un volume di  $161\text{ m}^3$ , inferiore al limite imposto dalla norma ISO 17497-1 ( $V \geq 200\text{ m}^3$ ), di cui si riporta la pianta vista dall'alto.

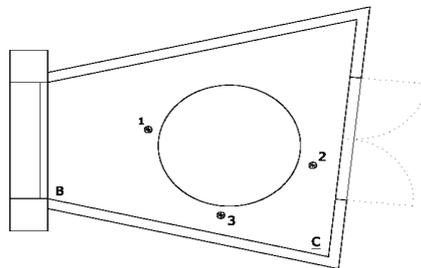


Figura 63 - Camera riverberante e posizioni di misura

## 4.2.Strumentazione elettroacustica

La strumentazione elettroacustica utilizzata è stata la seguente:

- Flessometro Stanley Powerlock 33-442



- Termoigrometro Deltaohm HD35ED



- 3 microfoni GRAS 146 AE



- Sorgente omnidirezionale B&K 4292



- Sinus Soundbook Expander



- Calibratore B&K 4231



Tutta la strumentazione utilizzata è stata opportunamente calibrata e tarata come previsto dalla rispettive norme ISO per strumentazione di classe 1.

### 4.3.Base rotante

Il supporto per il piatto rotante è stato costruito con il seguente materiale:

- Piatto circolare di 3 metri di dimensione (dimensione minima prevista dalla norma ISO 17497-1), in pannello truciolare nobilitato bianco spessore 18 mm, peso 92 kg, diviso in due pezzi, a metà, smontabile.



- Struttura in legno supportata da ruote per distribuire il peso del campione



- Cintura in alluminio



#### 4.4.Campione

Il campione scelto è costituito da lastre in fibrocemento sinusoidale spessore 6.5 mm e passo d'onda 177 mm, in modo da confrontare i risultati ottenuti con gli studi effettuati in questi anni, come mostrato nella seguente Figura 64 e Figura 65.

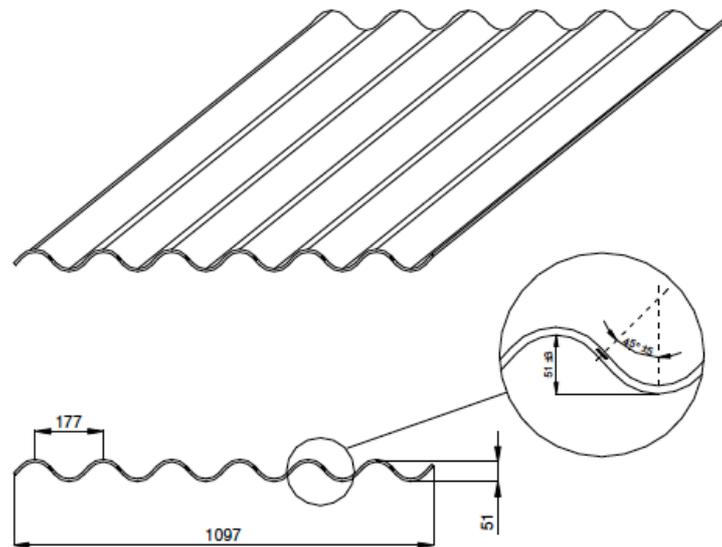


Figura 64 - Schema descrittivo campione utilizzato.



*Figura 65 - Foto campione sinusoidale*

## **4.5. Metodologia di misura**

La metodologia di misura scelta è stata quella a step manuali, dal momento che la progettazione del motore rotante non è stata completata in data utile.

Di seguito una breve descrizione della procedura utilizzata.

### **4.5.1. Condizioni ambientali**

La temperatura e l'umidità relativa nell'ambiente vengono misurati con il Termoigrometro DeltaOhm HD 2301 e la Sonda DeltaOhm 472AC R. Il tempo dopo cui il sensore è in equilibrio è di 5'.

Il microclima DeltaOhm HD32.1, invece, misura la pressione statica.

### **4.5.2. Installazione delle apparecchiature di misura**

Posizionare la sorgente omnidirezionale all'interno della camera riverberante nelle posizioni B e C, indicati nella Figura 63.

Posizionare i microfoni nei 3 punti indicati nella Figura 63 ad un'altezza dal pavimento almeno pari a 1,5 m.

### 4.5.3. Misurazione tempi di riverbero

- Procedura per la misurazione di T1- T2:

Selezionare il sine sweep come tipologia di segnale da generare internamente con una durata di 15 secondi (corrispondenti alla scelta ottimale della durata del sine sweep secondo la condizione  $T_{segnale} + Pausa\ silenzio \geq 2T_{riverbero\ camera\ riverberante}$ ).

Posizionare la sorgente nella camera riverberante.

Le posizioni della sorgente sono 2: B, C. In entrambe le posizioni la sorgente va posizionata sul treppiede ad una altezza almeno di 1,5 m dal suolo.

Registrare 6 misurazioni commutando 2 posizioni della sorgente, 3 posizioni microfoniche. La registrazione avviene azionando contemporaneamente tutti e 3 i microfoni. Ripetere la procedura un'ulteriore volta spostando la sorgente nell'altra posizione.

- Procedura per la misurazione di T3 - T4:

Selezionare la stessa tipologia di segnale e relativa durata vista precedentemente per la misurazione di T1-T2. Selezionare 72 ripetizioni e ad ogni pausa tra uno sweep sinusoidale e il successivo si è provveduto a ruotare di 5° il campione.

Terminate le 72 ripetizioni del segnale da parte della sorgente, spostare la sorgente nell'altra posizione e ripetere l'intera procedura. La media utilizzata per ottenere il tempo di riverbero T3 e T4 è la media sincrona a fase bloccata.

#### 4.5.1. Media sincrona [58]

La media sincrona a fase bloccata è implementata all'interno del software proprietario di elaborazione dati Samurai: nonostante questo programma non sia stato pensato per la misura del coefficiente di scattering, la media sincrona è stata implementata perché riduce il rumore di fondo di 3 dB per ogni raddoppio del numero di sweepate.

Questo tipo di media può essere ottenuta:

- **nel dominio del tempo, Frequency Synchronous Averaging (FSA):** la media sincrona viene realizzata nel dominio del tempo mediante sincronismo ottenuto tramite un segnale tachimetrico esterno e solo successivamente viene generata l'analisi FFT in frequenza;
- **nel dominio della frequenza, Virtual Frequency Synchronous Averaging (VFSA):** la media sincrona viene invece ottenuta direttamente nel dominio della frequenza definendo manualmente la componente in frequenza corrispondente al regime di rotazione.

Per il presente esperimento si utilizzerà la media FSA, pertanto se ne accenna brevemente il funzionamento.

La media sincrona FSA è un processo di sincronizzazione dell'acquisizione dei dati con la velocità di rotazione del dispositivo rotante e nella successiva operazione di media nel tempo sull'insieme di dati prelevati.

L'operazione di media sincrona tende, all'aumentare del numero di medie, ad annullare il contributo delle componenti non in sincronismo con quella di analisi e di ridurre drasticamente l'influenza del rumore di fondo presente nell'ambiente di misura: precisamente permette di ridurre il rumore di fondo di 3 dB per ogni raddoppio del numero di sweep, come mostrato nella seguente Figura 66.

