

# **POLITECNICO DI TORINO**

**Corso di Laurea Magistrale in  
Ingegneria del Cinema e dei Mezzi di Comunicazione**



## **Tesi di Laurea Magistrale**

**Validazione delle misure dell'assorbimento acustico in  
base alla ISO-354 in una camera riverberante in scala**

**Relatore:  
Prof. Masoero Marco Carlo**

**Candidato:  
Latorella Francesca**

**Co-relatore:  
Dr. Arch. Shtrepi Louena**

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in  
Ingegneria del Cinema e dei Mezzi di Comunicazione

Tesi di Laurea Magistrale

## **Validazione delle misure dell'assorbimento acustico in base alla ISO-354 in una camera riverberante in scala**



**Relatore:**

Prof. Masoero Marco Carlo

**Candidato:**

Latorella Francesca

**Co-relatore:**

Dr. Arch. Shtrepi Louena

Dicembre 2018

# Sommario

Abstract .....	1
Introduzione.....	3
1 Materiali fonoassorbenti .....	6
1.1 Classificazione dei materiali.....	7
1.1.1 Materiali porosi, assorbimento per porosità .....	7
1.1.2 Pannelli forati, assorbimento per risonanza in cavità.....	11
1.1.3 Pannelli Vibranti, assorbimento per risonanza di membrana .....	12
1.2 Proprietà dei materiali porosi .....	13
1.2.1 Resistività al flusso $\sigma$ e Resistenza al flusso $\sigma s$ .....	13
1.2.2 Porosità .....	14
1.2.3 Tortuosità.....	14
2 Misure del coefficiente di assorbimento.....	15
2.1 Camera riverberante.....	16
2.1.1 Riverbero.....	17
2.1.2 Calcolo di $\alpha s$ in camera riverberante.....	20
2.1.3 Ripetibilità e riproducibilità delle misure in camera riverberante.....	25
2.2 Tubo di Kundt o di impedenza .....	26
2.2.1 Metodo delle onde stazionarie .....	28
2.2.2 Metodo della funzione di trasferimento.....	29
2.3 Camere riverberanti in scala .....	30
2.3.1 Svantaggi delle camere riverberanti in scala .....	31
2.3.2 Esempi di camere riverberanti in scala .....	32
2.3.3 Test Round Robin .....	38
2.4 Confronto dei metodi.....	40
3 Descrizione della camera riverberante in scala .....	41

3.1	Caratteristiche acustiche .....	42
3.2	Catena elettroacustica .....	44
3.2.1	Catena in ingresso .....	45
3.2.2	Catena in uscita .....	48
3.3	Metodo di misura.....	50
4	Casi studio .....	53
4.1	Materiali testati.....	53
4.2	Misure nella camera riverberante dell'INRiM .....	57
4.3	Misure nel tubo di Kundt .....	58
4.4	Misure nella camera in scala.....	62
4.4.1	Fattori esaminati .....	62
5	Analisi e discussione dei risultati .....	68
5.1	Analisi statistica.....	68
5.2	Presentazione dei risultati .....	70
5.2.1	Prima analisi: $\alpha$ .....	70
5.2.2	Seconda analisi: differenza con la camera 1:1.....	86
5.2.3	Terza analisi: differenza con il tubo .....	90
6	Diffrazione per l'effetto bordo.....	92
6.1	Studio nella camera riverberante in scala.....	93
6.2	Risultati dello studio .....	96
	Conclusioni .....	100
	BIBLIOGRAFIA.....	103
	SITOGRAFIA .....	106

## Lista delle figure

Figura 1: Ripartizione dell'energia sonora .....	6
Figura 2: Andamento in frequenza di $\alpha$ per differenti materiali fonoassorbenti [2] ..	7
Figura 3: Cella aperta e cella chiusa, microscopio [2] .....	7
Figura 4: Le tre tipologie principali di materiali porosi [3] .....	8
Figura 6: Materiale in resina espansa [1a] .....	8
Figura 5: Materiale a cella aperta di origine minerale [2a] .....	8
Figura 7: Materiale in fibra minerale [3a] .....	9
Figura 8: Materiale in fibra vegetale [4a] .....	9
Figura 9: Materiale in fibra sintetica [5a] .....	9
Figura 10: Materiale a struttura granulare [6a] .....	9
Figura 11: Andamento dell'assorbimento per porosità in relazione allo spessore [2] .....	10
Figura 12: Esempio di installazione con intercapedine d'aria [1] .....	10
Figura 13: Risuonatore a cavità [7a] .....	11
Figura 14: Schema di un pannello vibrante con e senza materiale poroso [8a] .....	12
Figura 15: Incidenza normale ed incidenza casuale [9a] .....	15
Figura 16: Riflessioni sonore [10a] .....	18
Figura 17: Tempo di riverberazione ottimale per banda di ottava a 500 Hz In funzione del volume e della destinazione d'uso del locale [8] .....	18
Figura 18: Decadimento della pressione sonora e $T_{60}$ [11a] .....	19
Figura 19: Esempio di camera riverberante 1:1 (Laboratorio di acustica - INRiM) ...	20
Figura 20: Risposta all'impulso in un sistema LTI [12a] .....	21
Figura 21: Curva di decadimento da rumore e integrale di Schroeder [13a] .....	22
Figura 22: Coefficienti di assorbimento calcolati senza tener conto delle condizioni atmosferiche (sinistra) e con la correzione delle condizioni atmosferiche (destra) [12] .....	24
Figura 23: Tubo di Kundt per la misura con le onde stazionarie [18] .....	28
Figura 24: Tubo di Kundt per la misura con la funzione di trasferimento [19] .....	29
Figura 25: Specifiche tecniche dell'Alpha Cabin [16a] .....	33
Figura 26: Alpha Cabin [16a] .....	33
Figura 27: Coefficienti di assorbimento Cotone 20 mm [21] .....	34

Figura 28: Coefficienti di assorbimento Poliestere 13 mm [21] .....	34
Figura 29: Coefficienti di assorbimento Poliestere 4 mm [21] .....	34
Figura 30: Design e dimensioni della camera riverberante in scala (a) e vista esterna (b) [24] .....	35
Figura 31: Valori dei coefficienti di assorbimento calcolati nella camera 1:1 (linea continua) e nella camera in scala (linea discontinua) [24] .....	36
Figura 32: Design della camera e vista dall'esterno [25] .....	37
Figura 33: Materiali testati, assorbente piatto (1), assorbente bugnato (2), polietilene (3) [25] .....	37
Figura 34: Tempi di riverberazione (a) e coefficienti di assorbimento (b) [25] .....	37
Figura 35: Coefficienti di assorbimento del Poliuretano da 50 mm e 25 mm [27] ...	39
Figura 36: Pianta e prospetto [28] .....	41
Figura 37: Confronto delle distribuzioni modali con e senza i diffusori [28] .....	42
Figura 38: Dipendenza di EMC del legno dall'umidità relativa (RH) e dalla temperatura [30] .....	43
Figura 39: Variazione dei valori di A1 della camera vuota e curva dei valori massimi accettati dalla ISO-354 .....	44
Figura 40: Microfoni .....	46
Figura 41: Alimentatore .....	46
Figura 42: Scheda audio .....	46
Figura 43: Schema della griglia di posizione dei microfoni [28] .....	46
Figura 44: Posizione dei microfoni nel setup utilizzato .....	47
Figura 45: Grafico della risposta in frequenza e della direttività della sorgente 2 ...	48
Figura 46: Sorgente dodecaedrica .....	49
Figura 47: Amplificatori .....	49
Figura 48: Sorgenti 1 e 2 posizionate nel setup utilizzato .....	49
Figura 49: GUI del programma sviluppato .....	50
Figura 50: GUI del toolbox ITA .....	50
Figura 51: GUI del programma sviluppato .....	51
Figura 52: Curva di decadimento della camera vuota .....	52
Figura 53: Curva di decadimento della camera con il campione all'interno .....	52
Figura 54: Fotografie delle sezioni dei materiali testati .....	56
Figura 55: Campione di prova (D) nella camera riverberante dell'INRiM .....	58

Figura 56: Schema della catena .....	59
Figura 57: Tubo di Kundt 30 mm.....	60
Figura 58: Tubo di Kundt da 50 mm.....	60
Figura 59: Generatore di rumore.....	60
Figura 60: Provini di diametro 30 mm e 50 mm .....	60
Figura 61: Rappresentazione schematica delle tre posizione del campione sul pavimento.....	64
Figura 62: Grafici di $\alpha$ in funzione della frequenza per il campione A nelle diverse configurazioni (confronto delle dimensioni) .....	73
Figura 63: Grafici di $\alpha$ in funzione della frequenza per il campione B nelle diverse configurazioni (confronto delle dimensioni) .....	74
Figura 64: Grafici di $\alpha$ in funzione della frequenza per il campione C nelle diverse configurazioni (confronto delle dimensioni) .....	75
Figura 65: Grafici di $\alpha$ in funzione della frequenza per il campione D nelle diverse configurazioni (confronto delle dimensioni) .....	76
Figura 66: Grafici di $\alpha$ in funzione della frequenza per il campione E nelle diverse configurazioni (confronto delle dimensioni) .....	77
Figura 67: Grafici di $\alpha$ in funzione della frequenza per il campione A nelle diverse configurazioni (confronto del trattamento bordi) (pt.1) .....	80
Figura 68: Grafici di $\alpha$ in funzione della frequenza per il campione A nelle diverse configurazioni (confronto del trattamento bordi) (pt.2).....	81
Figura 69: Grafici di $\alpha$ in funzione della frequenza per il campione B nelle diverse configurazioni (confronto del trattamento bordi) (pt.1) .....	82
Figura 70: Grafici di $\alpha$ in funzione della frequenza per il campione B nelle diverse configurazioni (confronto del trattamento bordi) (pt.2).....	83
Figura 71: Grafici di $\alpha$ in funzione della frequenza per il campione E nelle diverse configurazioni (confronto del trattamento bordi) (pt.1).....	84
Figura 72: Grafici di $\alpha$ in funzione della frequenza per il campione E nelle diverse configurazioni (confronto del trattamento bordi) (pt.2).....	85
Figura 73: Confronti di $\Delta\alpha$ per i cinque campioni .....	91
Figura 74: Campo scatterizzato simulato su una striscia di materiale assorbente [35] .....	92

Figura 75: Andamento del coefficiente di assorbimento in relazione alle distanze tra pannelli e alle distanze dalle pareti [37].....	94
Figura 76: Grafico di $\alpha$ per le diverse configurazioni con distanza tra i pannelli di 5 cm .....	96
Figura 77: Grafico di $\alpha$ per le diverse configurazioni con distanza tra i pannelli di 1 cm .....	96
Figura 78:Grafico delle linee di tendenza per le frequenze da 400 Hz a 5000 Hz con distanza tra i pannelli di 5 cm, si riportano i valori di $R^2$ per mostrare il livello di approssimazione.....	97
Figura 79: Grafico delle linee di tendenza per le frequenze da 400 Hz a 5000 Hz con distanza tra i pannelli di 1 cm, si riportano i valori di $R^2$ per mostrare il livello di approssimazione.....	97
Figura 80: Confronto tra $\alpha_\infty$ e $\alpha$ calcolato per il pannello di dimensioni 60x80 cm, distanza di 5 cm .....	98
Figura 81: Confronto tra $\alpha_\infty$ e $\alpha$ calcolato per il pannello di dimensioni 60x80 cm, distanza di 1 cm .....	98

## Lista dei simboli

$\alpha$	Coefficiente di assorbimento acustico
$f_r$	Frequenza di risonanza
$\sigma$	Resistività al flusso
$\sigma_s$	Resistenza al flusso
$P$	Pressione
$U$	Velocità volumetrica del flusso d'aria
$d$	Spessore
$f_{(x,y,z)}$	Frequenze di risonanza
$f_{\min}$	Frequenza di taglio
$c$	Velocità del suono
$V$	Volume della stanza
$f_s$	Frequenza di Schroeder
$A$	Assorbimento della stanza
$S_r$	La superficie totale della stanza
$T_{60}$	Tempo di riverberazione
$m$	Coefficiente di attenuazione dell'aria
$\alpha_A$	Coefficiente di attenuazione
$\alpha_i$	Coefficiente di assorbimento medio della i-esima superficie di materiale
$h(t)$	Risposta all'impulso
$\delta(t)$	Delta di dirac
$T_1$	Tempo di riverberazione medio della stanza vuota
$T_2$	Tempo di riverberazione medio della stanza con il campione
$A_1$	Area equivalente di assorbimento della stanza vuota
$A_2$	Area equivalente di assorbimento della stanza con il campione
$A_T$	Area equivalente di assorbimento sonoro del campione
$S$	Superficie del campione
$\epsilon(T)$	Deviazione standard
$U$	Incertezza espansa delle misure in camera riverberante
$f_u$	Frequenza massima misurabile nel tubo di Kundt
$f_l$	Frequenza minima misurabile nel tubo di Kundt
$k$	Numero d'onda
$R$	Coefficiente di riflessione
$s$	Rapporto d'onda stazionaria
$H$	Funzione di trasferimento
$f_c$	Frequenza di campionamento
RH	Umidità relativa
EMC	Contenuto di umidità all'equilibrio
$E$	Rapporto perimetrale

## Abstract

Questo studio prende in considerazione la camera riverberante in scala 1:5 del Politecnico di Torino per la misurazione del coefficiente di assorbimento acustico, caratteristica fondamentale che definisce la qualità di un materiale fonoassorbente, definito come il rapporto tra l'energia sonora assorbita dalla superficie e l'energia sonora incidente.

Ad oggi i metodi standardizzati per il calcolo dell'assorbimento acustico sono due: il metodo della camera riverberante e quello del tubo di Kundt, o tubo di impedenza. Nel caso del tubo di Kundt i campioni testati hanno dimensioni ridotte, ma questa misura non fornisce sufficienti informazioni sul comportamento di assorbimento in campo diffuso poiché valuta solo l'incidenza perpendicolare delle onde, il che è rilevante poiché i campi sonori incontrati nella maggior parte delle applicazioni sono diffusi. La camera riverberante fornisce coefficienti di assorbimento maggiormente significativi poiché i campioni vengono testati in campo diffuso, ossia con incidenza casuale delle onde sonore. Sia la normativa europea EN ISO 354 che l'equivalente americano ASTM C423 definiscono le caratteristiche e le dimensioni della camera. Il volume minimo raccomandato della camera di riverberazione è di 200 metri cubi e si richiede una superficie del campione di prova tra 10 e 12 metri quadrati. Ciò comporta un aumento significativo dei costi rispetto ai test condotti con tubo di Kundt.

Una camera riverberante di dimensioni ridotte è quindi un utile strumento per abbassare i costi mantenendo i vantaggi della misura in campo diffuso, per questo motivo negli ultimi anni si stanno sviluppando e studiando camere riverberanti in scala. Non esiste però, ad oggi, uno standard preciso per validarne i metodi di misura e i risultati. Esistono, inoltre, delle limitazioni nell'uso di camere riverberanti di dimensioni ridotte: il limite inferiore delle frequenze in cui le misure sono valide è maggiore rispetto a quello di una camera grande, poiché il campo può considerarsi diffuso per un range di frequenze inversamente proporzionale al volume dell'ambiente; la dimensione ridotta del campione può avere limitazioni sulla

correttezza del valore di assorbimento misurato a causa degli effetti di diffrazione dei bordi.

L'obiettivo della tesi è quello di trovare la configurazione ottimale, partendo dalla normativa ISO-354. Le misure effettuate nella camera in scala vengono valutate in relazione ai valori di coefficiente di assorbimento calcolati nella camera riverberante in scala 1:1 dell'INRiM (Istituto nazionale di ricerca metrologica) e nel tubo di Kundt. Sono stati valutati i seguenti fattori: dimensioni del campione, orientamento del campione (orizzontale, verticale e diagonale sul pavimento della camera), isolamento dei bordi. Si è effettuata un'analisi statistica, tramite il software SPSS, su tutte le combinazioni di questi fattori per comprendere quali fossero significativi.

È stata poi condotta un'analisi sull'influenza dei bordi, con lo scopo di studiare la relazione tra i coefficienti di assorbimento calcolati e il rapporto E (rapporto tra perimetro e superficie del campione). Per fare ciò si è effettuata la misura dividendo il campione in più parti. Dalla relazione è stato possibile ricavare un fattore correttivo.

# Introduzione

Il suono che si sente nella maggior parte degli ambienti è una combinazione del suono diretto dalla sorgente e dei suoni indiretti, ossia riflessi da superfici e oggetti.

Uno degli argomenti centrali in acustica è proprio come manipolare queste riflessioni, poiché influenzano il modo in cui il suono viene percepito all'interno di un ambiente. I materiali fonoassorbenti hanno una duplice funzione: vengono utilizzati sia nell'isolamento acustico, ossia per attenuare il livello di pressione sonora in ambienti rumorosi come autostrade, cantieri o gli interni di un'automobile, sia nella correzione acustica, cioè per controllare le riflessioni e il riverbero degli ambienti.