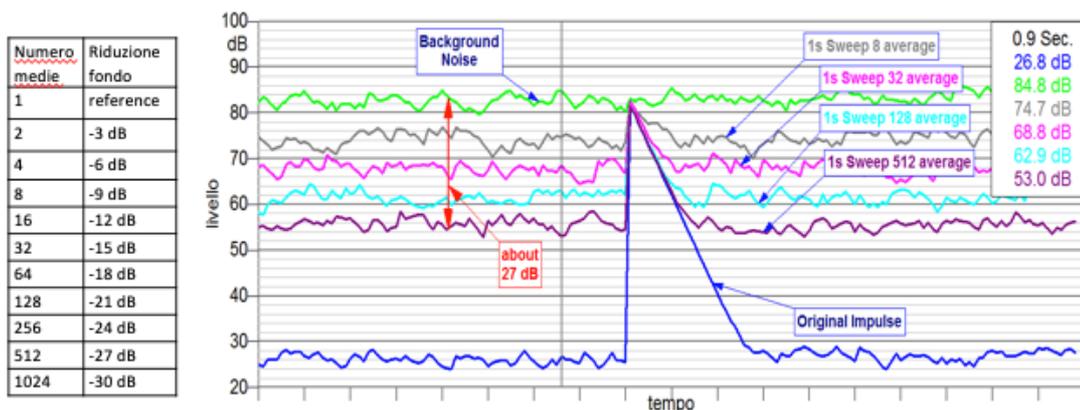


Figura 66 - Grafico temporale all'aumentare del numero di medie dello sweep sinusoidale [58].

## 5. METODI ALTERNATIVI DI MISURA DIRETTA

Nonostante la standardizzazione sia stata attribuita esclusivamente al metodo previsto dalla norma ISO 17497-1, le sue problematiche e inaccurately hanno spinto la comunità scientifica ad interrogarsi su metodologie di misurazione alternative.

Alcune di esse sono nate per risolvere alcuni aspetti della suddetta norma, altre, invece, forniscono risultati e parametri differenti riguardo il coefficiente di scattering previsto dalla ISO 17497-1.

Si tratta di metodi non ancora validati scientificamente da un numero sufficiente di studi e test, ma gettano le basi per futuri approfondimenti.

La scelta dei metodi alternativi proposti in questo capitolo è dettata dall'esigenza di confrontare esclusivamente i metodi di misura diretti, come previsto dalla norma ISO 17497-1; di conseguenza, i metodi alternativi riguardanti la simulazione numerica non sono stati considerati.

### 5.1. Antenna acustica con pesatura multipolare [59]

Questo tipo di antenna è utilizzato per ricevere solo l'energia sonora riflessa dalla superficie eliminando le riflessioni dovute all'ambiente circostante e il rumore di eventuali sorgenti sonore.

La direttività è proporzionale al  $\cos(\theta)$ , con  $\theta$  = angolo di incidenza del suono, e per aumentarne la direttività è necessario incrementare l'ordine  $i$  delle derivate spaziali, portando ad una proporzionalità della direttività a  $\cos^{i-1}(\theta)$ . Nonostante la direttività aumenti all'aumentare delle derivate spaziali, è necessario usare questo metodo con cautela, dal momento che porterebbe anche ad un aumento considerevole del rumore di fase tra le pressioni sonore misurate dai vari microfoni che costituiscono l'antenna.

L'attenuazione di eventuali lobi posteriori è resa possibile dall'uso delle proprietà della funzione coseno: le derivate di  $N$ th e  $N - 1$ th sono rispettivamente funzioni dispari e pari che sommate portano a sopprimere la pressione sonora nel range da  $-\pi a - \frac{\pi}{2}$  e da  $+\frac{\pi}{2} a + \pi$ . Poiché tuttavia è ancora presente un minimo residuo di energia sonora nel

lobo posteriore, questa tecnica è stata implementata aggiungendo una media aritmetica delle due derivate di ordine  $N - 1$  con l'ultima derivata di ordine  $i$ .

Un'ulteriore attenuazione dei lobi secondari è ottenuta aggiungendo una funzione dispari creata dalle due  $N - 1$ th derivate e la  $N$ th derivata. In questo modo con un'antenna composta da 5 microfoni distanziati di 2.5 cm, si ottiene un'attenuazione di 30 dB dei lobi secondari con un'angolo di apertura direttiva di circa  $50^\circ$ .

Il sistema di ricezione costruito per validare lo studio di Ducourneau et al. [59], è composto da 13 sensori, disposti in 4 sub-array (4 antenne), distanziati di 2.5 cm, 5 cm, 10 cm e 15 cm, per un totale di 60 cm di lunghezza. Il dispositivo si è rivelato idoneo nel range di frequenze 150-5000 Hz.

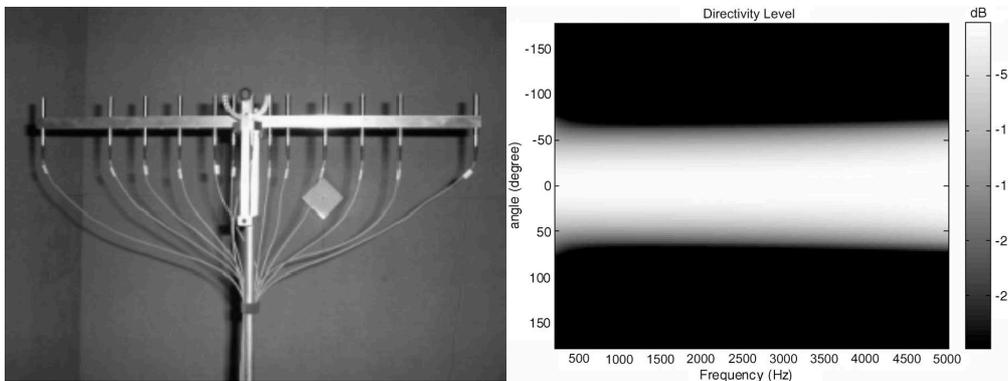


Figura 67 – A destra: sistema di ricezione usando 13 microfoni (4 antenne). A sinistra: diagramma della direttività teorica rispetto all'angolo  $\theta$  e la frequenza del sistema di ricezione [59].

Questo tipo di antenna è stato utilizzato anche per misurare il coefficiente di scattering in ambienti di lavoro di superfici non uniformi orizzontali e verticali.

### 5.1.1. Superfici orizzontali [60]

Il sistema utilizzato per la misura del coefficiente di scattering per superfici orizzontali è costituito da una gabbia emisferica sulla quale è posizionata una sorgente impulsiva e la suddetta antenna acustica. È stato dimostrato che l'uso di questa antenna con pesatura

multipolare, attenua sensibilmente il rumore di fondo presente in un ambiente di lavoro, migliorando il rapporto segnale rumore (SNR).

Come mostrato nella seguente Figura 68 la sorgente e l'antenna possono variare il loro angolo di incidenza  $\theta_s$  e ruotare intorno al campione variando l'angolo  $\varphi$ . Nonostante si basi sulle condizioni di misura in campo lontano, la dimensione del campione e della struttura difficilmente rispettano questa condizione, ritrovandosi spesso in un campo vicino.

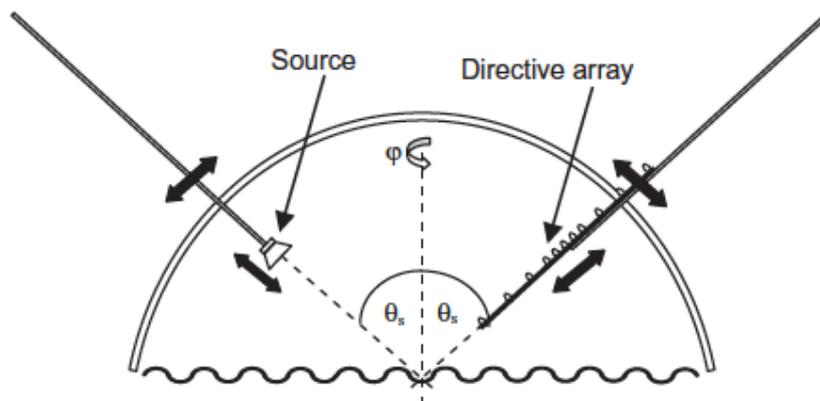


Figura 68 - Schema del dispositivo [60].

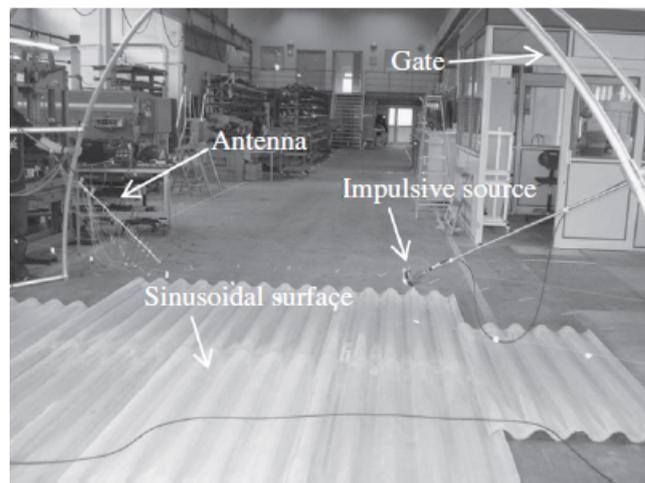


Figura 69 - Immagine della struttura [60].

### 5.1.2. Superfici verticali e mappatura scattering [61]

Il dispositivo di ricezione utilizza un'antenna acustica molto simile a quella progettata per le superfici orizzontali, con l'aggiunta di un quinto sub-array costituito da due microfoni distanziati di 30 cm per migliorare la risposta alle basse frequenze, portando la lunghezza totale a 120 cm. Il limite inferiore del range di frequenze è sceso sino agli 80 Hz.

Questo nuovo dispositivo è costituito da un arco verticale sulla quale sono installati due aste rigide che si muovono simultaneamente in funzione dell'angolo speculare di incidenza  $\theta_s$  in un intervallo che va da  $10^\circ$  a  $80^\circ$ . Un motore circolare permette di ruotare l'intero arco intorno al punto di misura  $\varphi$ .

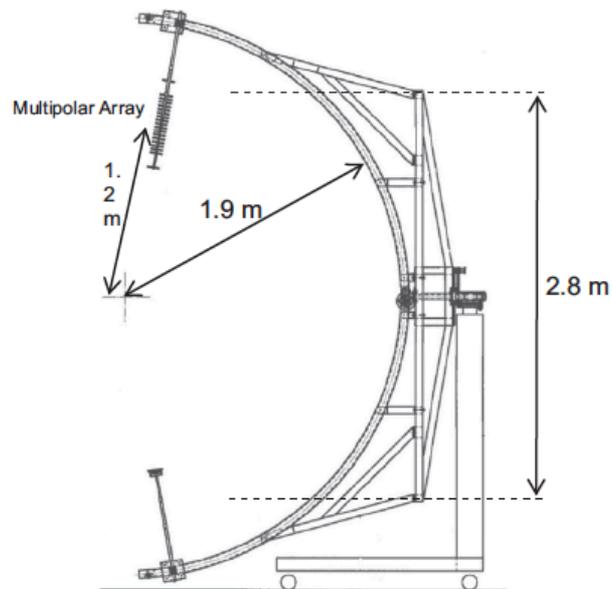


Figura 70 - Schema dispositivo di misura [61].

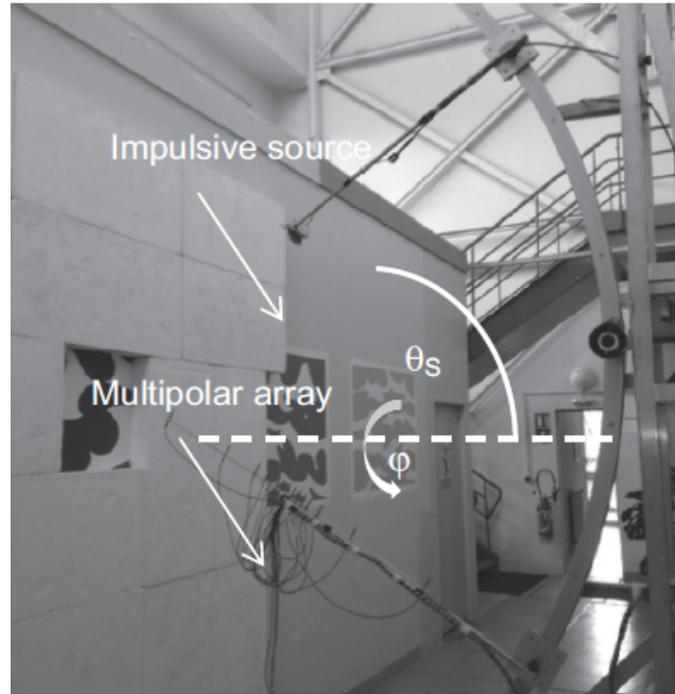


Figura 71 - Foto del dispositivo di misura [61].

Poiché il dispositivo permette di modificare facilmente la posizione del punto di misura, è possibile anche mappare l'andamento del coefficiente di scattering.

Lo studio condotto da Ducourneau et al. [61] ha mappato il coefficiente di scattering all'interno di una cavità rettangolare di una superficie verticale, dimostrando come i valori siano più alti nei bordi, grazie al fenomeno di diffrazione, piuttosto che al centro della cavità. Con l'aumentare della frequenza dell'onda incidente della sorgente impulsiva, si è notato un incremento dello scattering nelle zone in cui la lunghezza d'onda incidente corrispondeva alle dimensioni della cavità.

## 5.2. Metodo di misura del coefficiente di scattering di pareti e diffusori usando un campo sonoro non diffuso con un assorbimento sonoro distribuito in modo non uniforme [62]

Questo metodo di misura risolve due limiti della procedura prevista dalla norma ISO 17497-1: permette di misurare la diffusività di pareti senza utilizzare un loro campione circolare e permette di misurare diffusori 3D sospesi in camera riverberante. Le migliori ottenute con questo metodo sono dovute all'inutilizzo di un piatto rotante.