Nel caso di correzione acustica, controllare il modo in cui uno spazio "suona" significa influenzare il tempo di riverberazione: un lungo tempo di riverberazione, ad esempio può far sembrare la stanza rumorosa e rendere il parlato incomprensibile. Le stanze progettate per conferenze o lezioni, ad esempio, hanno un tempo di riverberazione breve, inferiore ad un secondo. Viceversa, un tempo di riverberazione più lungo può migliorare una sala da concerto aggiungendo ricchezza, profondità e calore alla musica.

Da sempre vi è, quindi, un notevole interesse per i materiali e le soluzioni combinate utilizzate nell'assorbimento acustico. Oggi, molti sforzi vengono fatti per progettare e produrre nuovi materiali ricavati da diversi metodi di riciclaggio industriale, o da fibre vegetali o naturali.

Le soluzioni vengono progettate sulla base del coefficiente di assorbimento acustico. Si tratta della caratteristica fondamentale che definisce la qualità fonoassorbente, è definito come il rapporto tra l'energia sonora assorbita dalla superficie e l'energia incidente.

Progettare nuovi materiali significa quindi testare, misurando il coefficiente di assorbimento, e riformulare.

I coefficienti di assorbimento vengono misurati utilizzando uno dei due metodi standard: il tubo di impedenza, o tubo di Kundt, e la camera riverberante.

Nel caso del tubo i campioni testati hanno dimensioni minime (qualche centimetro di diametro), ma questa misura non fornisce sufficienti informazioni sul comportamento di assorbimento in campo diffuso poiché valuta solo l'incidenza perpendicolare delle onde, il che è rilevante dato che i campi sonori incontrati nella maggior parte delle applicazioni sono diffusi, quindi ad incidenza casuale.

La camera riverberante fornisce coefficienti di assorbimento maggiormente significativi poiché i campioni vengono testati con incidenza casuale.

Sia la normativa europea EN ISO 354: 2003 (1) che l'equivalente americano ASTM C423 (2) definiscono le caratteristiche e le dimensioni della camera. Il volume minimo raccomandato della camera di riverberazione standardizzata è di 200 m<sup>3</sup> e si richiede una superficie del campione di prova tra 10 e 12 m<sup>2</sup>. Ciò comporta un aumento significativo dei costi rispetto ai test condotti con tubo di Kundt.

La camera riverberante è, quindi, difficile da realizzare e i test condotti sono costosi. Una camera riverberante di dimensioni ridotte è quindi un utile strumento per abbassare i costi mantenendo i vantaggi della misura in campo diffuso: fornisce risultati simili e permette di utilizzare campioni di dimensioni ridotte rispetto a quelle standard della camera riverberante rendendo possibile, quindi, il test e il confronto di piccoli campioni di materiali, in modo che possano essere successivamente scelti per essere testati in una camera di riverberazione standardizzata.

Esistono, però, delle limitazioni nell'uso di camere riverberanti di dimensioni ridotte: il limite di bassa frequenza in cui le misure sono valide è maggiore rispetto a una stanza grande, la dimensione del campione è piccola e questo potrebbe avere limitazioni sulla correttezza del valore di assorbimento misurato.

Inoltre, attualmente, non esistono metodi standardizzati e normative su come effettuare le misure.

Questo lavoro di tesi prende in esame la camera riverberante in scala del Dipartimento Energia (DENEG) del Politecnico di Torino, con l'obiettivo di valutarne la validità delle misure dell'assorbimento acustico.

La camera in scala è stata costruita con riferimento alla camera di riverberazione standardizzata dell'INRiM di Torino<sup>1</sup>. La valutazione avviene quindi confrontando i dati ottenuti nei test con quelli dell'INRiM, per valutare le somiglianze tra i risultati e gli eventuali ulteriori miglioramenti che potrebbero essere richiesti sia nella prassi di misurazione che nella calibrazione della camera in scala.

La tesi è articolata in sei capitoli:

- il capitolo 1 presenta un approfondimento sui materiali fonoassorbenti e la loro classificazione in base al metodo di dissipazione di energia;
- il capitolo 2 descrive le metodologie standardizzate per la misurazione del coefficiente di assorbimento acustico, cioè camera riverberante 1:1 e tubo di Kundt. Il capitolo illustra poi alcuni esempi e alcuni studi condotti sulle camere in scala esistenti;
- il capitolo 3 descrive la camera in scala oggetto del presente lavoro di tesi e la catena elettroacustica utilizzata. Vengono inoltre presentati i materiali testati;
- il capitolo 4 descrive le misure effettuate nella camera riverberante dell'INRiM e nel tubo di Kundt;
- il capitolo 5 è il capitolo in cui vengono mostrati e descritti i risultati delle misure e delle analisi statistiche condotte su di essi;
- il capitolo 6 riguarda lo studio della diffrazione per effetto di bordo e la possibilità di ricavare un fattore di correzione per i coefficienti di assorbimento calcolati;
- conclusioni.

---

<sup>1</sup> Questo lavoro è stato svolto in collaborazione con l'INRiM (Istituto Nazionale Ricerca Metrologica), che ha fornito i materiali e messo a disposizione i dati relativi ad essi.

# 1 Materiali fonoassorbenti

I materiali fonoassorbenti sono utilizzati per controllare il livello di pressione sonora degli ambienti, modificando il tempo di riverberazione.

Quando l'onda acustica incontra un materiale assorbente, parte dell'energia viene riflessa e parte viene assorbita [1], secondo la relazione

$$E_{incidente} = E_{riflessa} + E_{assorbita} \quad (1.1)$$

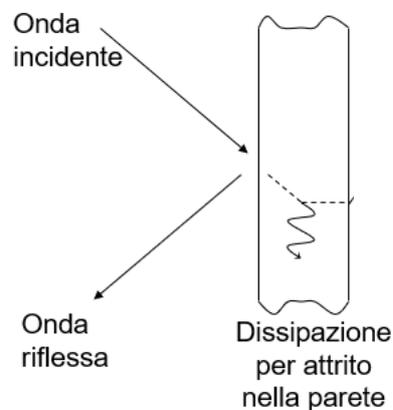


Figura 1: Ripartizione dell'energia sonora

Il parametro fondamentale che definisce la qualità dei materiali fonoassorbenti è il coefficiente di assorbimento acustico, detto  $\alpha$ . Si tratta del rapporto tra l'energia sonora assorbita dalla superficie e l'energia incidente.

Il coefficiente di assorbimento acustico è una grandezza adimensionale che va da 0 a 1, che rappresentano rispettivamente superfici non assorbenti e superfici totalmente assorbenti.

Valori maggiori di 1, sebbene teoricamente impossibili, si trovano spesso, di solito a causa di effetti di diffrazione sui bordi del campione.

Le caratteristiche fonoassorbenti dei materiali acustici variano in modo significativo con l'angolo di incidenza dell'onda acustica e con la frequenza: i suoni a bassa frequenza, inferiori a 500 Hz, tendono ad essere più difficili da assorbire mentre i suoni ad alta frequenza sono più facilmente gestibili.

## 1.1 Classificazione dei materiali

I materiali fonoassorbenti possono essere suddivisi in tre categorie principali in base al meccanismo con cui l'energia viene dissipata: materiali porosi, pannelli vibranti, pannelli forati [2]. Ad ognuna di queste categorie corrisponde un diverso range di frequenze assorbite, come mostrato nella Figura 2.

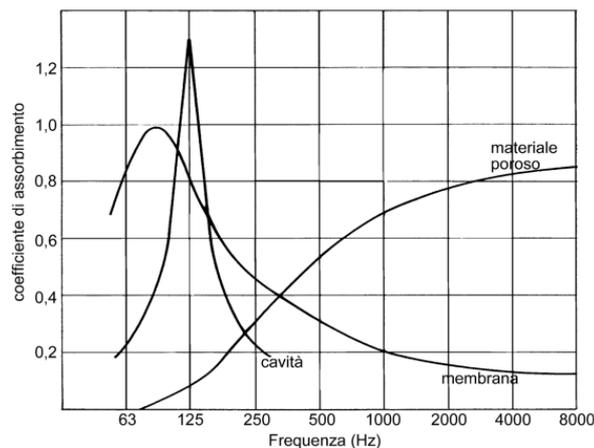


Figura 2: Andamento in frequenza di  $\alpha$  per differenti materiali fonoassorbenti [2]

### 1.1.1 Materiali porosi, assorbimento per porosità

Nei materiali porosi l'assorbimento acustico è dovuto alla perdita di energia per attrito viscoso: la struttura porosa di questi materiali permette la dissipazione dell'onda sonora per frizione all'interno delle microcavità [2]. Per consentire questo passaggio dell'onda devono esserci percorsi interconnessi tra i pori, per questo si parla di struttura a celle aperte[2].

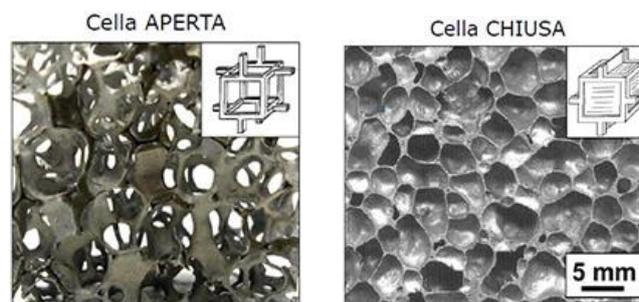


Figura 3: Cella aperta e cella chiusa, microscopio [2]

I pori all'interno di queste strutture a cella aperta possono essere "passanti", cioè aperti da entrambe le estremità o "ciechi".

L'assorbimento per porosità risulta elevato alle frequenze medie e medio-alte, mentre per le basse frequenze è necessario l'utilizzo di uno spessore elevato del materiale.

I materiali porosi fonoassorbenti prendono convenzionalmente tre forme [3]:

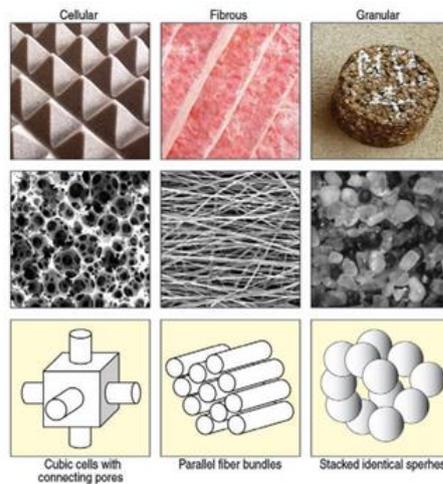


Figura 4: Le tre tipologie principali di materiali porosi [3]

- Materiali a struttura cellulare

- Espansi a cella aperta di origine minerale (vetro cellulare, argilla espansa)
- Resine espansi a cella aperta (poliuretano espanso, ecc.)



Figura 6: Materiale a cella aperta di origine minerale [2a]



Figura 5: Materiale in resina espansa [1a]

- Materiali fibrosi, in questi materiali al processo di dissipazione per attrito nei pori si aggiunge una dissipazione dovuta alla vibrazione meccanica delle fibre stesse.
  - Fibre minerali (lana di vetro, lana di roccia)
  - Fibre vegetali (legno mineralizzato, sughero, lino)
  - Fibre sintetiche (poliestere)



Figura 7: Materiale in fibra minerale [3a]



Figura 8: Materiale in fibra vegetale [4a]

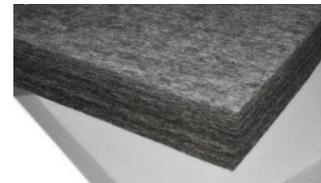


Figura 9: Materiale in fibra sintetica [5a]

- Materiali a struttura granulare



Figura 10: Materiale a struttura granulare [6a]

Il materiale poroso, affinché sia assorbente, deve permettere all'onda sonora di entrare con facilità nella sua struttura, è quindi necessario avere un'alta concentrazione di pori (porosità) e bassa resistenza al flusso d'aria. Ulteriori approfondimenti su questi due parametri verranno discussi nei paragrafi successivi. Deve inoltre generare attrito interno in grado di disperdere energia sonora, in questo caso, al contrario, è necessario aumentare la resistenza al flusso d'aria. Una soluzione, per ovviare a questa tendenza opposta, è quella di aumentare la porosità lasciando bassa la resistenza al flusso; questa tecnica costringe però a utilizzare spessori notevoli di materiale.

Uno spessore maggiore dei materiali ha impatto sulle sue qualità fonoassorbenti [1], come mostrato nel grafico in Figura 11.

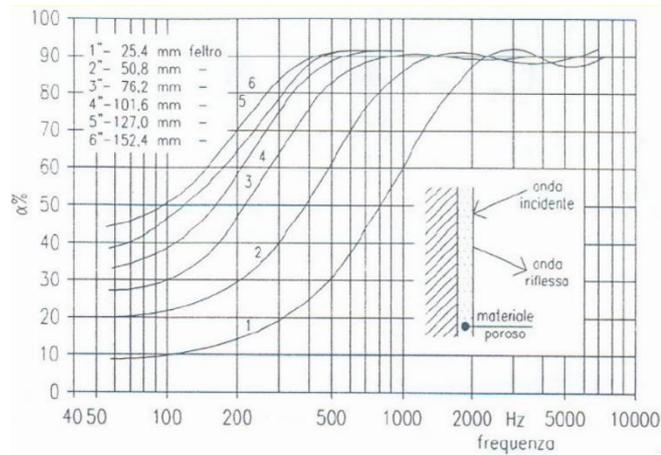


Figura 11: Andamento dell'assorbimento per porosità in relazione allo spessore [2]

L'entità dell'assorbimento dipende anche dall'installazione del materiale e dal trattamento superficiale. Ad esempio, si può compensare lo spessore con uno spazio d'aria dietro al pannello o un controsoffitto acustico per migliorare le prestazioni a frequenze più basse: sulla superficie solida i moti e la pressione sonora sono sempre nulli, mentre i massimi di pressione e di velocità si hanno alla distanza  $\lambda/4$  e a multipli di essa [1].

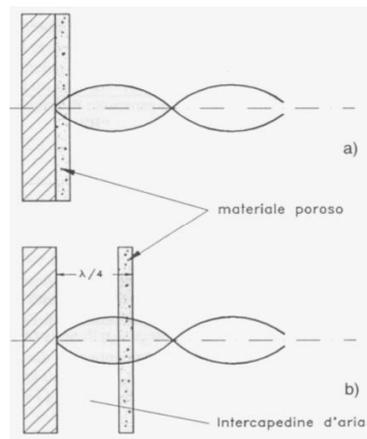


Figura 12: Esempio di installazione con intercapedine d'aria [1]

Lo svantaggio di questi materiali è che spesso non sono considerati esteticamente piacevoli e non sono resistenti all'usura. È quindi normale coprire questi materiali con una finitura acusticamente trasparente come un tessuto o con materiali perforati

come legno, metallo, cartongesso e così via. Vanno evitate coperture ermetiche, come ad esempio uno strato di vernice, che porterebbero ad una riduzione della qualità di assorbimento del suono.

### 1.1.2 Pannelli forati, assorbimento per risonanza in cavità

I pannelli forati, o assorbitori di risonanza, sono costituiti da un sistema di oscillazione meccanica o acustica. L'energia sonora viene dissipata tramite lo smorzamento dell'oscillazione di una massa di aria confinata all'interno della cavità [2].

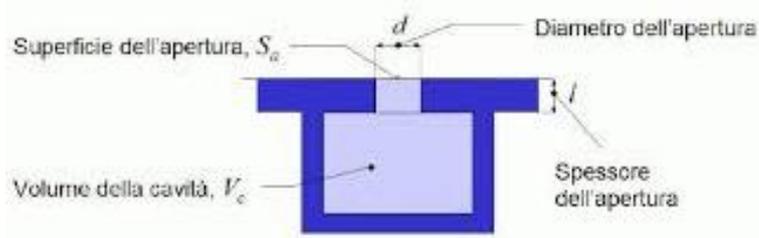


Figura 13: Risonatore a cavità [7a]

L'assorbimento raggiunge il suo massimo alla frequenza di risonanza [1]:

$$f_r = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S_a}{V_c \left( l + \frac{16d}{3\pi} \right)}} \quad (1.2)$$

La cavità può essere riempita con un materiale poroso, per aumentare l'assorbimento nell'intervallo di frequenza.

Un'evoluzione di questo risonatore sono i pannelli forati che assorbono un maggior numero di frequenze, detti risonatori multipli.

In questo caso la frequenza di risonanza è data da:

$$f_r = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{P\%}{h(l + 1,6d)}} \quad (1.3)$$

dove  $P\%$  è la percentuale di foratura del pannello,  $h$  è lo spessore dell'intercapedine di aria,  $d$  è il raggio dei fori [1]. È possibile ottenere un assorbimento su un range di frequenze più ampio utilizzando pannelli i cui fori hanno un diametro differente.

### 1.1.3 Pannelli Vibranti, assorbimento per risonanza di membrana

Questi materiali, detti anche pannelli risonanti, sono costituiti da lastre sottili (tipicamente in legno o gesso) fissate alla parete con una struttura di sostegno che le vincola intorno al perimetro, tra pannello e parete è presente un'intercapedine. L'energia sonora viene dissipata tramite lo smorzamento dell'oscillazione della superficie vibrante e tramite l'attrito viscoso nell'intercapedine [2].

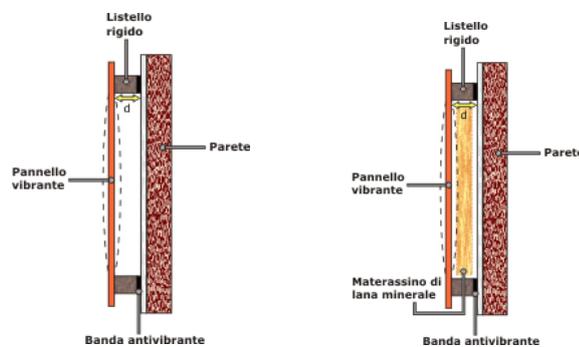


Figura 14: Schema di un pannello vibrante con e senza materiale poroso [8a]

La frequenza di risonanza del pannello si calcola con la seguente equazione [1]:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{MC}} \quad (1.4)$$

dove:

$M$  = massa del pannello (kg)

$C$  = cedevolezza del pannello (m/N)

$$f_r = \frac{60}{\sqrt{MsH}} \quad (1.5)$$

dove:

$Ms$  = massa per unità di superficie (kg/m<sup>2</sup>)

$H$  = spessore dell'intercapedine (m)

Date le dimensioni caratteristiche dei pannelli, dell'ordine del metro, le frequenze proprie di vibrazione del pannello si situano nella parte inferiore del campo dell'udibile: i pannelli vibranti sono efficaci nella correzione acustica alle basse frequenze.

## **1.2 Proprietà dei materiali porosi**

Questo lavoro di tesi consiste principalmente nella misurazione dell'assorbimento di pannelli di materiali porosi. Segue dunque un breve approfondimento sui parametri fondamentali che caratterizzano questi materiali.

Come anticipato all'inizio del capitolo, il parametro fondamentale è il coefficiente di assorbimento acustico, di cui si parlerà in maniera dettagliata nel capitolo successivo. Questo non è però l'unica caratteristica di cui tener conto quando si parla di materiali porosi.

I materiali porosi non sono facilmente descrivibili con modelli matematici poiché presentano forme geometriche complesse e con distribuzione statistica, per questo motivo vengono considerati come una "scatola nera" [2]. Il comportamento di un'onda acustica all'interno di un materiale poroso dipende dalle diverse proprietà microstrutturali del materiale, tra cui le più importanti: resistività al flusso, porosità, tortuosità.

### **1.2.1 Resistività al flusso $\sigma$ e Resistenza al flusso $\sigma_s$**

La resistenza al flusso è la misura di quanto facilmente l'aria entra in un materiale poroso e di qual è la resistenza che il flusso d'aria incontra all'interno della struttura. È il parametro più importante da cui dipende l'assorbimento ed è influenzato dalla porosità e dalla tortuosità.

Più è elevata tale grandezza, tanto maggiore sarà la quantità di energia sonora dissipata per attrito all'interno dei pori e trasformata in calore.

Il valore di resistenza al flusso deve essere compreso entro determinati limiti: se troppo basso le onde non vengono dissipate poiché non incontrano viscosità e quindi attrito, al contrario se risulta troppo elevato le onde sonore avranno difficoltà a penetrare nel materiale e, quindi, saranno in gran parte riflesse.

La resistenza al flusso è definita dalla formula [1]:

$$\sigma_s = \frac{\Delta P}{U} \quad (1.6)$$

dove  $\Delta P$  rappresenta la differenza di pressione da applicare alle due estremità del materiale ed  $U$  la velocità volumetrica del flusso d'aria generato ( m<sup>3</sup>/sec).

Nel caso di materiali omogenei, in cui la resistenza è proporzionale allo spessore  $d$  del materiale, si utilizza il valore di resistività, intesa come misura normalizzata della resistenza.

$$\sigma = \frac{\Delta P}{Ud} \quad (1.7)$$

### 1.2.2 Porosità

Questo parametro rappresenta la quantità di aria presente nel materiale: è il rapporto del volume totale di aria contenuta nei pori rispetto al volume totale del campione [1]. Valori tipici di materiali efficaci nell'assorbimento acustico sono tra 90 e 95%.

### 1.2.3 Tortuosità

È il parametro, adimensionale, che descrive la complessità del cammino dell'onda che si propaga all'interno del materiale e rappresenta quindi l'influenza della geometria della struttura sulla propagazione delle onde sonore [4]. È definita dal seguente rapporto:

$$T = \frac{\langle \lambda \rangle}{L} \quad (1.8)$$

dove  $\langle \lambda \rangle$  è la lunghezza media dei percorsi del fluido e  $L$  la lunghezza geometrica del campione [5].

## 2 Misure del coefficiente di assorbimento

In questo capitolo vengono descritte le metodologie utilizzate per caratterizzare un materiale fonoassorbente.

Le metodologie standardizzate utilizzate per il calcolo del coefficiente di assorbimento sono due: misure in camera riverberante e misure nel tubo di Kundt (o tubo di impedenza).

Questi due metodi differiscono per l'angolo di incidenza con cui le onde sonore colpiscono la superficie del materiale: nel tubo di impedenza, le onde arrivano alla superficie perpendicolarmente, mentre nella camera riverberante gli angoli di incidenza sono equamente distribuiti.

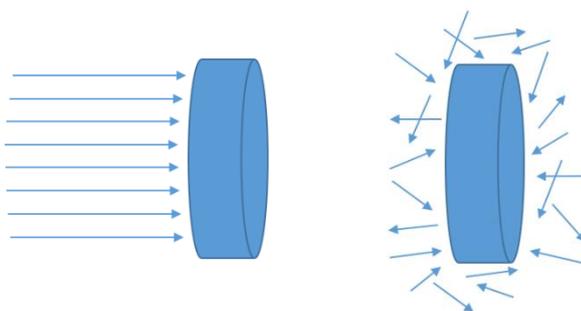


Figura 15: Incidenza normale ed incidenza casuale [9a]

I coefficienti di assorbimento ottenuti con i due metodi spesso differiscono in modo significativo.

Poiché i campi sonori incontrati nella maggior parte delle applicazioni sono molto più vicini a quelli della camera riverberante che all'incidenza perpendicolare del tubo, la camera fornisce coefficienti di assorbimento maggiormente significativi [2].

Un ulteriore metodo, meno usato poiché richiede campioni più grandi e spazi vasti, è quello delle misure in campo libero, ossia all'interno di camere anecoiche o semi-anecoiche. Questo rappresenta un'evoluzione del tubo di impedenza poiché permette di effettuare le misure con angoli di incidenza obliqui ed è utilizzato in particolare nel design e nella modellazione di materiali porosi.

## 2.1

### 2.1 Camera riverberante

Una camera riverberante è definita come una stanza in cui si ricrea un campo sonoro diffuso ed uniforme. Questo significa che le onde sonore si propagano in qualsiasi direzione ed in qualsiasi momento con uguale probabilità, quindi il campo sonoro è lo stesso ovunque [6].

Generalmente l'energia sonora in un ambiente chiuso crea onde stazionarie a determinate frequenze, cioè quando le lunghezze d'onda sono correlate alle dimensioni della camera, i cosiddetti modi acustici. Esistono tre tipi di modi: modi assiali, cioè onde che colpiscono due superfici opposte, modi tangenziali su quattro superfici e modi obliqui su sei superfici. Quando la camera è rettangolare, le frequenze di risonanza modale possono essere ottenute come:

$$f_{(x,y,z)} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{W}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{H}\right)^2} \quad (2.1)$$

Dove  $c$  è la velocità del suono [m / s] e  $f_{(x,y,z)}$  è la frequenza di risonanza naturale [Hz] dei modi  $n_x, n_y, n_z$ . La lunghezza, la larghezza e l'altezza [m] della stanza sono rappresentati rispettivamente da  $L, W$  e  $H$ .

Tra i principali fattori di errore nel coefficiente di assorbimento misurato in camera riverberante c'è proprio la perdita di diffusività del campo sonoro che si verifica a causa dei modi della stanza o introducendo all'interno della camera il materiale stesso, condizioni ancor più amplificate nel caso di camere riverberanti in scala, come vedremo in seguito.

Per ottenere un campo sonoro diffuso, quindi, è necessaria una distribuzione omogenea delle frequenze modali. Per fare ciò bisogna rispettare alcuni requisiti geometrici: le proporzioni della stanza devono essere tali che il rapporto tra due dimensioni non si avvicini molto a un numero intero ed è necessario evitare superfici parallele. Una proporzione consigliata è: 41/3:21/3:1 o 1,59: 1,26:1. [7]

Parametri fondamentali che caratterizzano una camera riverberante sono la frequenza di taglio (frequenza minima) e la frequenza di Schroeder.

La frequenza di taglio identifica la frequenza oltre la quale la camera, in base al suo volume, ha il potenziale per essere diffusa. Questo parametro è dato da:

$$f_{min} = \frac{c}{\left(\frac{V}{4}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (2.2)$$

con  $c$  = velocità del suono e  $V$  = volume della stanza.

La frequenza di Schroeder è la frequenza sopra la quale i modi iniziano a raggrupparsi e non sono più rappresentati come picchi risonanti, quindi rappresenta la frequenza oltre la quale il campo sonoro è considerato diffuso. Viene calcolata tramite l'equazione:

$$f_s = \frac{4c}{(\pi A)^{0.5}} - \frac{S_r}{16V} \quad (2.3)$$

dove  $A$  è l'assorbimento della stanza,  $S_r$  è la superficie totale della stanza.

L'equazione è equivalente a:

$$f_s \geq 2000 \left(\frac{T}{V}\right)^{0.5} \quad (2.4)$$

La frequenza  $f_s$  è superiore a  $f_{min}$ .

La procedura del calcolo dell'assorbimento consiste nel misurare i tempi di riverberazione nella camera, in funzione della frequenza, prima e dopo il posizionamento del campione da testare all'interno della stanza: il campione di prova aggiunge assorbimento alla stanza e quindi riduce il tempo di riverberazione.

### 2.1.1 Riverbero

Il riverbero è un parametro chiave quando si parla di acustica degli ambienti. Si tratta del decadimento del suono successivo allo spegnimento della sorgente e dovuto alle riflessioni del suono che continuano a "viaggiare" nell'ambiente.

L'energia sonora che incide su una superficie  $S$  si divide in tre componenti: una parte viene riflessa dalla superficie, una parte viene assorbita ed una parte trasmessa oltre il materiale.

Il campo sonoro risulta, infatti, costituito dalla sovrapposizione del campo diretto, dovuto alle onde sonore irradiate direttamente dalla sorgente, e del campo riverberato, prodotto dall'insieme dell'energia sonora riflessa.

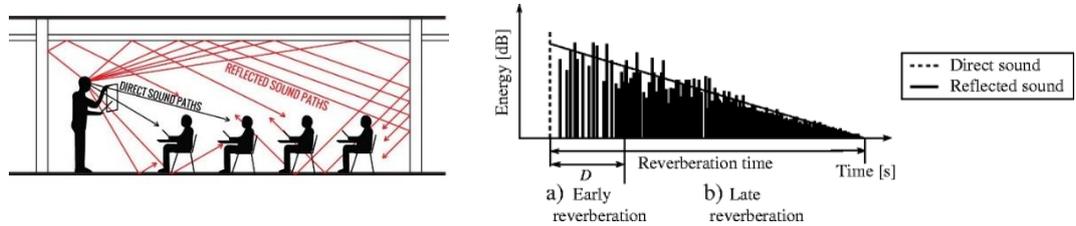


Figura 16: Riflessioni sonore [10a]

L'importanza della riverberazione, in acustica, sta nel fatto che questa influenza le qualità sonore di un ambiente e quindi il confort acustico: se da un lato il riverbero rappresenta una maggior ricchezza di sonorità ed energia acustica, condizione ricercata nelle sale da concerto, dall'altro significa maggiori riflessioni a coprire il suono diretto e quindi una perdita di intelligibilità, qualità da evitare se si tratta di stanze dedicate al parlato.

Ogni ambiente, a seconda della destinazione di utilizzo, ha un suo tempo di riverberazione ottimale [8].

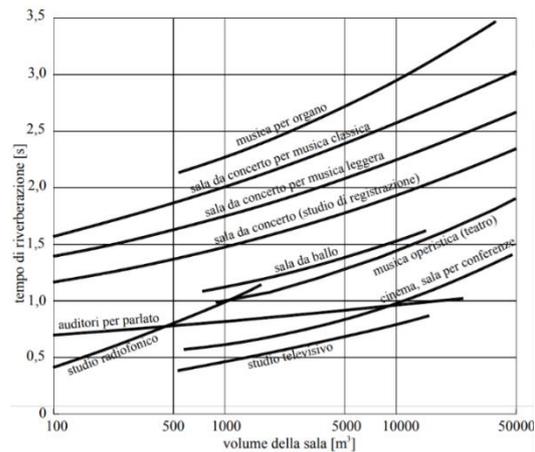


Figura 17: Tempo di riverberazione ottimale per banda di ottava a 500 Hz In funzione del volume e della destinazione d'uso del locale [8]

Il parametro legato al concetto di riverbero è il tempo di riverberazione, indicato con  $T_{60}$ . È definito come il tempo, a partire dallo spegnimento della sorgente sonora, impiegato dal suono per decrescere di intensità di 60 dB [1].

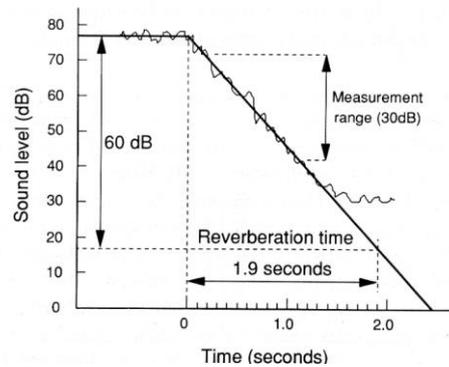


Figura 18: Decadimento della pressione sonora e  $T_{60}$  [11a]

Per questo motivo il  $T_{60}$  rappresenta un parametro chiave nelle misure di assorbimento: un materiale assorbente inserito all'interno di un ambiente farà variare il riverbero dissipando parte dell'energia.

Solitamente è difficile ottenere un segnale che superi di 60 dB il rumore di fondo: per questo, nella misura del tempo di riverbero, si calcolano gli equivalenti  $T_{30}$ , ovvero il doppio del tempo che il suono impiega per andare da -5 a -35 dB,  $T_{20}$  e  $T_{15}$ . L'esclusione dei primi 5 dB di decadimento serve ad evitare il suono diretto.

Il fisico statunitense Sabine fu il primo a derivare la relazione che lega il  $T_{60}$  alle caratteristiche dell'ambiente ed in particolare alla quantità di assorbimento presente:

$$T_{60} = 0,16 \frac{V}{(A + 4mV)} \quad (2.5)$$

dove  $V$  è il volume dell'ambiente in  $m^3$ ,  $m$  è il coefficiente di attenuazione dell'aria (approfondimento nel paragrafo 2.1.2) ed  $A$  è l'assorbimento globale dell'ambiente, calcolato come:

$$A = \sum_{i=1}^N \alpha_i S_i \quad (2.6)$$

con  $\alpha_i$  coefficiente di assorbimento medio della  $i$ -esima superficie di materiale che delimita l'ambiente e  $S_i$  la relativa superficie in  $m^2$ .

## 2.1.2 Calcolo di $\alpha_s$ in camera riverberante

Le misure di assorbimento in camera riverberante sono regolate dalle normative ASTM-C423 (American Society for Testing and Materials) e ISO-354 (International Organization for Standardization). Entrambe raccomandano un volume della camera di almeno 200 m<sup>3</sup> ed una dimensione del campione di prova rispettivamente di 5,5-6,7 m<sup>2</sup> (ASTM-C423) e 10-12 m<sup>2</sup> (ISO-354).

Le due metodologie sono molto simili, in questo lavoro è stata seguita la ISO-354: 2003 [9].



Figura 19: Esempio di camera riverberante 1:1 (Laboratorio di acustica - INRiM)

Le misure vanno effettuate in bande in terzi d'ottava, come specificato nella ISO 266 [10], centrate a 100 - 125 - 160 - 200 - 250 - 315 - 400 - 500 - 630 - 800 - 1000 - 1250 - 1600 - 2000 - 2500 - 3150 - 4000 - 5000.