L'idea alla base è la presenza di decadimenti non lineari in un campo sonoro non diffuso con un assorbimento sonoro distribuito in maniera non uniforme. Se i diffusori sono installati all'interno di un campo sonoro, il tempo di riverbero cambia. Conseguentemente misurare la differenza tra i tempi di riverbero con e senza i diffusori permette di misurare il coefficiente di scattering dei diffusori stessi.

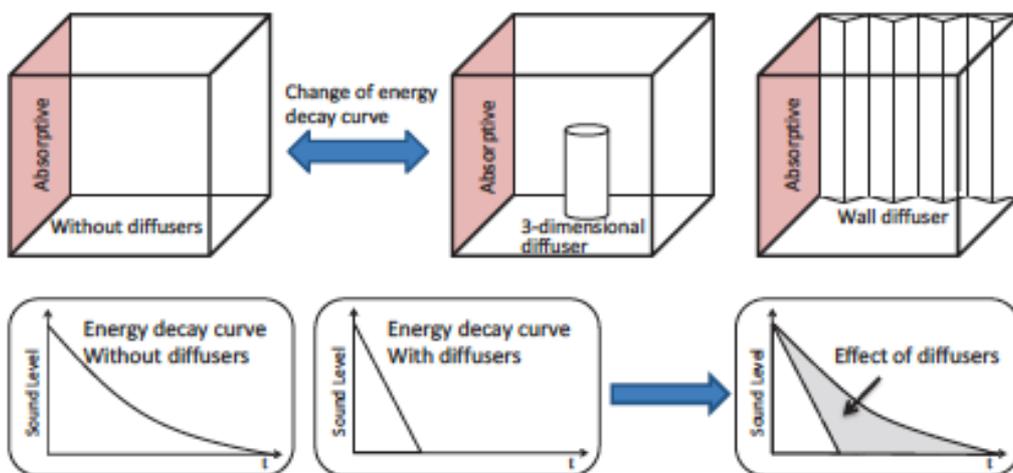


Figura 72 - Idea di base per la misura di scattering dei diffusori [62].

Per stimare l'effetto dei diffusori si utilizza l'energia delle curve di decadimento della stanza con i diffusori,  $E_d(t)$ , e l'energia delle curve di decadimento della stanza senza i diffusori,  $E_0(t)$ . Questi due parametri vengono utilizzati per ottenere la curva di decadimento normalizzata data dal loro rapporto:  $E_n(t) = \frac{E_d(t)}{E_0(t)}$ , che descrive l'effetto dei

diffusori sul campo sonoro. Il tempo di riverbero viene calcolato da questo parametro normalizzato:  $T = 10 \log_{10}[E_n(t)]$ . Vengono successivamente calcolati l'area di assorbimento equivalente apparente,  $A' = 0.163V/T$ , e il coefficiente di assorbimento medio,  $\alpha' = 0.163V/ST$ , dove  $V$ =volume della stanza e  $S$  è l'area di superficie totale. Questi due ultimi parametri vengono utilizzati per stimare il coefficiente di scattering, dal momento che vi è una relazione tra il coefficiente di scattering, il coefficiente di assorbimento medio  $\alpha'$  e l'area di assorbimento equivalente apparente,  $A'$ .

Uno studio effettuato da Hanyu et al. [62] ha dimostrato che il coefficiente di scattering di una parete aumenta linearmente con l'aumentare dei diffusori installati su di esso e che raddoppiando le dimensioni dei diffusori, questi hanno un coefficiente di scattering esteso sino ad un'ottava inferiore rispetto alle normali dimensioni. Questo studio ha anche dimostrato che per i diffusori 3D l'area di assorbimento equivalente  $A'$  aumenta all'aumentare della quantità di diffusori installati nel campo sonoro e che il comportamento diffusivo in frequenza dipende dalle dimensioni dei diffusori utilizzati.

### **5.2.1. Misura del coefficiente di scattering ad incidenza normale**

[63]

Si tratta di un metodo di misura in laboratorio basato sullo stesso principio del paragrafo precedente inerente il calcolo del coefficiente di scattering attraverso una differenza dei tempi di riverbero con e senza il diffusore. La differenza apportata da questo metodo è l'interesse della sola direzione normale dell'onda incidente, piuttosto che quella casuale, molto utile per risolvere gli echi fluttuanti presenti in una stanza.

In accordo con la teoria di riverberazione di stanze rettangolari con riflessioni speculari e diffuse [64], secondo cui una delle componenti speculari unidimensionali risiede nell'ultimo decadimento, se il decadimento è più lento delle componenti diffuse tridimensionali.

Questa condizione si verifica nella camera proposta per questo metodo in laboratorio dal momento che le pareti laterali sono rivestite interamente da materiale altamente fonoassorbente, permettendo alle componenti tridimensionali di decadere rapidamente, mentre alla componente unidimensionale tra il soffitto e il pavimento di decadere più lentamente. Di conseguenza, secondo la teoria riverberante di un campo unidimensionale

[64], i tempi di riverbero senza e con il diffusore si calcolano rispettivamente secondo le seguenti equazioni:

$$T_1 = \frac{6 \ln(10) L_z / c_1}{-\ln(1 - \alpha_{0,n}) + (m_w + m_1)L_z}$$

$$T_2 = \frac{6 \ln(10) L_z / c_2}{-\ln(1 - \alpha_{0,n})(1 - \alpha_n)(1 - s_n) + (m_w + m_2)L_z}$$

dove  $L_z$  è la distanza tra soffitto e pavimento,  $\alpha_{0,n}$  e  $\alpha_n$  sono i coefficienti di assorbimento ad incidenza normale del pavimento e soffitto e il campione,  $s_n$  è il coefficiente di scattering ad incidenza normale,  $m_w$  è il coefficiente di attenuazione energetico dovuto all'assorbimento delle pareti laterali,  $c_i$  sono le velocità del suono, e  $m_i$  sono i coefficienti di attenuazione energetica dell'aria alla  $i$ -esima condizione.

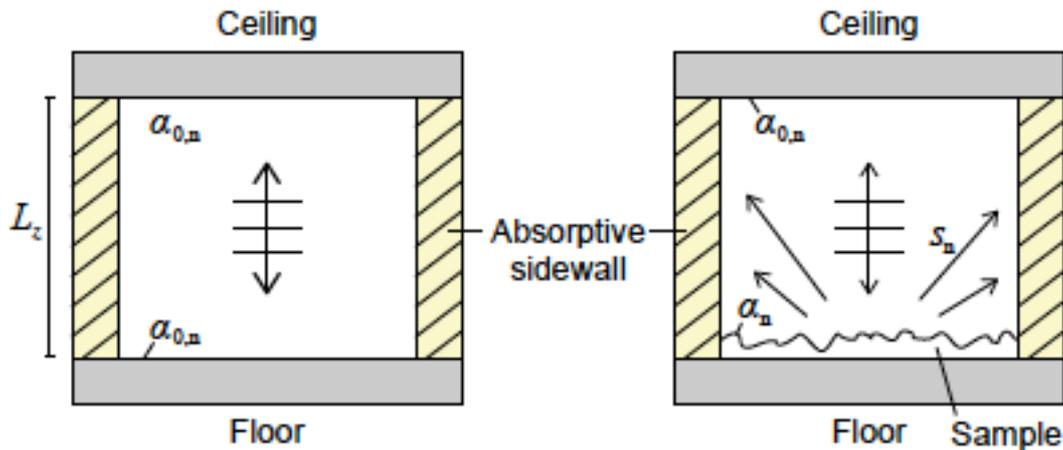


Figura 73 - Schema del metodo di misura in laboratorio per coefficienti di scattering ad incidenza normale: a destra senza campione, a sinistra con il campione [63].