Il numero di misure spazialmente indipendenti deve essere almeno pari a 12. Il numero minimo di posizioni microfoniche è tre, il numero minimo di posizioni della sorgente sonora è due.

Per calcolare il tempo di riverberazione è necessaria la risposta all'impulso del sistema. Si considera la camera come un sistema lineare tempo invariante (LTI): la

risposta all'impulso è l'output del sistema quando in ingresso vi è la funzione impulsiva, o delta di Dirac.

$$h(t) = T[\delta(t)] \quad (2.7)$$

dove  $T\{\cdot\}$  è trasformazione ingresso-uscita.

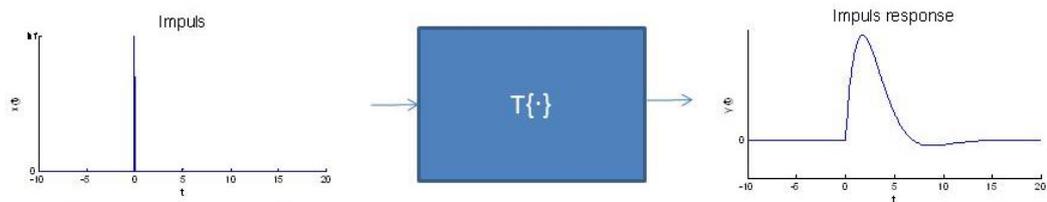


Figura 20: Risposta all'impulso in un sistema LTI [12a]

Teoricamente bisognerebbe sollecitare il sistema con un segnale impulsivo  $\delta$  e ricavarne così la risposta all'impulso, esempi di segnali impulsivi utilizzati sono il colpo di pistola o il clap. In realtà questo metodo non è facilmente realizzabile perché è impossibile produrre un impulso sonoro brevissimo e di elevata potenza.

Un'alternativa molto utilizzata è quella di ricavare la risposta all'impulso  $h$  dalla deconvoluzione del segnale  $y$  in uscita dal sistema con l'inverso del segnale  $x$  in entrata, per questo metodo si scelgono particolari segnali input che diano energia su tutte le frequenze: l'MLS (Maximum Length Sequence, sequenza apparentemente casuale ma in realtà nota a priori e periodica) o la Sweep (un segnale composto da un tono puro la cui frequenza aumenta nel tempo in modo lineare o esponenziale), quest'ultima consente di ottenere una misura con uno spettro piatto, un ottimo rapporto segnale-rumore a tutte le frequenze e privo di prodotti di distorsione.

Il legame tra la risposta all'impulso e il tempo di riverberazione è stato studiato da Schroeder, che ha ricostruito attraverso un integrale della risposta all'impulso la curva di decadimento del tempo di riverberazione.

Come mostrato nella Figura 21, dalle registrazioni si ottiene una curva (rossa) che ha tendenza positiva e negativa e che rappresenta in dB la forma d'onda della risposta all'impulso, sulla quale non si può calcolare il tempo di riverbero.

La risposta all'impulso registrata va, infatti, filtrata in bande di un terzo di ottava, poi integrata all'indietro per ottenere i tempi di riverberazione alle varie frequenze escludendo il livello di rumore di fondo.

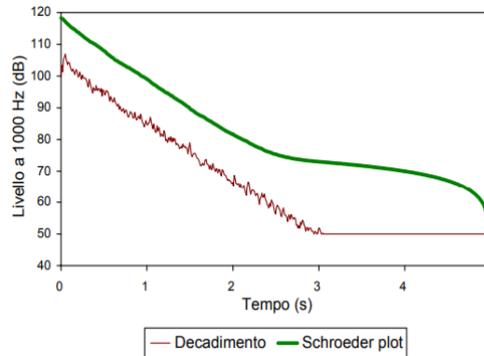


Figura 21: Curva di decadimento da rumore e integrale di Schroeder [13a]

In questo modo si calcolano il tempo di riverberazione medio della stanza vuota,  $T_1$ , e il tempo di riverberazione medio della stanza con il campione posto all'interno,  $T_2$ . Dai valori dei tempi di riverberazione è possibile calcolare, tramite la formula di Sabine (Equazione 2.5), l'area equivalente di assorbimento acustico della stanza, questo valore rappresenta l'ipotetica area di una superficie totalmente assorbente senza effetti di diffrazione che, se fosse l'unico elemento assorbente nella stanza, darebbe lo stesso tempo di riverbero della stanza in esame. Per la camera riverberante vuota, questa quantità è indicata con  $A_1$ , per la camera riverberante contenente il campione, è indicata con  $A_2$  [9].

Le formule per il calcolo di  $A_1$  e  $A_2$  sono:

$$A_1 = \frac{55.3 V}{cT_1} - 4Vm_1 \quad (2.8)$$

$$A_2 = \frac{55.3 V}{cT_2} - 4Vm_2 \quad (2.9)$$

dove  $c$  è la velocità di propagazione del suono nell'aria, in un range di temperature tra 15 °C e 30 °C, e può essere calcolato come:

$$c = (331 + 0,6t / ^\circ\text{C}) \text{ [m/s]}$$

con  $t$ =temperatura in gradi Celsius;

$m$  è il coefficiente di attenuazione dell'aria, calcolato secondo ISO 9613-1 utilizzando le condizioni climatiche che sono state presenti nella stanza durante la misurazione [11].

Il valore di  $m$  si ricava dal coefficiente di attenuazione,  $\alpha_A$  secondo la formula:

$$m = \frac{\alpha_A}{10 \log(e)} \quad (2.10)$$

Il coefficiente di attenuazione è il valore che indica come un'onda sonora viene assorbita dall'aria, è funzione della pressione atmosferica, dell'umidità relativa e della temperatura, varia inoltre in base alla frequenza dell'onda. Le variazioni di queste condizioni atmosferiche nel corso di una misurazione possono avere un grande effetto sul tempo di riverbero misurato, specialmente alle alte frequenze, come mostrato in Figura 22, in cui vengono confrontate le curve relative ai coefficienti di assorbimento misurati per diverse condizioni dell'ambiente (Umidità relativa tra 42% e 86% e Temperatura tra i 5,1°C e 7,3°C) [12].

$$\alpha_A = 8.686 f^2 \left( \left[ 1.84 * 10^{-11} \left( \frac{p_a}{p_r} \right)^{-1} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-\frac{5}{2}} \left\{ 0.01275 \left[ \exp \left( \frac{-2239.1}{T} \right) \right] \left[ f_{r0} + \left( \frac{f^2}{f_{r0}} \right) \right]^{-1} + \right. \right. \\ \left. \left. 0.0168 \left[ \exp \left( \frac{-3352}{T} \right) \right] \left[ f_{rN} + \left( \frac{f^2}{f_{rN}} \right) \right]^{-1} \right\} \right) \quad [\text{dB/m}] \quad (2.11)$$

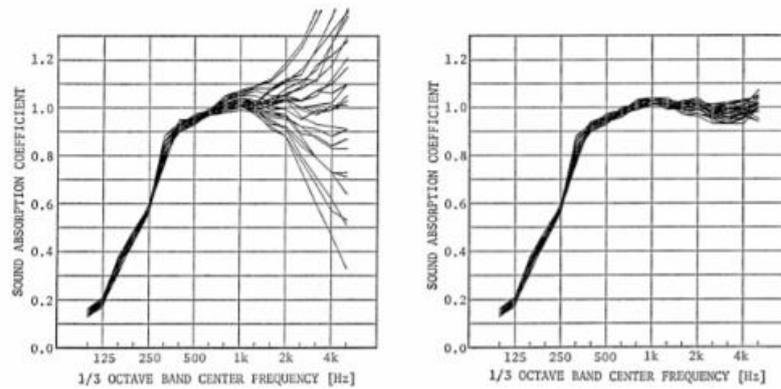


Figura 22: Coefficienti di assorbimento calcolati senza tener conto delle condizioni atmosferiche (sinistra) e con la correzione delle condizioni atmosferiche (destra) [12]

Le misurazioni devono essere eseguite in condizioni di temperatura e umidità relativa simili, in modo che le correzioni dovute all'assorbimento d'aria non differiscano in modo significativo. In ogni caso, l'umidità relativa nella stanza deve essere compresa tra 30% e 90% e la temperatura deve essere di almeno 15 °C.

L'area equivalente di assorbimento sonoro del campione,  $A_T$ , in metri quadrati, si calcola come differenza tra l'area equivalente di assorbimento acustico della stanza con il campione e l'area equivalente di assorbimento acustico della stanza vuota:

$$A_T = A_2 - A_1 = 55.3V \left( \frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4V(m_2 - m_1) \quad (2.12)$$

Dal valore di  $A_T$  è possibile ricavare il coefficiente di assorbimento del campione, dividendolo per la sua superficie:

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad (2.13)$$

### 2.1.3 Ripetibilità e riproducibilità delle misure in camera riverberante

La variabilità tra i risultati delle misure può essere espressa in termini di due concetti statistici: ripetibilità e riproducibilità.

La ripetibilità si riferisce alle variazioni di misura all'interno dello stesso laboratorio con lo stesso operatore, attrezzatura di misurazione e a ambiente ragionevolmente costante (temperatura, umidità, pressione) [9].

La ripetibilità è espressa, nella ISO-354, in termini di deviazione standard relativa del tempo di riverberazione nelle 12 misure effettuate:

$$\frac{\varepsilon(T)}{T} = \sqrt{\frac{2.42 + \frac{3.59}{N}}{fT}} \quad (2.14)$$

con  $T$ =tempo di riverberazione misurato,  $f$ =centro della banda a un terzo di ottava,  $N$ =numero di curve di decadimento valutate (12).

La riproducibilità è una misura della variazione da laboratorio a laboratorio: l'operatore, le apparecchiature e l'ambiente di test possono differire e contribuire alla variabilità dei risultati del test [13]. La riproducibilità viene valutata tramite test round robin, nel quale vengono confrontati i valori del coefficiente di assorbimento acustico di un campione misurati in diversi laboratori.

In questo momento le differenze dei risultati tra i laboratori sono molto più alte di quelle che possono essere accettate, per questo motivo la riproducibilità è sotto investigazione e non viene riportata nella normativa, attualmente è in atto uno studio round robin per cercare di ridurre questo divario e comprenderne le cause principali. La ragione principale è la mancanza di un campo perfettamente diffuso nella camera riverberante. Si può pensare al campo sonoro costituito da un campo sonoro orizzontale e un campo sonoro verticale. Per campioni ad assorbimento elevato il campo verticale sarà fortemente smorzato dalla presenza del campione stesso posto sul pavimento e dei diffusori posti sul soffitto, mentre il campo sonoro orizzontale è

molto meno influenzato dall'assorbimento. Se il campo sonoro orizzontale domina, l'assorbimento sarà sottostimato. Con la diffusione a muro è possibile reindirizzare il campo sonoro orizzontale nel campo sonoro verticale e quindi aumentare l'assorbimento [14]. Nella normativa in via di sviluppo verrà, probabilmente, introdotto un fattore di correzione, calcolato in ogni laboratorio tramite test su un materiale standard di riferimento. In questo modo si cercherà di ridurre il divario tra le misure effettuate nelle diverse camere riverberanti, raggiungendo dei valori di incertezza (intesa come riproducibilità) più bassi.

Per calcolare le incertezze dovute alla riproducibilità si utilizza la ISO-12999 [15]. La normativa permette di definire il valore dell'incertezza espansa  $U$  come:

$$U = k(m \alpha + n) \quad (2.15)$$

dove  $k$  è il fattore di copertura, cioè il valore di correzione da scegliere in base al confidence-level che si tiene in considerazione. Ad esempio, se si sceglie un confidence-level del 95%, si utilizza un valore di  $k=2$ ;

$\alpha$  è il coefficiente di assorbimento acustico calcolato secondo la ISO-354;

$m$  ed  $n$  sono costanti numeriche dipendenti dalla frequenza [15].

## 2.2 Tubo di Kundt o di impedenza

Il metodo del tubo di Kundt richiede campioni di piccole dimensioni, ma le onde arrivano alla superficie del campione perpendicolarmente. Questo metodo permette di ricavare sia il coefficiente di assorbimento ad incidenza normale che l'impedenza della superficie testata, utilizzata per caratterizzare la propagazione all'interno del materiale assorbente rendendo possibile la modellazione teorica. Ha inoltre il vantaggio di produrre risultati più precisi e meno variabili rispetto al metodo della camera riverberante [16].

Il tubo di Kundt è costituito da un tubo chiuso alle cui estremità sono fissati, da un lato, il campione del materiale da testare, dall'altro un altoparlante.

Il metodo è descritto e standardizzato dalla normativa ISO-10534, consiste nel generare un'onda piana e misurare la pressione sonora nei punti in cui sono posizionati i microfoni.

L'onda diretta e l'onda riflessa, che viaggiano in direzione opposta, si sommano vettorialmente trovandosi in fase in alcuni punti e in opposizione di fase in altri, generando così un'onda stazionaria. Nel caso di assenza del campione fonoassorbente, e quindi in una situazione ideale di riflessione totale, tanta energia va' quanta ne torna.

In presenza del campione, questo assorbirà una parte dell'energia incidente: l'impedenza del campione altera il modo in cui il suono viene riflesso e, misurando l'onda stazionaria risultante, è possibile calcolare il coefficiente di assorbimento (ad incidenza normale).

Un dettaglio fondamentale è che il campione sia perfettamente tagliato ed inserito nel tubo e che gli spazi vuoti intorno al bordo siano riempiti e sigillati, altrimenti consentiranno l'assorbimento dal bordo del campione dando un risultato più alto. Inoltre, i materiali porosi testati non vanno compressi per facilitare l'inserimento nel tubo poiché questo cambierebbe la meccanica del materiale e porterebbe a misurazioni errate [17].

Affinché non si generino modi all'interno, e quindi onde non-piane, la massima frequenza che può essere misurata nel tubo è

$$f_u = \frac{c}{2d} \quad (2.16)$$

dove  $c$  è la velocità del suono e  $d$  è il diametro del tubo.

Il tubo deve essere abbastanza lungo da permettere lo sviluppo dell'onda piana tra la sorgente ed il campione.

La sorgente genera dei modi oltre all'onda, questi si estinguono in una distanza di circa tre volte il diametro del tubo. Per questo è consigliato scegliere le posizioni microfoniche oltre questo punto.

Supponendo che le onde nel tubo siano piane, si può considerare il campione come un piano assorbente infinito, in questo caso la pressione nel tubo è data da:

$$p = A(e^{jkz} + Re^{-jkz}) \quad (2.17)$$

dove  $R$  è il coefficiente di riflessione,  $k$  è il numero d'onda,  $A$  è una costante complessa e  $z$  la posizione del campione. Si assume il campione a  $z=0$ , ciò si sceglie l'origine del sistema di riferimento nell'estremità in cui è posizionato il campione. Il primo termine dell'equazione rappresenta l'onda incidente, il secondo quella riflessa. Per il calcolo dell'assorbimento tramite il tubo d'impedenza esistono due approcci standard: il metodo delle onde stazionarie ed il metodo della funzione di trasferimento.

### 2.2.1 Metodo delle onde stazionarie

Per il metodo delle onde stazionarie [18], si valutano i valori di pressione massima, che si verifica quando il primo e il secondo termine dell'equazione 2.17 sono in fase, e pressione minima, quando sono completamente fuori fase.

$$\begin{aligned} p_{max} &= 1 + |R| \\ p_{min} &= 1 - |R| \end{aligned} \quad (2.18)$$

Per misurare la pressione massima e minima, si utilizza un microfono sonda montato su un carrello mobile. Le misure vengono ripetute per ogni banda di frequenza.

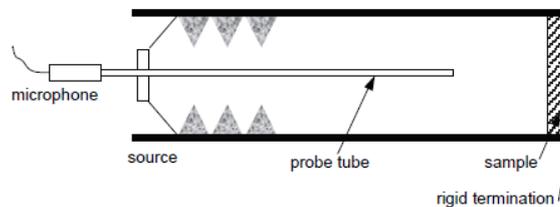


Figura 23: Tubo di Kundt per la misura con le onde stazionarie [18]

Si definisce il Rapporto d'onda stazionaria,  $s$ , come:

$$s = \frac{p_{max}}{p_{min}} = \frac{1 + |R|}{1 - |R|} \quad (2.19)$$

Dall'equazione 2.19 si risale, quindi, al valore di magnitudine del coefficiente di riflessione:

$$|R| = \frac{s - 1}{s + 1} \quad (2.20)$$

Da qui si ricava il coefficiente di assorbimento come:

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (2.21)$$

## 2.2.2 Metodo della funzione di trasferimento

Questa tecnica si basa sull'utilizzo di due microfoni posti ad una distanza  $z_1$  e  $z_2$  [19]. Misurando la pressione nei due punti è possibile ricavare la funzione di trasferimento.

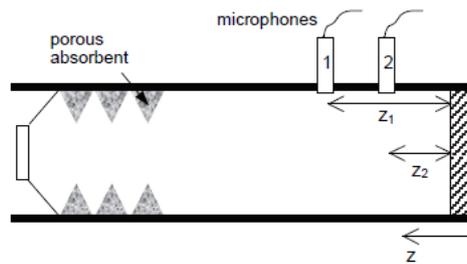


Figura 24: Tubo di Kundt per la misura con la funzione di trasferimento [19]

Il vantaggio principale di questo approccio rispetto al precedente è che si ottiene il coefficiente di assorbimento per tutte le frequenze in un'unica misura.

La funzione di trasferimento tra i due microfoni è calcolata come:

$$H_{1,2} = \frac{p_{z_1}}{p_{z_2}} \quad (2.22)$$

dove  $p_{z_1}$  e  $p_{z_2}$  sono le pressioni alle posizioni microfoniche  $z_1$  e  $z_2$ .

Dall'equazione 2.17 si ricava

$$H_{1,2} = \frac{e^{jkz_2} + R e^{-jkz_2}}{e^{jkz_1} + R e^{-jkz_1}} \quad (2.23)$$

E quindi

$$R = \frac{H_{1,2} e^{jkz_1} - e^{jkz_2}}{e^{-jkz_2} - H_{1,2} e^{-jkz_1}} \quad (2.24)$$

Dal coefficiente di riflessione si ottiene il coefficiente di assorbimento (equazione 2.21).

Per evitare eventuali disallineamenti dei due microfoni va effettuata una calibrazione o, in alternativa, la misura va ripetuta switchando la posizione dei due microfoni e ricavando dalle due funzioni di trasferimento la funzione di trasferimento corretta  $H_{1,2}$  [1].

Nell'utilizzo di questa metodologia vanno valutate le posizioni microfoniche.

Dalla distanza tra i microfoni deriva il valore di frequenza minima misurabile:

$$f_l > \frac{c}{20|z_1 - z_2|} \quad (2.25)$$

Posizioni troppo distanti, invece, se comparabili con la lunghezza d'onda, porterebbero ad una variazione di pressione tra i due microfoni nulla. Dalla distanza  $|z_1 - z_2|$  deriva, quindi, una frequenza massima misurabile:

$$f_u < \frac{0.45 c}{|z_1 - z_2|} \quad (2.26)$$

Tra la frequenza dell'equazione 2.26 e quella della 2.16 si sceglie la più bassa.

Esistono diversi modelli numerici che permettono di convertire i coefficienti di assorbimento misurati nel tubo, cioè ad incidenza normale, in coefficienti ad incidenza diffusa.

In questo studio è stato utilizzato il modello Spagnolo-Benedetto per correggere i valori di  $\alpha$  misurati nel tubo [20].

## 2.3 Camere riverberanti in scala

Le camere riverberanti in scala riscuotono sempre maggior interesse negli ultimi anni. L'esigenza di questo metodo nella misurazione del coefficiente di assorbimento nasce

per diversi motivi: il principale vantaggio è quello di poter analizzare campioni di dimensioni molto minori rispetto ai  $10 \text{ m}^2$  richiesti dalle normative delle camere reali ( $V > 200 \text{ m}^3$ ), senza perdere però la caratteristica dell'incidenza diffusa del metodo. In particolare, le camere in scala sono sempre più utilizzate nel settore automobilistico.

Tipiche parti del veicolo di interesse sono i sedili, i rivestimenti, i tappeti. Le dimensioni di queste parti sono, nella maggior parte dei casi, significativamente più piccoli di  $10 \text{ m}^2$ . In alcuni casi, è persino difficile procurarsi campioni di materiale piatto con l'area raccomandata dallo standard. Inoltre, le frequenze considerate nell'assorbimento per l'industria automobilistica sono spesso differenti da quelle specifiche della normativa: considerando che l'intervallo di frequenze per il calcolo dei coefficienti di assorbimento è da 100 Hz a 5 kHz e che i materiali di assorbimento utilizzati normalmente nei veicoli hanno poco assorbimento alle basse frequenze, ma sono più efficaci alle alte frequenze, è utile valutare un diverso intervallo di frequenze, condizione che viene incontro alle esigenze di una camera riverberante di dimensioni ridotte, in cui la frequenza minima misurabile è maggiore (equazione 2.2). Questi fattori, insieme al costo elevato dei test in camera riverberante, hanno portato varie aziende del settore a considerare la realizzazione e l'uso di camere riverberanti in scala.

### **2.3.1 Svantaggi delle camere riverberanti in scala**

Due difficoltà principali appaiono quando si trattano camere riverberanti di piccole dimensioni: la mancanza di diffusività del campo acustico, specialmente nelle frequenze medio-basse, e la diffrazione dovuta alla dimensione finita del materiale testato (effetti di bordo) [21].

In primo luogo, con un volume ridotto si abbassa il tempo di riverberazione massimo (equazione 2.5), mentre la frequenza di Schroeder, che limita l'inizio del campo diffuso, aumenta (equazione 2.4). Le misure di assorbimento della camera in scala, basate sulla legge di Sabine, che suppone una perfetta diffusività, possono considerarsi valide da 400Hz a 10000 Hz [21].

Una possibile correzione agli errori generati dall'uso della formula di Sabine (equazione 2.5) può essere apportata dall'utilizzo della formula di Eyring per il calcolo del tempo di riverberazione:

$$T_{60} = -0,16 \frac{V}{4mV + S_{tot} \log_n(1 - \alpha_m)} \quad (2.27)$$

dove  $V$  è il volume dell'ambiente in  $m^3$ ,  $m$  è il coefficiente di attenuazione dell'aria con  $\alpha_m$  coefficiente di assorbimento medio della superficie di materiale che delimita l'ambiente e  $S_{tot}$  la superficie totale dell'ambiente in  $m^2$ .

La formula di Sabine è utilizzata da anni in tutti gli standard, ma rappresenta un'approssimazione della formula di Eyring: quest'ultima assume una lunghezza del cammino libero medio costante e un decadimento energetico graduale, cioè tutte le particelle sonore perdono una parte della loro energia allo stesso tempo, Sabine assume solo un valore di energia [22].

In secondo luogo, il problema dell'effetto diffrazione dovuto alla dimensione finita dei campioni diventa particolarmente critica per le piccole dimensioni [21]. È stato dimostrato che il rapporto tra il perimetro e la superficie del campione ( $E$ ) deve essere basso per minimizzare questi effetti. Nel caso delle camere riverberanti di grandi dimensioni, che seguono la ISO-354,  $E$  ha un valore di circa  $1.2 m^{-1}$ , mentre per le camere riverberanti di piccole dimensioni  $E$  assume valori molto più alti.

### **2.3.2 Esempi di camere riverberanti in scala**

Le camere riverberanti in scala sono una realtà sempre più consolidata: ne esistono di diversi tipi e diversi studi sono stati condotti per realizzarle.

Sono state realizzate camere di diverse dimensioni, dai  $6 m^3$  di volume fino a  $1 m^3$ . Di seguito se ne riportano alcune di particolare interesse.

### 2.3.2.1 Alpha Cabin

Tra i modelli più diffusi c'è quello dell'Alpha Cabin, si tratta di una riproduzione in scala 1:3 (riduzione del volume 1:27) della camera riverberante presso il Swiss Federal Laboratory of Material Testing and Research Institute, a Dübendorf. Il volume dell'Alpha Cabin è di circa 6,5 m<sup>3</sup> e non vi sono superfici parallele [23].

Overall dimensions:	3.22 x 2.37 x 2.03 m (L x W x H)
Volume:	6.44 m <sup>3</sup>
Sample surface area:	1.2 m <sup>2</sup>
Frequency range:	400 - 10'000 Hz
Standards:	Based on ISO 354:2003

Figura 25: Specifiche tecniche dell'Alpha Cabin [16a]

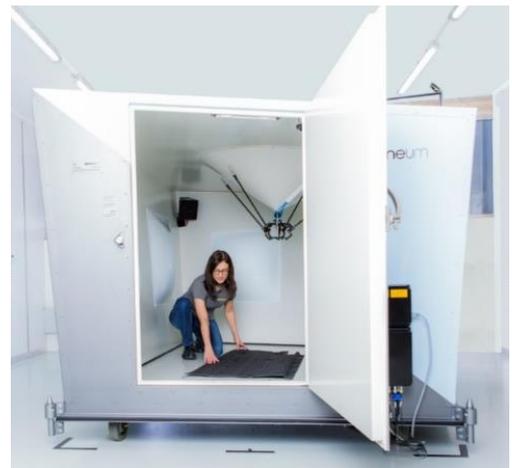
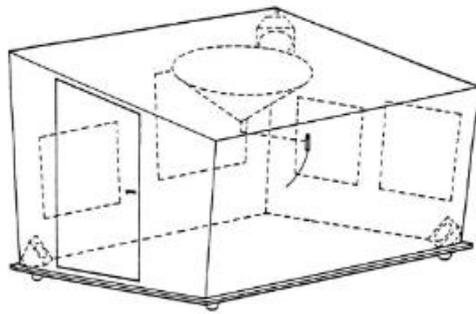


Figura 26: Alpha Cabin [16a]

Il campo sonoro all'interno è simile a quello della camera riverberante di riferimento, ma per lunghezze d'onda tre volte più corte. L'intervallo di frequenza utilizzabile viene quindi spostato più in alto.

Esistono numerose camere di questa tipologia sviluppate da diverse aziende, ma tutte seguono lo stesso modello.

Con un tempo di riverberazione massimo  $T=2,5$  s e un volume  $V=6,44$  m<sup>3</sup>, la frequenza di Schroeder che limita l'inizio del campo diffuso  $f_s=2000 \sqrt{\frac{T}{V}} = 1246$  Hz [21].

Nelle figure di seguito sono riportati alcuni confronti dei coefficienti di assorbimento calcolati nell'Alpha Cabin e nella camera 1:1.

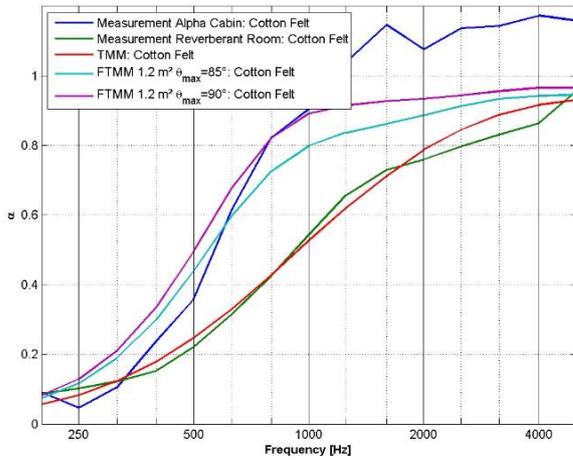


Figura 27: Coefficienti di assorbimento Cotone 20 mm [21]

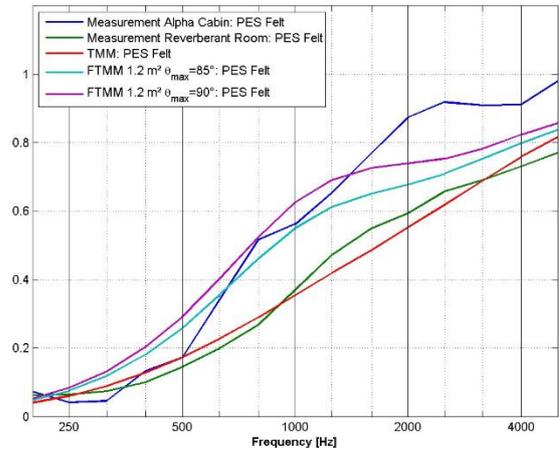


Figura 28: Coefficienti di assorbimento Poliestere 13 mm [21]

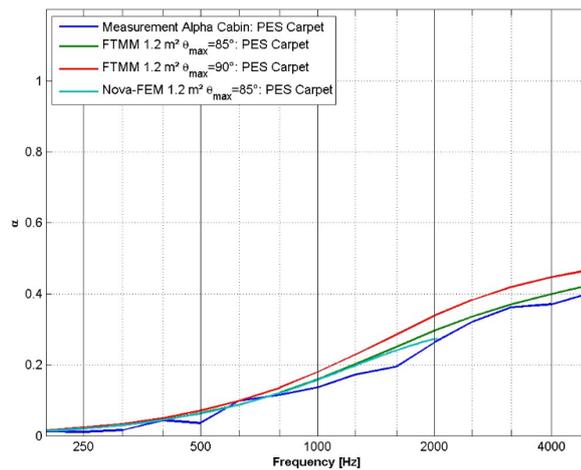


Figura 29: Coefficienti di assorbimento Poliestere 4 mm [21]

Le Figure mostrano discrepanze tra le misure dell'Alpha Cabin e quelle della camera riverberante in scala 1:1. Queste sono particolarmente accentuate alle basse frequenze e per i materiali altamente assorbenti e con spessori elevati. Si nota, inoltre, un picco di valore maggiore di 1 per il materiale di spessore maggiore (20 mm).

### 2.3.2.2 Università Politecnica di Valencia

La camera riverberante presentata di seguito è un esempio di camera con dimensioni molto piccole: ha un volume di  $1,12 \text{ m}^3$  e consente il test di campioni di  $0,3 \text{ m}^2$ , è costruita prendendo come riferimento la camera riverberante standardizzata dell'Higher Polytechnic School di Gandia che ha un volume di  $238 \text{ m}^3$ , è quindi una riproduzione in scala 1:6 [24].

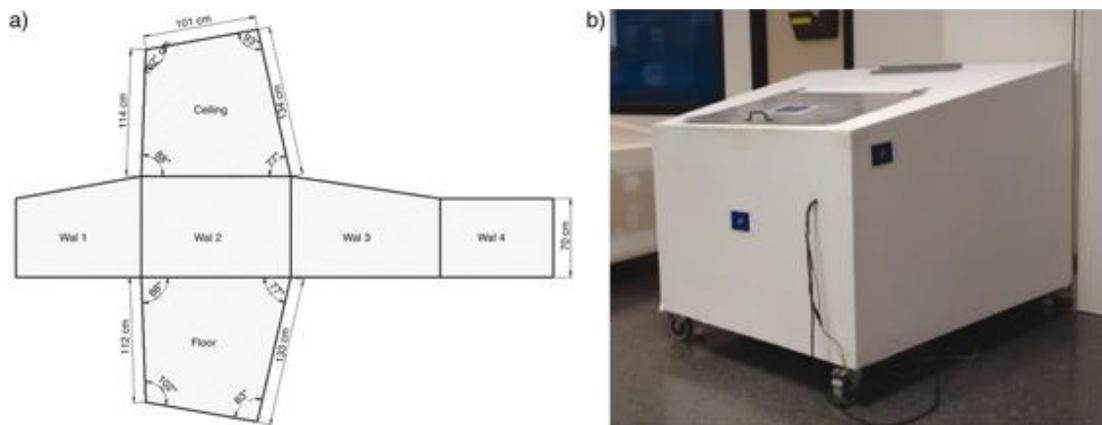


Figura 30: Design e dimensioni della camera riverberante in scala (a) e vista esterna (b) [24]

I diffusori installati all'interno, le cui dimensioni sono state ridimensionate con un fattore di 1:36, sono cinque pannelli di legno con basso assorbimento. La loro superficie rappresenta il 3,5% dell'intera superficie della camera. L'altoparlante utilizzato non è omnidirezionale, come specificato nella ISO-354.

Per verificare la validità delle misure sono stati utilizzati otto diversi materiali con densità diverse, nella figura sottostante vengono riportate le descrizioni e i grafici di andamento del coefficiente di assorbimento calcolati nella camera riverberante in scala e nella camera riverberante in scala 1:1.