Conseguentemente, il coefficiente di scattering ad incidenza normale del campione è dato dalla seguente equazione:

$$s_n = 1 - \frac{1 - \alpha_{0,n}}{1 - \alpha_n} \exp\left[12 \ln(10) L_z \left(\frac{1}{c_1 T_1} - \frac{1}{c_2 T_2}\right) - 2L_z (m_1 - m_2)\right]$$

che è apparentemente indipendente dalle proprietà fonoassorbenti delle pareti laterali, ma in realtà queste proprietà sono fondamentali per garantire la condizione di campo sonoro unidimensionale.

Uno studio condotto da T. Sakuma et al. [63] ha elencato alcune osservazioni per migliorare l'accuratezza della misura:

- un intervallo di decadimento di 20 dB da -20 a -40 dB può essere adeguato per eliminare la prima parte di decadimento rapido (caratteristico delle componenti diffuse tridimensionali) e conservare un sufficiente intervallo di decadimento;
- un campione di forma quadrata è preferibile e in caso di periodicità è utile che questa sia in direzione con il campo unidimensionale tra soffitto e pavimento;
- la distanza tra il campione e il soffitto, corrispondente all'altezza della camera, dovrebbe essere più grande della lunghezza laterale del campione.

Un ulteriore studio condotto da H. Lee et al. [65] ha esteso questo metodo in un campo sonoro bidimensionale. Con questo metodo l'indice restituito, il coefficiente di scattering fuori dal piano del campione, corrisponde al rapporto tra l'energia scatterizzata fuori dal campo sonoro bidimensionale e l'energia totale riflessa. Per generare un campo sonoro quasi bidimensionale, è necessario utilizzare una camera non rettangolare, dove le due pareti laterali sono altamente assorbenti e le altre quattro pareti non parallele e riflettenti. Basato sulla forma di Sabine, i tempi di riverbero senza e con il campione,  $T_1$  e  $T_2$ , sono dati dalla seguente formula:

$$T_1 = \frac{6\pi \ln 10}{c_1} \frac{S}{L\alpha_0 + A_g + \pi m_1 S}$$

$$T_2 = \frac{6\pi \ln 10}{c_2} \frac{S}{L\bar{\alpha} + A_g + \pi m_2 S}$$

dove  $S$  e  $L$  sono l'area e il perimetro di una parete laterale assorbente,  $c_i$  e  $m_i$  sono le velocità del suono e i coefficienti di attenuazione sonora dell'area alla  $i$ -esima condizione,  $A_g$  è l'area di assorbimento equivalente delle pareti laterali per incidenza del suono radiale,  $\alpha_0$  e  $\bar{\alpha}$  sono i coefficienti di assorbimento medio delle pareti riflettenti

senza e con il campione. Considerando che l'energia scatterizzata dal campione è dissipata all'interno delle pareti laterali assorbenti,  $\bar{\alpha}$  è data dalla seguente equazione:

$$\bar{\alpha} = \frac{l_s}{L} [\alpha_s + (1 - \alpha_s)\hat{s}_{r,2D}] + \frac{L - l_s}{L} \alpha_0$$

dove  $l_s$  è la lunghezza laterale tra il campione e una parete laterale assorbente,  $\alpha_s$  e  $\hat{s}_{r,2D}$  sono il coefficiente di assorbimento e il coefficiente di scattering fuori dal piano del campione. Conseguentemente il coefficiente di scattering fuori dal piano del campione è dato da:

$$\hat{s}_{r,2D} = \frac{6\pi \ln(10)S}{(1 - \alpha_s)l_s} \left( \frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - \frac{\alpha_s - \alpha_0}{1 - \alpha_s} - \frac{\pi S(m_2 - m_1)}{(1 - \alpha_s)l_s}$$

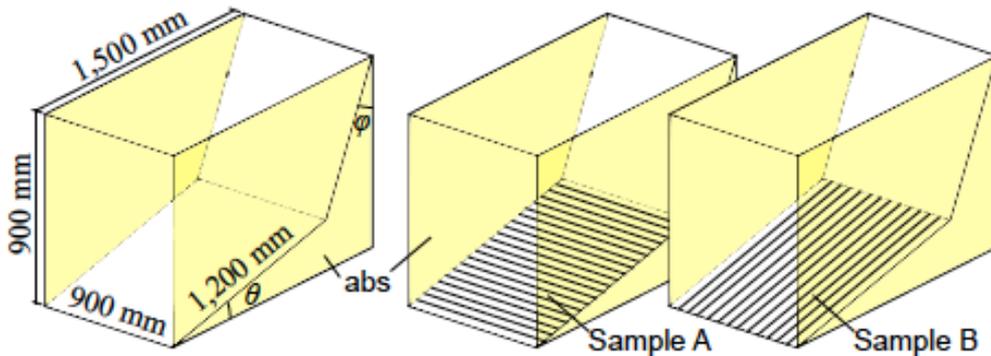


Figura 74 - Geometria della stanza e montaggio di due campione in camera scalata di  $\frac{1}{4}$  [65].

Tuttavia, sono necessarie ulteriori studi per validare l'accuratezza di questo metodo bi-dimensionale.

### 5.3. Misura del coefficiente di scattering risolvendo il problema inverso [1] [66]

A. Farina et al. [66] hanno utilizzato il metodo Wave Field Analysis per misurare il coefficiente di diffusione e ricavare indirettamente il coefficiente di scattering. Il metodo consiste nella misura di numerose risposte all'impulso attraverso l'uso di diversi microfoni equi spaziatati lungo un arco emisferico (o una linea retta). Dopo aver ottenuto le risposte all'impulso, si crea il grafico corrispondente all'ampiezza del segnale lungo l'arco emisferico per ciascun microfono in termini di "oscurità" dei pixel.

Infatti, la tecnica Wave Field Analysis evidenzia la differenza tra i fronti d'onda diretti da quelli riflessi, dal momento che i primi hanno una maggiore curvatura degli ultimi [67], come mostrato in Figura 75. Per separare questi due contributi si utilizzano appropriate finestre spaziali.

L'immagine restituita da questo processo pone sull'asse verticale l'ampiezza logaritmica della risposta all'impulso, mentre sull'asse orizzontale le risposte di tutte le posizioni microfoniche.