Material	Density (g/m <sup>2</sup> )	Thickness (mm)
(a) Mineral Wool (Wool80)	1400	80
(b) Mineral Wool (Wool40)	1400	40
(c) Recycled polyester fibre I (I1400)	1400	70
(d) Recycled polyester fibre I (I700)	700	25
(e) Recycled polyester fibre I (I600)	600	30
(f) Recycled polyester fibre I (I400)	400	40
(g) Recycled polyester fibre I (I300)	300	20
(h) Recycled polyester fibre RC (RC250)	250	10

Tabella 1: Descrizione dei materiali testati [24]

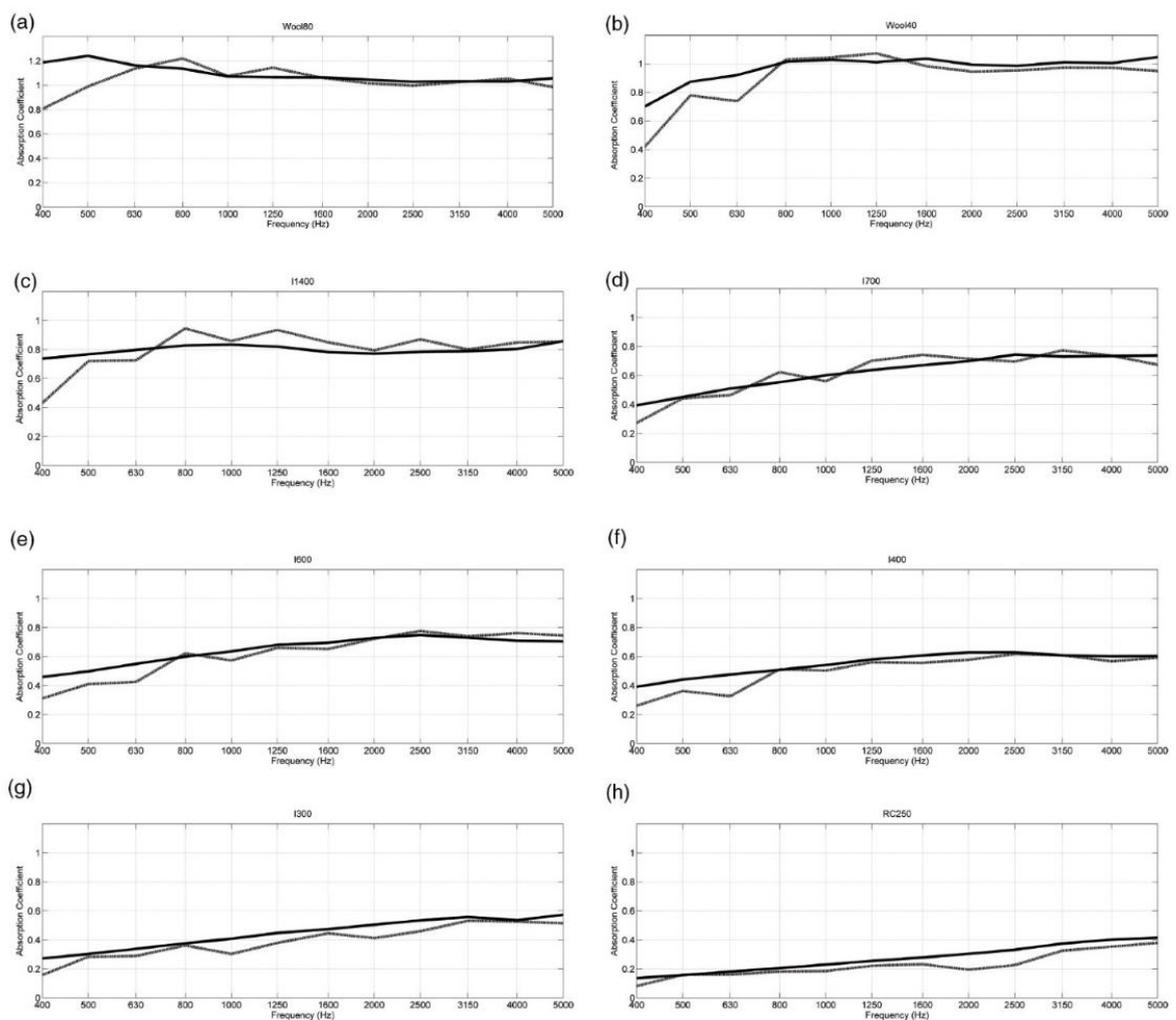


Figura 31: Valori dei coefficienti di assorbimento calcolati nella camera 1:1 (linea continua) e nella camera in scala (linea discontinua) [24]

Dai risultati, che prendono in considerazione frequenze dai 400 ai 5000 Hz, si nota che l'andamento della camera in scala risulta più discontinuo rispetto a quello della camera riverberante 1:1, che non presenta picchi evidenti.

### 2.3.2.3 Feng Chia University, Taiwan

Quello che segue è un esempio di camera riverberante di dimensioni confrontabili a quelle della camera studiata in questa tesi. È stata progettata e costruita senza un particolare riferimento a camere reali standardizzate, è in legno ed ha un volume di  $3 \text{ m}^3$  [25]. Viene utilizzata per le misure dei coefficienti di assorbimento (ISO-354) e di scattering (ISO-17497-1 [26]).

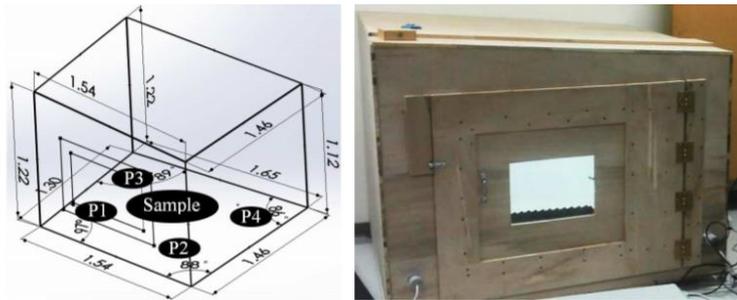


Figura 32: Design della camera e vista dall'esterno [25]

Sono stati analizzati tre campioni di materiali assorbenti, come mostrato in Figura 33.



Figura 33: Materiali testati, assorbente piatto (1), assorbente bugnato (2), polietilene (3) [25]

I risultati sono riportati nelle immagini sottostanti, ma non ci sono riferimenti con camere in scala 1:1 e non sono quindi particolarmente significativi.

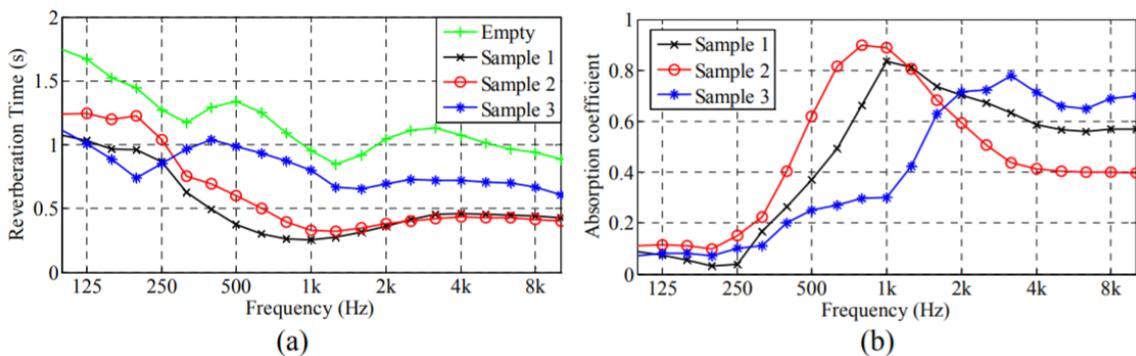


Figura 34: Tempi di riverberazione (a) e coefficienti di assorbimento (b) [25]

### 2.3.3 Test Round Robin

Le camere riverberanti in scala esistenti sono progettate e fabbricate da diversi enti, vengono ad oggi realizzate seguendo le linee generali delle normative per le camere reali, ma sono considerate fuori standard. Gli standard, come la ISO-354, sono stati studiati basandosi su dati statistici di camere reali e non sono quindi da considerarsi validi nel caso di camere in scala, questo comporta una mancanza di coerenza nei risultati.

Dall'esigenza di una standardizzazione, che porterebbe ad un appropriato livello di ripetibilità e validità dei risultati condotti, nasce lo studio round robin realizzato da SAE, Society of Automotive Engineers, durato circa tre anni e concluso nel 2005.

I dati dello studio sono stati riassunti per la realizzazione della SAE j2883 "Laboratory Measurement of Random Incidence Sound Absorption Tests Using a Small Reverberation Room".

Sono stati confrontati i coefficienti di assorbimento misurati nelle camere in scala e nelle camere di grandi dimensioni, con un totale di diciannove diverse stanze di riverberazione classificate in base al volume come illustrato nella Tabella 2 [27].

Category	Volume	Quantity
Large size Reverberation Room	>230 m <sup>3</sup>	1
Full size Reverberation Room	170 ~ 230 m <sup>3</sup>	3
Medium size Reverberation Room	25.8 m <sup>3</sup>	4
Small size Reverberation Room	6.4 m <sup>3</sup>	11

Tabella 2: Descrizione delle categorie di camere riverberanti [27]

In questo studio le camere di piccole dimensioni valutate sono quasi tutte Alpha Cabin, il riferimento è quindi a camere di volume 6.4 m<sup>3</sup>. Ciò significa che la normativa è stata studiata basandosi principalmente su risultati di questa camera, di dimensioni maggiori di quella presa in esame nel presente studio.

Sono state inoltre analizzate e discusse le variabili che contribuiscono maggiormente all'incoerenza nei risultati dei test di assorbimento nelle camere di piccole dimensioni.

Lo studio è stato condotto su un materiale cellulare (Poliuretano) e un materiale fibroso (Lana di vetro) a diversi spessori.

Le dimensioni del campione sono state scelte in base al volume, tenendo come riferimento di scala 1:1 la superficie indicata dalla ASTM-C423.

Category	Sample Total Area (m <sup>2</sup> )	Sample Piece Size (m x m)	Sample Piece Quantity
Large size Reverberation Room	10.03	0.91 x 1.22	9
Full size Reverberation Room	6.69	0.91 x 1.22	6
Medium size Reverberation Room	3.34	0.91 x 1.22	3
Small size Reverberation Room	1.12	0.91 x 1.22	1

Tabella 3: Dimensioni del campione [27]

Le figure mostrano il confronto tra i coefficienti di assorbimento medi misurati nelle camere di riverberazione reali e in quelle di dimensioni ridotte per campioni di Lana di vetro da 6 mm, 25 mm e 50 mm di spessore. Il coefficiente di assorbimento misurato nelle camere in scala rientra nell'intervallo ad eccezione della banda a 400 Hz, dove la densità dei modi si avvicina al limite inferiore raccomandato.

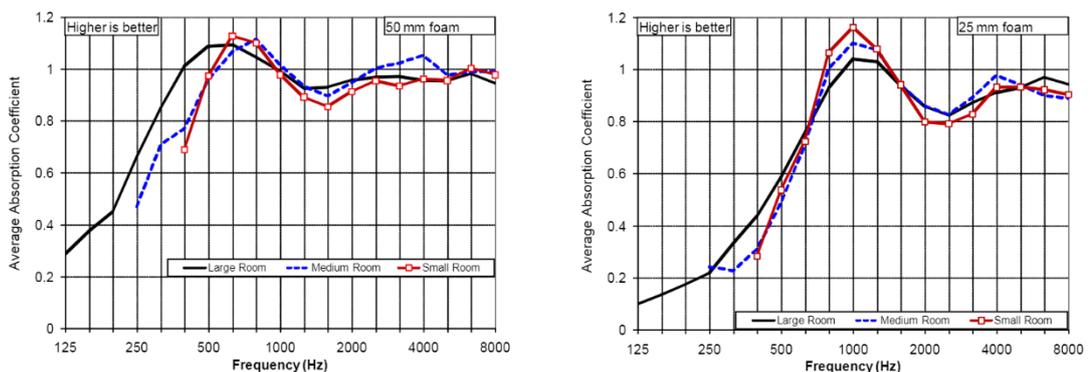


Figura 35: Coefficienti di assorbimento del Poliuretano da 50 mm e 25 mm [27]

I grafici mostrano come i risultati delle camere riverberanti di piccole dimensioni possano essere comparabili a quelli delle camere standard, ad eccezione di alcune frequenze particolari. Si nota come la variazione è alta nelle frequenze in cui il campione raggiunge alte prestazioni di assorbimento.

## 2.4 Confronto dei metodi

Per riassumere meglio le tre metodologie appena descritte è stata realizzata la seguente tabella:

<b>METODO</b>	<b>Incidenza</b>	<b>Frequenze Limite</b>	<b>Dimensioni campione</b>	<b>Vantaggi</b>	<b>Svantaggi</b>
<i>Camera riverberante</i>	Casuale	100 Hz-5 kHz	10-12 m <sup>2</sup>	-Incidenza	-Costi -Dimensioni campione
<i>Tubo di Kundt</i>	Normale	In base al diametro: 600 Hz-2 kHz 1 kHz-3 kHz	0.1-0.15 m <sup>2</sup>	-Dimensioni campione	-Incidenza -Limiti frequenza
<i>Camera riverberante in scala</i>	Casuale	400 Hz-10 kHz *	0.4-1.5 m <sup>2</sup>	-Incidenza -Costi -Dimensioni campione	-Frequenza minima -Effetto bordo -Mancanza di uno standard

\*Indipendentemente dalla scala

Tabella 4: Confronto tra i tre metodi

### 3 Descrizione della camera riverberante in scala

La camera riverberante presa in considerazione in questo lavoro di tesi è quella del DENERG (Dipartimento di Energetica) del Politecnico di Torino. Si tratta della riproduzione in scala 1:5 della camera riverberante dell'INRiM, Istituto nazionale di ricerca metrologica.

Lo studio effettuato prosegue lo studio precedente "Caratterizzazione di una camera riverberante in scala" [28]. Le dimensioni medie della camera sono 1,53 x 1,56 x 1,20 m, con un volume di 2,86 m<sup>3</sup>, mentre la camera "full-size" ha un volume di 296 m<sup>3</sup>. Le pareti non sono parallele ma leggermente inclinate per poter ricreare al meglio il campo diffuso, come illustrato nel capitolo precedente.

Il materiale di costruzione è MDF (Medium density fibreboard) di spessore 3,8 cm. La struttura è sollevata da terra e appoggia su una base in legno fissata al pavimento per consentire il posizionamento, nella base della camera, di una piattaforma rotante e di un motore che ne consente il movimento utilizzati per le misure di scattering.

Il soffitto è dotato di ganci per appendere i diffusori e di fori filettati disposti a maglia quadrata 4x4 per posizionare i microfoni tramite barre in ferro di lunghezza fissa di 30 o 60 cm.

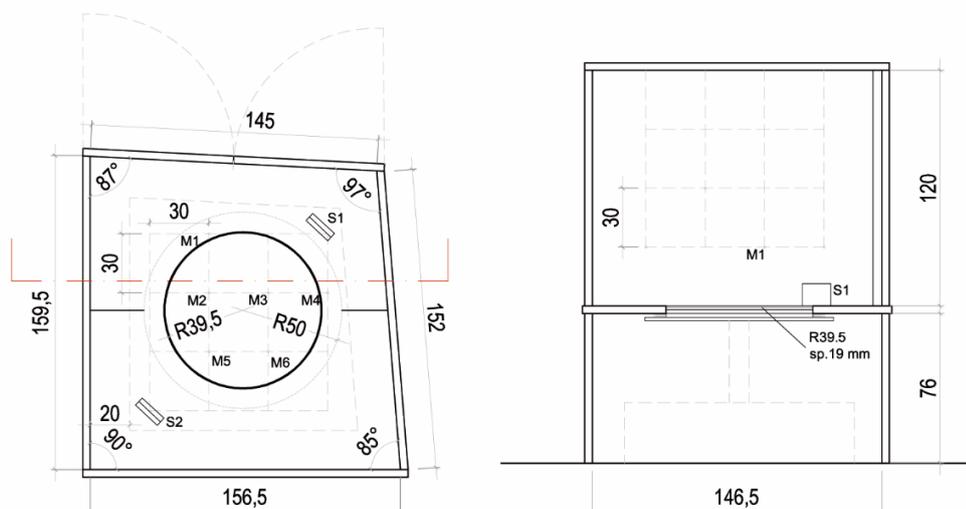


Figura 36: Pianta e prospetto [28]

### 3.1 Caratteristiche acustiche

Le proporzioni dei lati della camera sono tali da creare una distribuzione di modi ottimale, evitando di avere modi coincidenti.

Dall'equazione 2.4 si ricava una frequenza di Schroeder di 893,0 Hz. Ciò significa che il campo può considerarsi diffuso solo dalla banda a un terzo di ottava centrata in 1000 Hz.

Per ridurre l'influenza dei modi nelle frequenze inferiori sono stati installati sul soffitto dei pannelli diffusori, che reindirizzano l'energia incidente in modo casuale. Si tratta di otto pannelli rettangolari in polimetilmetacrilato che rispettano i parametri descritti nella ISO-354: sono orientati in modo casuale, sono leggermente curvi, hanno un basso assorbimento acustico.

Il numero di pannelli ottimale per la diffusività è stato scelto tramite uno studio precedente, seguendo la ISO-354, basato sul calcolo del coefficiente di assorbimento di un campione di prova aumentando di volta in volta il numero di pannelli diffusori, fino a trovare la configurazione che lo massimizza e rende il suo andamento più regolare [28].

Nella Figura 37 si mostra come cambia la distribuzione e l'energia dei modi alle frequenze più basse, in particolare tra 500 Hz e la frequenza di Schroeder [28].