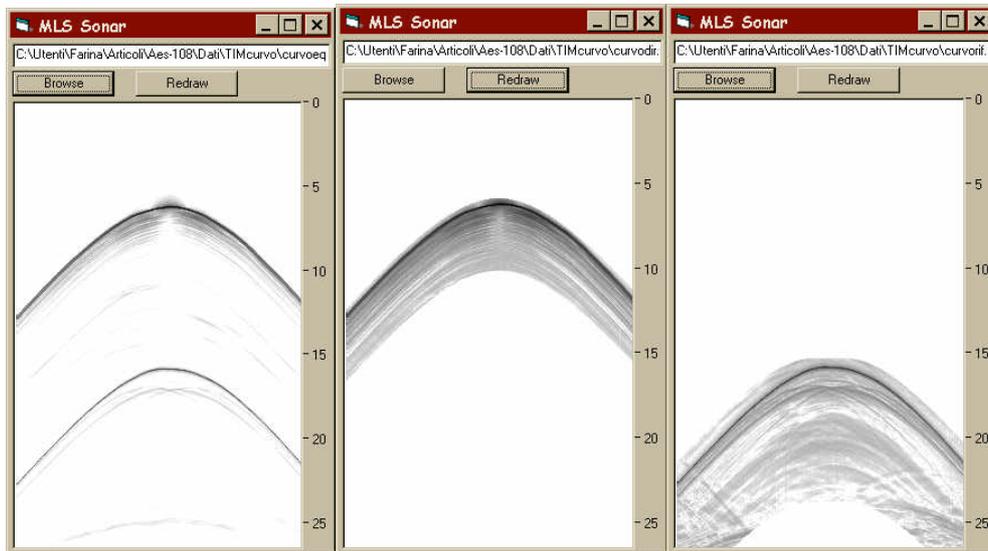


Figura 75 - Grafico polare: a sinistra tutte le risposte all'impulso, al centro solo quelle dirette, a destra solo quelle riflesse [66].

Dai soli contributi riflessi si valuta il coefficiente di diffusione e di scattering di ogni posizione microfonica.

La differenza sostanziale con il metodo previsto dalla ISO 17497-1 [34] è il calcolo indiretto per ottenere il coefficiente di scattering  $s$ : si cerca il suo valore che, inserito in una formula semplificata riguardo l'energia riflessa, produce risultati numerici in accordo con quelli sperimentali.

Ponendo un diffusore rettangolare di dimensioni  $2a \times 2b$  ad un'altezza  $z_c$  dal pavimento, una sorgente montata a filo in un'incavo nel pavimento e un microfono che si muove linearmente sotto il diffusore ad un'altezza  $z_r$ , ad ogni posizione microfonica l'energia totale diffusa è data da:

$$I_{diff} = \int_{y=-b}^b \int_{x=-a}^a \frac{Wz_c}{4\pi r_1^3} \frac{(1-\alpha)s_{loc}}{2\pi r_2^2} dx dy$$

Nel quale  $s_{loc}$  è il valore locale del coefficiente di scattering, che può variare aumentando in prossimità dei bordi del pannello diffusore, secondo la seguente equazione:

$$s_{loc} = 1 - (1-s) \frac{x}{\lambda/2}$$

L'energia speculare, invece, si può calcolare nel seguente modo:

$$I_{spec} = \frac{W(1-\alpha)(1-s_{loc})}{4\pi \left[ (2z_c - z_r)^2 + x_r^2 \right]}$$

Sommando queste due intensità, si ottengono i valori teorici della componente totale riflessiva da confrontare con quella misurata. Attraverso un foglio di calcolo, tipo Excel, è possibile confrontare i valori teorici e sperimentali variando i coefficienti di  $\alpha$  e  $s$  in modo tale da ottenere la massima corrispondenza tra di loro.

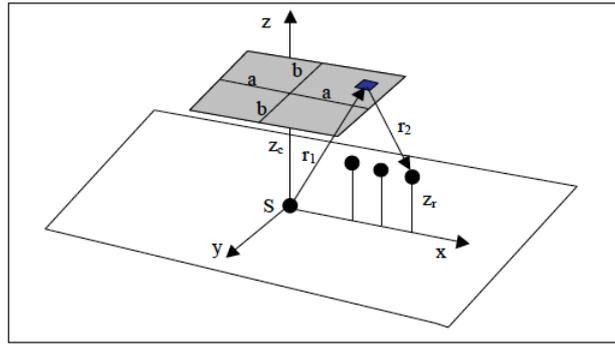


Figura 76 - Schema geometrico dell'apparato sperimentale [66].



Figura 77 - Apparato sperimentale [66].

## 6. Conclusioni

Questo studio si è occupato di analizzare la procedura di misura del coefficiente di scattering in camera riverberante, effettuando misure nella camera riverberante del laboratorio di acustica Zetalab srl.

Nello specifico ci si è concentrati sulla procedura prevista dalla norma ISO 17497-1, lo standard per caratterizzare il potere diffusivo ad incidenza casuale dei materiali.

Per fare ciò è stato realizzato uno studio della norma suddetta, analizzando gli aspetti critici riscontrati dalla sua emanazione da differenti studi scientifici.

E' stato realizzato un setup di tre microfoni e due sorgenti con posizioni fisse, per un totale di 6 combinazioni sorgente-microfono come richiesto da normativa, ed un foglio di calcolo che rendesse il processo di misura immediato ed automatico.

Una volta tarato e calibrato il sistema di misura, si è provveduto alla realizzazione di un supporto circolare composto da travi di legno e ruote, affinché fosse più semplice la rotazione del piatto rotante.

Il piatto rotante è stato progettato per rispettare le minime dimensioni richieste dalla normativa, diametro di 3 metri, scomposto in due parti per permettere un assemblaggio e disassemblaggio più agile e costituito da truciolare nobilitato.

Una volta completate queste fasi "preparative" sono state portate avanti le misure con un campione composto da fibrocemento sinusoidale, in modo da utilizzare i risultati di precedenti studi come riferimento e validazione della procedura utilizzata; è stato misurato anche il suo coefficiente di assorbimento che è risultato inferiore al limite previsto dalla norma.

I risultati ottenuti confermano le affermazioni della letteratura a riguardo: il metodo a step manuali porta ad una significativa incertezza di misura, dovuta principalmente alla variazione del campo sonoro dell'operatore all'interno della camera riverberante.

Sono state analizzate differenti posizioni angolari di misura, confermando che la più corretta risulta essere quella di 5°, portando a 72 il numero di misure per i tempi di riverbero  $T_3$  e  $T_4$ .

La scelta della tipologia del segnale, il sine sweep, ha confermato il miglior S/N e la sua durata, almeno pari al doppio del tempo di riverbero della camera riverberante, ha

permesso di effettuare misure che non modificassero significativamente le condizioni ambientali della camera.

La copertura dell'intercapedine d'aria tra il piatto e il pavimento porta ad un miglioramento significativo del coefficiente di scattering, dal momento che isola le frequenze di risonanza tipiche della struttura utilizzata.

La scelta di utilizzare una cintura di materiale riflettente, come l'alluminio, con un'altezza leggermente superiore a quella della struttura e del piatto, rispettando comunque il limite imposto dalla normativa, ha eliminato gli effetti di diffrazione dei bordi del campione che porterebbero a valori di scattering superiori ad 1.

Ulteriori misure saranno possibili con la realizzazione di un motore rotante che renderebbe più accurata la misura, dal momento che il campo sonoro interno alla camera riverberante non sarebbe influenzato dalla presenza di un operatore.

La procedura della norma ISO 17497-1 nel corso degli anni ha subito molte critiche sui suoi aspetti ritenuti vaghi, ma nonostante un emendamento del 2014 che ha indicato con maggior convinzione alcune soluzioni proposte da studi scientifici, presenta imprecisioni e difficoltà procedurali che la rendono molto complicata in una camera riverberante full scale.

Non c'è da meravigliarsi se non esiste in Italia un laboratorio di acustica accreditato a questa misura in full scale. Il lavoro svolto presso il laboratorio di acustica Zetalab permetterebbe di avere il primo laboratorio acustico italiano abilitato alla norma ISO 17497-1 full scale.

## Bibliografia

- [1] T. Cox e P. D'Antonio, *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. 3rd edition., New York, USA: Taylor and Francis, 2017.
- [2] O. Doutres e N. Atalla, «Sound absorption properties of functionally graded polyurathane foams, New York,» 2012.
- [3] R. Spagnolo, *Manuale di Acustica*, 2001.
- [4] J. Arenas e M. Crocker, «Recent trends in porous sound-absorbing materials,» *Noise Vib. Control Mag.*, 2010.
- [5] P. Soltani e M. Zerrebini, «The analysis of acoustical characteristics and sound absorption coefficient of woven fabrics,» *Textile research journal*, vol. 82, pp. 875-882, 2012.
- [6] S. J. Wertel, «Esperimental analysis of noise reduction properties of sound absorbing foam,» University of Wisconsin-Stout, 2000.
- [7] J. Conrad, *Engineering Acoustics and Noise Control*, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1983.
- [8] I. Uno, «Notes on Sound Absorption Technology, Poughkeepsie,» in *Noise control foundation*, NY, 1994.
- [9] H. S. Seddeq, «Factors Influencing Acoustic Performance of Sound Absorptive Material,» *Australian Journal of basic and applied sciences*, pp. 4610-4617, 2009.
- [10] M. M. Al Bakri Abdullah, L. Jamaludin, A. Abdullah, R. Abd Razak e H. K., «Influence of Multilayer Textile Biopolymer Foam Doped with Titanium Dioxide for Sound Absorption Materials,» *Key Engineering Materials*, Vol. %1 di %2594-595, pp. 750-754, 2013.
- [11] M. Coates e M. Kierzkowski, «Lighter, thinners and more absorbent,» in *technical textile international*, 2002.
- [12] A. F. Everest, *The Master Handbook of Acoustics*, 4th edition, New York: McGraw-Hill, 2001.
- [13] K. V. Horoshenkov e M. J. Swift, «The Effect Of Consolidation On The Acoustic Properties of Loose Rubber Granulates,» *Applied Acoustics*, vol. 62, n. 6, pp. 665-690, 2001.
- [14] M. Matyka, A. Khalili e Z. Koza, «Tortuosity-porosity relation in porous media flow,» in *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.*, 2008.
- [15] IUAV, «Scheda-4-fonoassorbimento,» [Online]. Available: [www.iuav.it](http://www.iuav.it).
- [16] FilialeMilanosrl. [Online]. Available: <http://www.filialemilano.it>.
- [17] P. D'Antonio e J. Konnert, «The QRD diffractal: A new one- ot two-dimensional fractal sound diffusor,» *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 40, n. 3, pp. 113-29, 1992.
- [18] Acoustic GRG Products Ltd, «RPG Omniffusor,» [Online]. Available: <http://www.rpgeurope.com/products/product/omniffusor.html>.

- [19] Gik Acoustic, «PRODOTTI DIFFUSORI PolyFusor Evolution,» [Online]. Available: [https://gikacoustics.it/prodotti/polyfusor-evolution-diffusore-assorbitore/?gclid=Cj0KCQjw2efrBRD3ARIsAEnt0egeoL6RAijhNSO0x5RDe-NJZKGZTmq4sfld\\_kdQGTwJ2o2uVrvu70aApoCEALw\\_wcB](https://gikacoustics.it/prodotti/polyfusor-evolution-diffusore-assorbitore/?gclid=Cj0KCQjw2efrBRD3ARIsAEnt0egeoL6RAijhNSO0x5RDe-NJZKGZTmq4sfld_kdQGTwJ2o2uVrvu70aApoCEALw_wcB).
- [20] T. Cox, B.-I. L. Dalenback, P. D'Antonio, J. J. Embrechts, J. Y. Jeon, E. Mommertz e M. Vorlander, «A tutorial on scattering and diffusion coefficients for room acoustic surfaces,» *Acta Acustica uw Acustica*, vol. 92, pp. 1-15, 2006.
- [21] I. 17497-2, «Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces - Part 2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field,» 2012.
- [22] AES-4id-2001, «AES information document for room acoustics and sound reinforcement systems - Characterisation and measurement of surface scattering uniformity,» *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 49, pp. 149-65, 2001.
- [23] P. D'Antonio e T. J. Cox, «Diffusor application in rooms,» *Appl. Acoust.*, vol. 60, n. 2, pp. 113 - 42, 2000.
- [24] V. Vinci, *Tesi PHD, "STUDIO DEI DIFFUSORI DI SCHROEDER E MODELLAZIONE MEDIANTE DWM (DIGITAL WAVEGUIDE MESH)"*, 2011.
- [25] T. J. Hargreaves, T. J. Cox, Y. W. Lam e P. D'Antonio, «Surface diffusion coefficients for room acoustics: Free field measures,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 108, n. 4, pp. 1710 - 20, 2000.
- [26] H. Kuttruff e T. Strassen, «On the dependence of reverberation time on the wall diffusion and on room shape,» *Acustica*, vol. 45, pp. 246 - 55, 1980.
- [27] Y. W. Lam, «On the parameters controlling diffusion calculation in a hybrid computer model for room acoustic prediction,» *Proc. IoA*, vol. 16, pp. 537 - 544, 1994.
- [28] M. Hodgson, «Evidence of diffuse surface reflections in rooms,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 89, pp. 765 - 71, 1991.
- [29] M. Vorlander, «International round robin on room acoustical computer simulations,» *Proc. 15th ICA*, vol. II, pp. 689 - 692, 1995.
- [30] Y. W. Lam, «A comparison of three diffuse reflection modeling methods used in room acoustics computer models,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 100, pp. 2181 - 92, 1996.
- [31] M. Vorlander e E. Mommertz, «Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients,» *Applied Acoustics*, vol. 60, pp. 187 - 199, 2000.
- [32] R. Heinz, «On modelling the diffuse scattering properties of boundaries in sound particle simulations for room acoustics,» *Acustica*, vol. 82, pp. 82 - 90, 1996.
- [33] H. Kuttruff, *Room Acoustics*, 6th edition, Oxon, UK: CRC Press, 2009.
- [34] I. 17497-1, «Acoustics - Measurement of the sound scattering properties of surfaces - Part 1 : Measurement of the random - incidence scattering coefficient in a reverberation room,» 2000.
- [35] E. Mommertz, «Determination of scattering coefficients from reflection directivity of architectural surfaces,» *Applied Acoustics*, vol. 60, pp. 201 - 203, 2000.