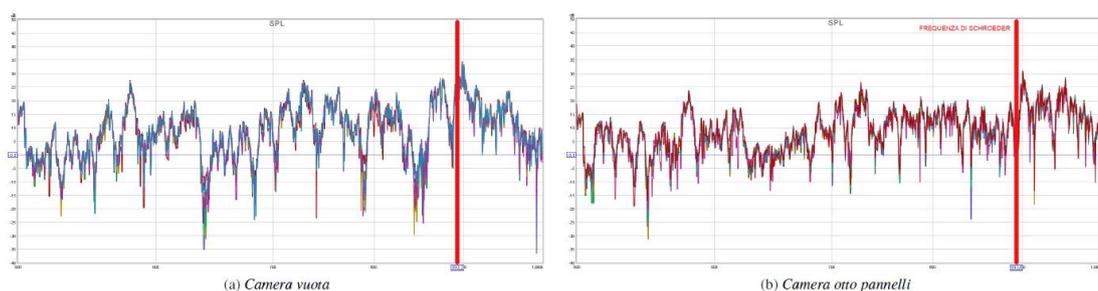


Figura 37: Confronto delle distribuzioni modali con e senza i diffusori [28]

Durante il corso dell'anno sono state monitorate le condizioni di assorbimento della camera vuota e si è constatato un assorbimento particolarmente alto rispetto al livello massimo richiesto dalla ISO-354, ridotto in base al fattore di scala della camera.

Inoltre, l'assorbimento è risultato dipendente dalle condizioni ambientali: la variabilità dei valori di area equivalente di assorbimento,  $A_1$ , è stata ricondotta al materiale di cui è composta la camera (MDF) e dipendente dai valori di umidità. Poiché il legno è altamente igroscopico, le proprietà acustiche e le dimensioni del legno cambiano durante le variazioni di umidità ambientale [29].

Il contenuto di umidità dipende quindi dall'umidità relativa e dalla temperatura dell'aria. Se il legno resta abbastanza a lungo nell'aria in cui umidità relativa e temperatura sono costanti diventerà costante anche il valore di contenuto di umidità all'equilibrio (EMC) [30].

L'assorbimento acustico del legno è maggiore se l'EMC è più basso, viceversa il legno diventa più riflettente se ha un contenuto di umidità maggiore.

Temperature (°F (°C))	EMC (%)																		
	5% RH	10% RH	15% RH	20% RH	25% RH	30% RH	35% RH	40% RH	45% RH	50% RH	55% RH	60% RH	65% RH	70% RH	75% RH	80% RH	85% RH	90% RH	95% RH
30 (-1.1)	1.4	2.6	3.7	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.4	11.3	12.4	13.5	14.9	16.5	18.5	21.0	24.3
50 (10.0)	1.4	2.6	3.6	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.3	11.2	12.3	13.4	14.8	16.4	18.4	20.9	24.3
70 (21.1)	1.3	2.5	3.5	4.5	5.4	6.2	6.9	7.7	8.5	9.2	10.1	11.0	12.0	13.1	14.4	16.0	17.9	20.5	23.9
90 (32.2)	1.2	2.3	3.4	4.3	5.1	5.9	6.7	7.4	8.1	8.9	9.7	10.5	11.5	12.6	13.9	15.4	17.3	19.8	23.3
110 (43.3)	1.1	2.2	3.2	4.0	4.9	5.6	6.3	7.0	7.7	8.4	9.2	10.0	11.0	12.0	13.2	14.7	16.6	19.1	22.4
130 (54.4)	1.0	2.0	2.9	3.7	4.5	5.2	5.9	6.6	7.2	7.9	8.7	9.4	10.3	11.3	12.5	14.0	15.8	18.2	21.5
150 (65.6)	0.9	1.8	2.6	3.4	4.1	4.8	5.5	6.1	6.7	7.4	8.1	8.8	9.7	10.6	11.8	13.1	14.9	17.2	20.4

Figura 38: Dipendenza di EMC del legno dall'umidità relativa (RH) e dalla temperatura [30]

Sono state quindi applicate delle pellicole adesive di plastica sulle superfici interne della camera per renderla più riflettente.

Di seguito è riportato il grafico delle variazioni di  $A_1$ . Si conoscono le condizioni di umidità relativa e temperatura dell'ambiente esterno, ma non i valori di EMC delle pareti della stanza nel momento della misura poiché, come già detto, il legno ha bisogno di un certo lasso di tempo per raggiungere il valore di equilibrio.

È chiaro, però, che per livelli bassi di umidità relativa la camera riverberante presenta valori di assorbimento più elevati, mentre è più riflettente per valori di umidità più alti o, a parità di umidità relativa, per temperature più basse.

La linea verde rappresenta l'ultima misura, effettuata con le pellicole applicate: si nota che i valori di area equivalente di assorbimento sono più bassi e si avvicinano ai valori di soglia (linea nera).

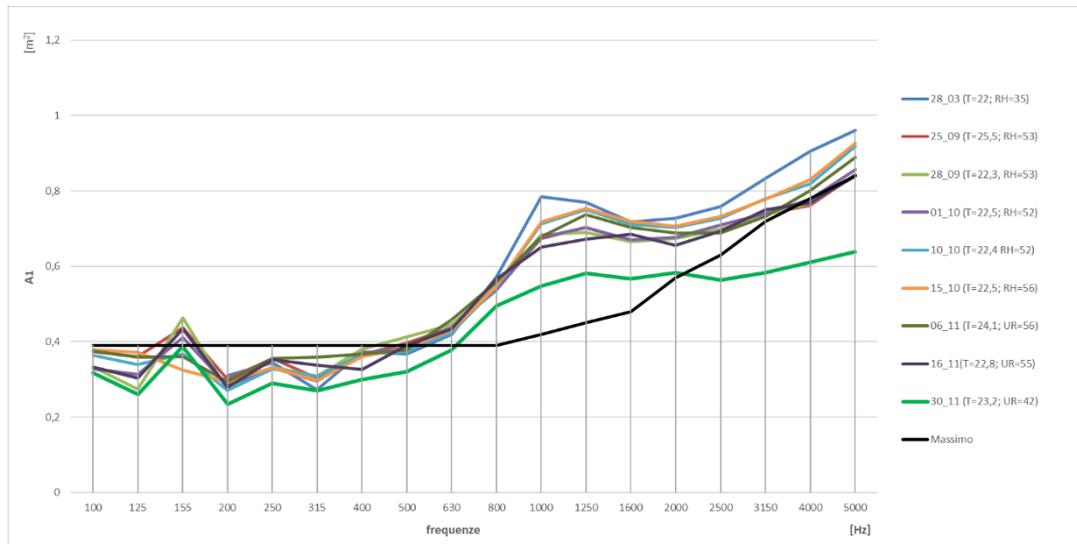


Figura 39: Variazione dei valori di A1 della camera vuota e curva dei valori massimi accettati dalla ISO-354

Questa condizione, però, non contribuisce ad aumentare l'errore delle misure dei coefficienti di assorbimento, poiché si tratta di una misura relativa (basata sulla differenza dei valori di area equivalente).

### 3.2 Catena elettroacustica

Il software utilizzato per le misurazioni è Matlab, unito all'ITA-Toolbox [31]. Si tratta di un toolbox open source specifico per l'acustica, sviluppato dall'*Istituto di acustica tecnica della Aachen University*. È stato utilizzato per gestire sia la riproduzione che la registrazione, nonché l'analisi dei dati: è dotato di funzioni che permettono il calcolo del tempo di riverberazione e di altri parametri acustici.

Il segnale digitale, nello specifico una sweep esponenziale da 100 Hz a 25000 Hz, viene inviato ad un convertitore analogico-digitale e quindi amplificato ed emesso attraverso la sorgente sonora. I microfoni registrano l'audio e il segnale registrato

viene inviato tramite un preamplificatore ed un convertitore analogico-digitale al computer.

L'operazione di generazione e registrazione del segnale viene effettuata per due posizioni della sorgente (separatamente) e sei posizioni microfoniche (in contemporanea) per un totale di 12 misure, come richiesto dalla ISO-354.

Di seguito vengono presentate le specifiche dei singoli componenti utilizzati.

### 3.2.1 Catena in ingresso

Vengono utilizzati sei microfoni a condensatore omnidirezionali da ¼ di pollice. Le caratteristiche dei sei microfoni sono illustrate nella tabella:

Microfono	Sensibilità (mV/Pa)	Risposta in frequenza
BSWA Tech MPA451 (1)	1.6 @ 250 Hz	±4 dB 20 Hz – 50 kHz
BSWA Tech MPA451 (2)	2.5 @ 250 Hz	±1 dB 20 Hz – 50 kHz
BSWA Tech MPA451 (3)	2.4 @ 250 Hz	±3 dB 20 Hz – 50 kHz
BSWA Tech MPA451 (4)	3.5 @ 250 Hz	±2 dB 20 Hz – 50 kHz
BSWA Tech MPA451 (5)	2.9 @ 250 Hz	±3 dB 20 Hz – 50 kHz
BSWA Tech MPA451 (6)	4.2 @ 250 Hz	±4 dB 20 Hz – 50 kHz

Tabella 5: Caratteristiche dei microfoni

Essendo microfoni a condensatore necessitano di un alimentatore con corrente continua a 48 Volt. Vengono utilizzati due alimentatori BSWA MC104, poiché ognuno di essi è dotato di quattro canali: i microfoni 1, 2 e 3 sono collegati all'alimentatore 1, i microfoni 4, 5 e 6 all'alimentatore 2. I microfoni sono poi collegati alla scheda audio esterna Roland Octa-Capture che amplifica il segnale elettrico in entrata e lo converte in digitale.

La scheda audio consente di scegliere una frequenza di campionamento

$f_c = 44100 - 48000 - 96000 - 192000$  Hz.

Viene quindi utilizzata  $f_c = 96000$  Hz poiché il segnale generato ha una frequenza massima di 25 KHz e, per il teorema di campionamento di Nyquist-Shannon,  $f_c$  deve essere almeno  $2f_{max}$ .



Figura 40: Microfoni



Figura 41: Alimentatore



Figura 42: Scheda audio

Prendendo in esame la Figura 43, le sei posizioni microfoniche utilizzate sono:  
 Microfono 1: MIC16 (h=60 cm); Microfono 2: MIC19 (h=60 cm); Microfono 3: MIC11 (h=30cm);  
 Microfono 4: MIC14 (h=60 cm); Microfono 5: MIC4 (h=30 cm); Microfono 6 MIC8 (h=30 cm).

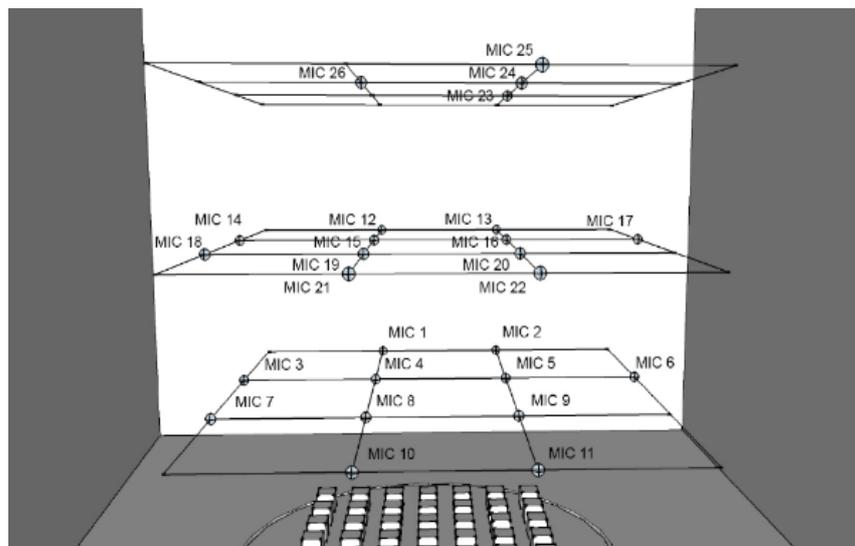


Figura 43: Schema della griglia di posizione dei microfoni [28]

Da normativa ci sono dei limiti da rispettare per le posizioni microfoniche: i microfoni devono essere distanziati di almeno 1.5 metri, ad una distanza minima di 2 metri dalla sorgente ed 1 metro dalle superfici della camera e del campione misurato. In una camera di dimensioni ridotte queste specifiche non possono, chiaramente, essere rispettate. La soluzione scelta è stata dunque di ricalcolare questi limiti nella scala 1:5. I microfoni sono ad una distanza di almeno 30 cm, all'interno di un'area distante 30 cm dalle superfici della camera e più di 50 cm dalle sorgenti.

Le misure vengono effettuate valutando anche i parametri ambientali all'interno della camera: temperatura, umidità relativa e pressione. Queste variabili, come spiegato nel paragrafo 2.1.2, influenzano il fattore di assorbimento dell'aria ed è dunque fondamentale tenerne traccia per il calcolo del coefficiente di assorbimento. Per questo motivo nella camera è installato un dispositivo per la misura di temperatura e umidità dell'ambiente interno, direttamente collegato agli ingressi del PC. Il valore di pressione atmosferica viene invece preso dalle misure in tempo reale dell'INRiM.



Figura 44: Posizione dei microfoni nel setup utilizzato

### 3.2.2 Catena in uscita

Per la riproduzione del segnale in uscita vengono utilizzate due sorgenti omnidirezionali dodecaedriche ITA con le seguenti caratteristiche:

Sorgente	Sensibilità (dB)	Risposta in frequenza	Impedenza ( $\Omega$ )
ITA (1)	72,0 @ 1,00 V/1 m	20 Hz – 20 kHz	6
ITA (2)	86,0 @ 1,00 V/1 m	20 Hz – 20 kHz	6

Tabella 6: Caratteristiche delle sorgenti

Le sorgenti sono poco efficienti alle basse frequenze, questo comporta risultati poco veritieri per le bande in terzi di ottava al di sotto di 200 Hz.

Come illustrato nel capitolo precedente, nelle camere in scala si valuta un range di frequenze più alto rispetto ai 100-5000 Hz dello standard, cioè 400-10000 Hz.

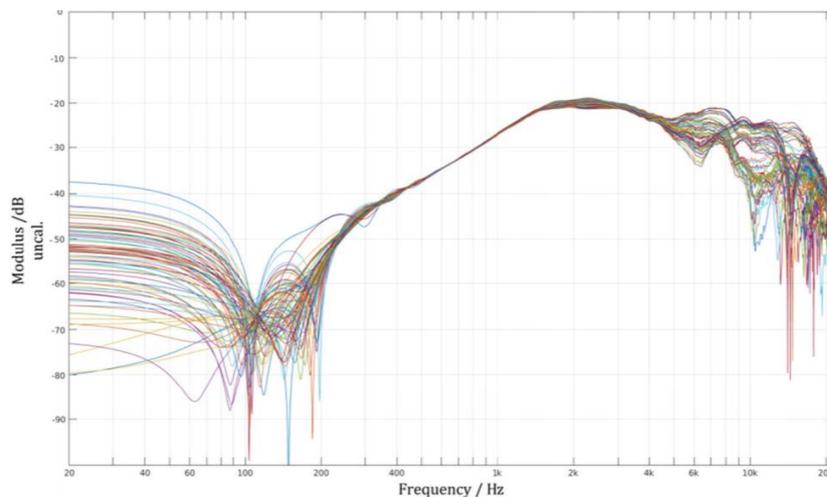


Figura 45: Grafico della risposta in frequenza e della direttività della sorgente 2 (Scheda tecnica)

Il segnale digitale generato tramite script passa alla scheda audio esterna Roland Octa-Capture, che lo converte in analogico.

I canali di output della scheda audio sono collegati ai due amplificatori ITA che alimentano rispettivamente la sorgente 1 e 2.



Figura 46: Sorgente dodecaedrica



Figura 47: Amplificatori

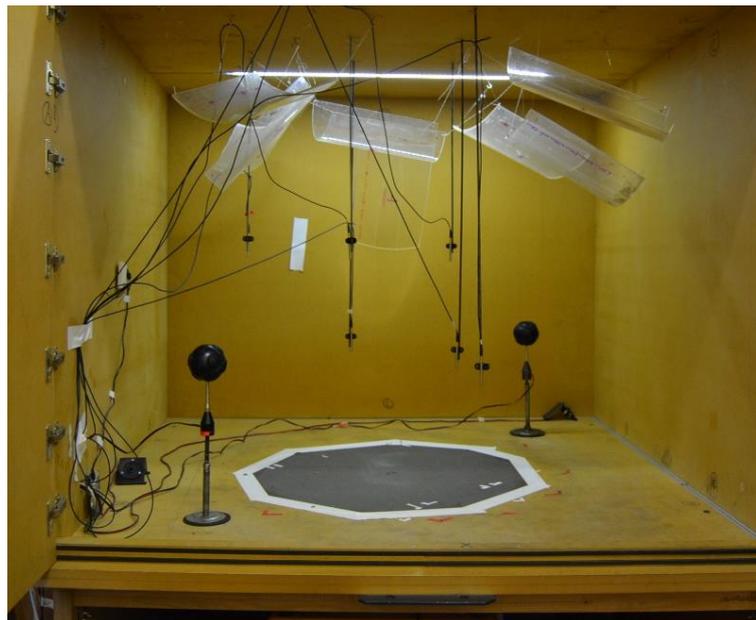


Figura 48: Sorgenti 1 e 2 posizionate nel setup utilizzato

La normativa richiede almeno due posizioni delle sorgenti che differiscano di almeno 3 metri. In questo caso si posizionano le due sorgenti nei due angoli della stanza, nella diagonale maggiore, per massimizzare la distanza, come mostrato in Figura 48.