- [36] T. Sakuma e Y. Kosaka, «Comparison between scattering coefficients determined by specimen rotation and by directivity correlation,» *International Symposium on Room Acoustics: Design and Science (RADS), Awaji, Japan*, pp. 201 - 203, 2004.
- [37] T. Cox e P. D'Antonio, «Contrasting surface diffusion and scattering coefficients,» *Proc. 17th ICA, Italy*, vol. 6B.09.01, 2001.
- [38] «ISO 354: Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room,» 2003.
- [39] I. 18233, «Acoustics - Application of new measurement methods in building and room acoustics,» *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland*, 2006.
- [40] I. 140-13, «ACOUSTICS -- MEASUREMENT OF SOUND INSULATION IN BUILDINGS AND OF BUILDING ELEMENTS -- PART 13: GUIDELINES».
- [41] I. 3382-2, «Acustica - Misurazione dei parametri acustici degli ambienti - Parte 2: Tempo di riverberazione negli ambienti ordinari,» 2008.
- [42] L. Shtrepi, A. Astolfi, G. D'Antonio, G. Vannelli, G. Barbato, S. Mauro e A. Prato, «Accuracy of the random-incidence scattering coefficient measurement,» *Applied Acoustic*, vol. 106, pp. 23 - 35.
- [43] J. Jeon, S. Lee e M. Vorlander, «Development of scattering surfaces for concert halls,» *Appl Acoust*, vol. 65, n. 4, pp. 341 - 55, 2004.
- [44] M. Vorlander, J.-J. Embrechts, L. De Geetere, G. Vermeir e M. Gomes, «Case studies in measurement of random incidence scattering coefficients,» *Acta Acust United Acust*, vol. 90, n. 5, pp. 858 - 67, 2004.
- [45] M. Muller-Trapet e M. Vorlander, «Uncertainty analysis of standardized measurements of random-incidence absorption and scattering coefficients,» *J Acoust Soc Am*, vol. 137, n. 1, pp. 63 - 74, 2015.
- [46] Y.-J. Choi e D.-U. Jeong, «Effects of unspecified experimental conditions in ISO 17497-1 on the scattering coefficients measured in a scale model,» *Acta Acust United Acust*, vol. 97, n. 1, pp. 75 - 81, 2011.
- [47] P. D'Antonio, «The state of art in measurement and characterization of the absorption, diffusion and scattering coefficients.,» *The 41th international confress and exposition on noise control engineering (INTERNOISE 2012), New York, USA*, 2012.
- [48] D. Bradley, J. Adelgren, M. Muller-Trapet e M. Vorlander, «Comparison of hanging panels and boundary diffusers in a reverberation chamber,» *International symposium on room acoustics (ISRA 2013), Toronto, Canada*, 2013.
- [49] L. De Geetere e G. Vermeir, «Investigations on real-scale experiments for the measurement of the ISO scattering coefficient in the reverberation room,» *Forum Acousticum 2002: 3rd European confress on acoustics, Sevilla, Spain*, 2002.
- [50] T. Sakuma e H. Lee, «Validation of the sample rotation scheme in the measurement of random-incidence scattering coefficients,» *Acta Acust United Acust*, vol. 99, n. 5, pp. 737 - 50, 2013.

- [51] E. Mommertz, «Angle-dependent in-situ measurements of reflection coefficients using a subtraction technique,» *Appl. Acoust*, vol. 46, n. 3, pp. 251 - 63, 1995.
- [52] M. Gomes, M. Vorlander e S. Gerges, «Aspects of the sample geometry in the measurement of the random-incidence scattering coefficient,» *Forum Acusticum 2002: 3rd European congress on acoustics, Sevilla, Spain*, 2002.
- [53] J.-J. Embrechts, «Practical aspects of the ISO procedure for measuring the scattering coefficient in a real-scale experiment.,» *Forum Acusticum 2002: 3rd European congress on acoustics, Sevilla, Spain*, 2002.
- [54] I. Schmich-Yamane, M. Malgrange e C. Rougier, «How absorptive can a diffuser be to accurately measure random incidence scattering coefficients?,» *Proceedings of meetings on acoustics*, 2013.
- [55] M. Gomes, M. Vorlander e S. Gerges, «Investigations on the ISO measurement method for scattering coefficient in the reverberation room,» *17th International congress on acoustics, Rome, Italy*, 2001.
- [56] T. Kamisinski, Brawata K., A. Pilch, J. Rubacha e M. Zastawnik, «Test signal selection for determining the sound scattering coefficient in a reverberation chamber,» *Arch Acoust*, vol. 37, n. 4, pp. 405 - 9, 2012.
- [57] «ISO 17497/Amd 1. Acoustics - sound-scattering properties of surfaces - Part 1: measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room,» 2014.
- [58] Spectra s.r.l., «"Synchronous Averaging FSA & VFSA",» 22 05 2013. [Online].
- [59] J. Ducourneau, V. Planeau e A. Nejade, «Design of a multipolar weighting for acoustic antennae.,» *Appl Acoust*, vol. 70, n. 484-92, 2009.
- [60] J. Ducourneau, A. Faiz, A. Khanfir e J. Chatillon, «Measuring sound scattering coefficients of uneven surfaces in a reverberant workplace - Principle and validation of the method,» *Appl Acoust*, vol. 74, pp. 653-660, 2013.
- [61] J. Ducourneau, A. Faiz e J. Chatillon, «New device for measuring mapping of sound scattering coefficients of vertical uneven surfaces in a reverberant workplaces,» *Appl Acoust*, vol. 90, pp. 21-30, 2015.
- [62] T. Hanyu, K. Hoshi e T. Nakakita, «Method for measuring sound scattering coefficients of walls and diffusers by using a non-diffuse sound field with unevenly-distributed sound absorption,» in *Inter-noise*, Hamburg, 2016.
- [63] T. Sakuma, H. Lee e N. Inoue, «A laboratory method for measuring normal-incidence scattering coefficients of architectural surfaces,» *The Acoustical Society of Japan*, vol. 37, n. 6, pp. 277-285, 2016.
- [64] T. Sakuma, «Approximate theory of reverberation in rectangular rooms with specular and diffuse reflections,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 132, pp. 2325-2336, 2012.
- [65] H. Lee, T. Seike e T. Sakuma, «A laboratory method for measuring out-of-plane scattering coefficients of wall surfaces in two-dimensional sound field,» *Acoust. Sci. & tech.*, vol. 37, n. 1, pp. 42-25, 2016.

- [66] A. Farina, «A new method for measuring the scattering coefficient and the diffusion coefficient of panels,» *Acustica*, vol. 86, n. 6, pp. 928-42, 2000.
- [67] D. De Vries e J. Baan, «Auralization of Sound Fields by Wave Field Synthesis,» *Preprints of the 106th Convention, Munich, Germany*, vol. 4927, pp. 8-11, 1999.
- [68] A. Farina e L. Tronchin, «Comparison between measurements of the scattering and diffusion coefficients,» in *ICA-2001*, Rome, 2001.