Tutti gli elementi della catena (ingresso e uscita) sono stati calibrati tramite la funzione di ITA-Toolbox "calibrate" e utilizzando un calibratore Brüel & Kjær 4231 con un'uscita a 1kHz e un livello di pressione di 94dB.

### 3.3 Metodo di misura

La metodologia con cui sono state condotte le misure si basano sulla ISO-354. È stato sviluppato un programma Matlab che permette di effettuare le misure tramite una semplice interfaccia grafica.

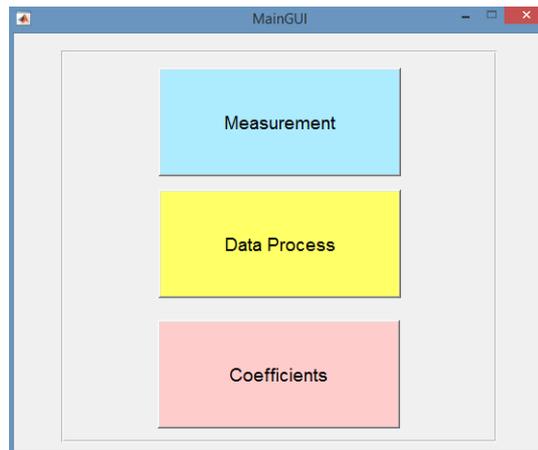


Figura 49: GUI del programma sviluppato

Tramite il tasto "Measurement", che apre in automatico la GUI di ITA-Toolbox (Figura 50) per modificare le opzioni del segnale, viene generata dalla sorgente una sweep esponenziale (con frequenza da 100 Hz a 25 kHz) e contemporaneamente la risposta viene acquisita dai sei microfoni.

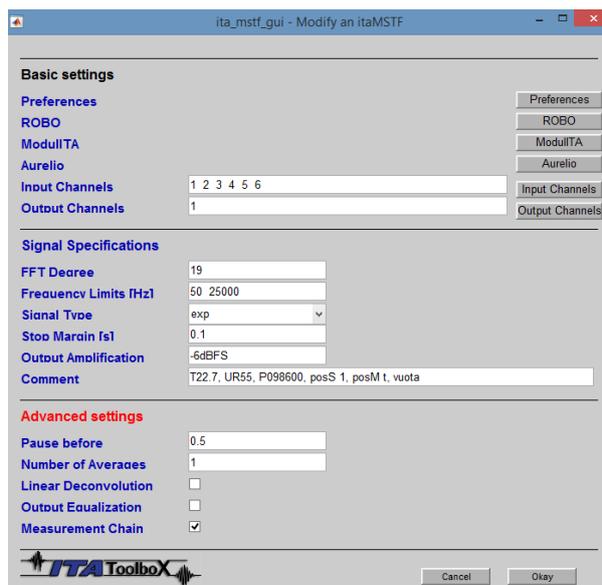


Figura 50: GUI del toolbox ITA

Nella GUI di ITA vengono inseriti, nella sezione “Comment”, i valori di temperatura, umidità relativa e pressione atmosferica dell’ambiente nel momento in cui si effettua la misura. Questi parametri vengono poi presi in automatico nella fase di calcolo dei coefficienti, come spiegato nell’equazione 2.12.

La misura si ripete in automatico tramite lo script: viene cambiata la sorgente di output e rilanciato il segnale, in questo modo si avranno 12 risposte all’impulso.

Una volta acquisito il segnale, la risposta all’impulso si ottiene tramite la convoluzione del segnale registrato con il filtro inverso del segnale lanciato.

Il segnale di risposta all’impulso viene filtrato in bande di un terzo di ottava come specificato nello standard ISO-226 [10]. Una volta che il segnale è separato in bande di frequenza, è possibile ottenere le curve di decadimento energetico per ciascuna banda tramite il tasto “Data process”.

Il toolbox ITA mette a disposizione una serie di funzioni per il calcolo automatico della risposta all’impulso tramite sweep.

Nelle bande di alta frequenza, in cui le riflessioni si estinguono in minor tempo, non si può usare un decadimento di 60 dB. Per questo motivo si utilizza il tempo di riverberazione  $T_{15}$  basato sul decadimento di 15dB, da -5 a -20dB.

Si procede con il calcolo dei coefficienti di area equivalente di assorbimento acustico della stanza vuota o della stanza con il pannello ( $A_1$  e  $A_2$ ) tramite il tasto “Coefficients”.

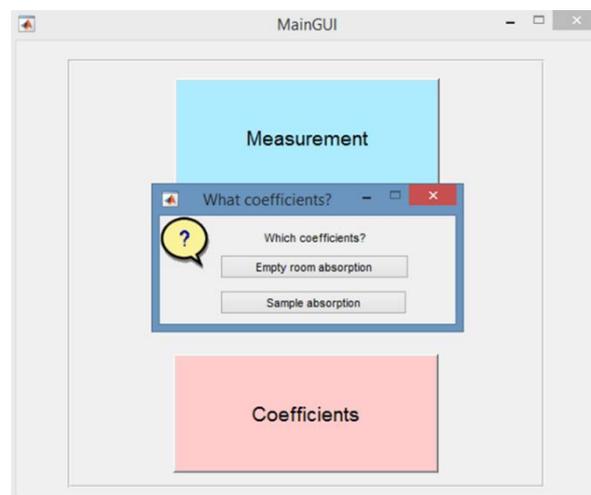


Figura 51: GUI del programma sviluppato

I tempi di riverberazione della camera vuota e della camera con un campione all'interno, ottenuti con il metodo precedentemente descritto, sono rappresentati graficamente nelle figure sottostanti.

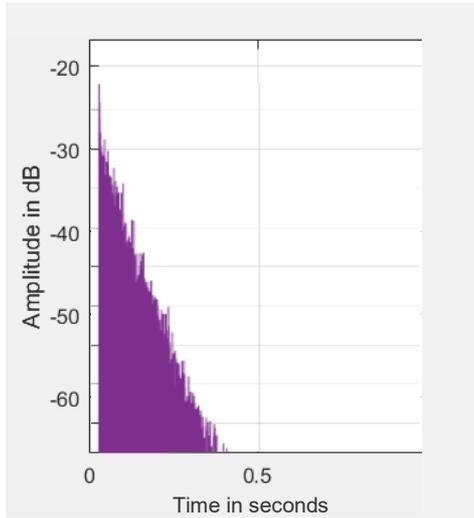


Figura 52: Curva di decadimento della camera vuota

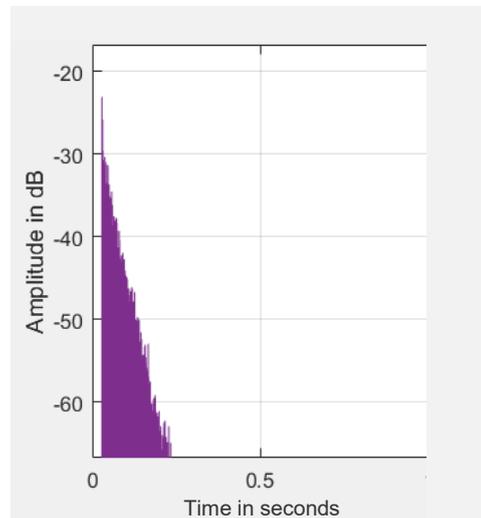


Figura 53: Curva di decadimento della camera con il campione all'interno

Si può osservare come il campione di materiale fonoassorbente riduce i tempi di riverberazione della camera.

Nel capitolo 5 vengono mostrati nel dettaglio i risultati delle misure effettuate nella camera in scala.

## 4 Casi studio

In questo capitolo vengono illustrati i materiali testati e presentate, nello specifico, le misure effettuate su di essi: misure nella camera riverberante standardizzata dell'INRiM, misure nel tubo di Kundt e misure nella camera riverberante in scala.

### 4.1 Materiali testati

Sono stati testati cinque campioni messi a disposizione dall'INRiM, per i quali sono disponibili i dati di riferimento delle misure effettuate in camera 1:1 e/o nel tubo di Kundt. Di seguito vengono descritti nel dettaglio:

- Campione 1

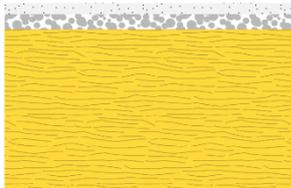
<b>Codice identificativo</b>	A
<b>Descrizione</b>	<p>Pannello in lana di vetro, densità 80 kg/m<sup>3</sup>; Strato di palline di vetro di granulometria 0,5-1 con legante acrilico; Finitura in polvere di marmo di granulometria 0,5 con legante acrilico.</p> 
<b>Spessore</b>	40 mm
<b>Massa areica</b>	7,30 kg/m <sup>2</sup>

Tabella 7: Dettagli campione 1

- Campione 2

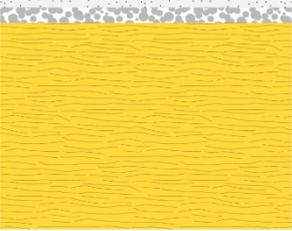
<b>Codice identificativo</b>	B
<b>Descrizione</b>	<p>Pannello in lana di vetro, densità 80 kg/m<sup>3</sup>;            Strato di palline di vetro di granulometria 0,5-1 con legante acrilico;            Finitura in polvere di marmo di granulometria 0,5 con legante acrilico</p> 
<b>Spessore</b>	50 mm
<b>Massa areica</b>	7,70 kg/m <sup>2</sup>

Tabella 8: Dettagli campione 2

- Campione 3

<b>Codice identificativo</b>	C
<b>Descrizione</b>	<p>Pannello in cartongesso, spessore 12,5 mm;            Strato di palline di vetro di granulometria 0,5-1 con legante acrilico;            Finitura in polvere di marmo di granulometria 0,5 con legante acrilico.</p> 
<b>Spessore</b>	15 mm
<b>Massa areica</b>	14,15 kg/m <sup>2</sup>

Tabella 9: Dettagli campione 3

- Campione 4

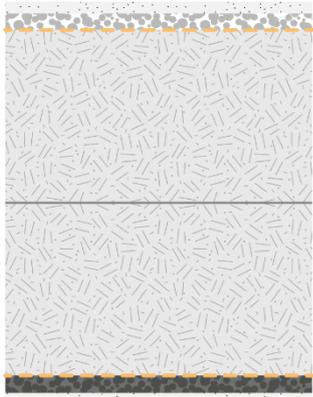
Codice identificativo	D
<p><b>Descrizione</b></p> <p>Pannello composto da due sovrapposti:            pannello in fibra di poliestere (60mm e densità 80kg/m<sup>3</sup>);            Rete di sostegno in fibra di vetro;            Manto legante in schiuma di vetro;            Finitura a vista in vetro cellulare granulometria 0,3 mm            +            pannello in fibra di poliestere (60mm e densità 80kg/m<sup>3</sup>);            Manto legante in schiuma di vetro e cemento;            Finitura in vetro cellulare in granulometria 0,5mm.            I due pannelli sono posizionati con gli strati di fibra a contatto.</p>	
<b>Spessore</b>	70 mm
<b>Massa areica</b>	7,1 kg/m <sup>2</sup>

Tabella 10: Dettagli campione 4

- Campione 5

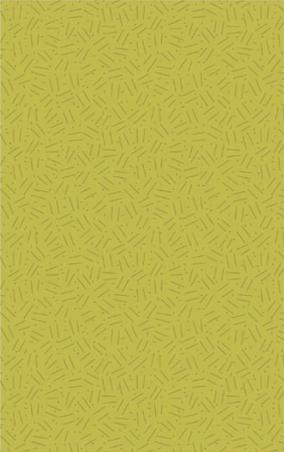
<b>Codice identificativo</b>	E
<b>Descrizione</b>	Pannello in lana di roccia. 
<b>Spessore</b>	100 mm
<b>Massa areica</b>	7,0 kg/m <sup>2</sup>

Tabella 11: Dettagli campione 5

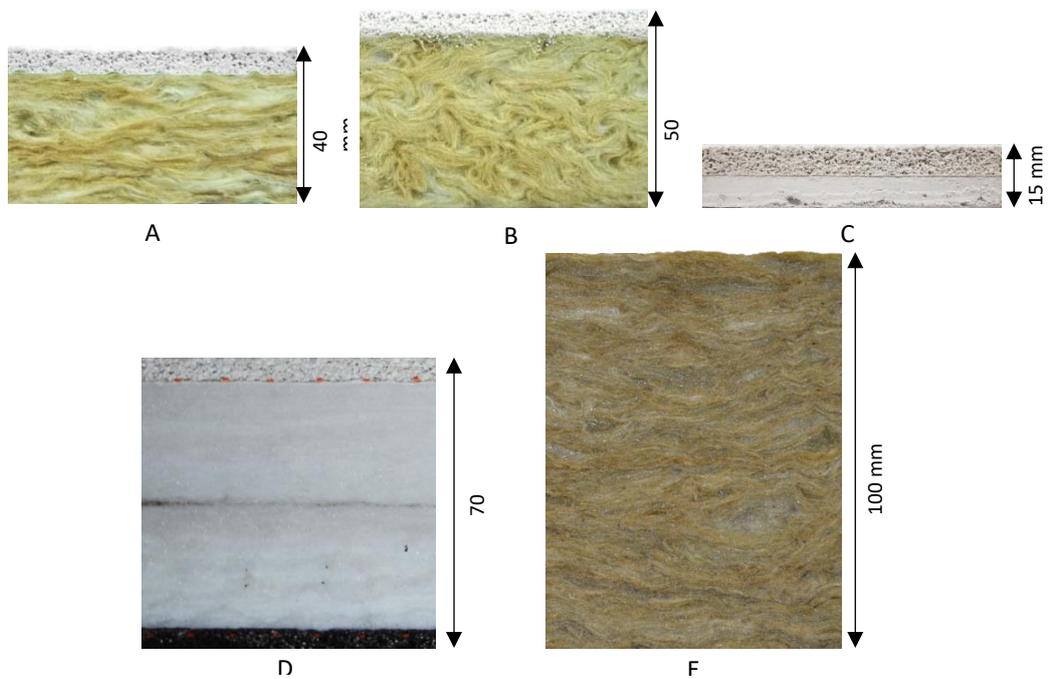


Figura 54: Fotografie delle sezioni dei materiali testati

Come già anticipato, nella valutazione dei risultati ottenuti nella camera in scala si fa riferimento ai coefficienti di assorbimento misurati nella camera riverberante dell'INRiM e nel tubo di Kundt.

## **4.2 Misure nella camera riverberante dell'INRiM**

Le misure effettuate nella camera riverberante dell'INRiM seguono la normativa ISO-354, nello specifico il metodo del rumore interrotto.

Vengono eseguite sei misure consecutive, relative alle sei diverse postazioni microfoniche, del tempo di riverberazione nella camera vuota e nella camera contenente il campione.

Il campione in esame viene posto sul pavimento della camera, nella quale si stabilisce un campo sonoro uniformemente diffuso mediante l'impiego di diffondenti stazionari sospesi.

Nella camera riverberante si produce rumore rosa mediante un sistema costituito da due generatori digitali di rumore, un equalizzatore digitale, un amplificatore di potenza e due diffusori acustici dodecaedrici funzionanti contemporaneamente. Il rumore rosa viene interrotto per ognuna delle sei posizioni microfoniche, in modo da consentire la valutazione del decadimento del segnale nel tempo.

L'intera catena di misura viene calibrata all'inizio e alla fine della prova mediante il calibratore di livello sonoro Brüel & Kjær, con incertezza pari a  $\pm 0,2$  dB, a sua volta tarato con riferimento ai campioni primari del laboratorio di Acustica dell'INRiM.

La dimensione del campione misurato è 12 m<sup>2</sup>. La superficie del campione è circoscritta da una cornice di legno.



Figura 55: Campione di prova (D) nella camera riverberante

### 4.3 Misure nel tubo di Kundt

In questo paragrafo vengono illustrate nel dettaglio le caratteristiche e le metodologie utilizzate per testare i campioni nel tubo di Kundt.

Sono stati utilizzati due tubi di diverso diametro per poter gestire meglio tutto il range di frequenze: un tubo da 30 mm di diametro e uno da 50 mm.

La tecnica usata è quella del “metodo della funzione di trasferimento” illustrata in precedenza.

Differentemente dagli altri campioni, per il campione E i coefficienti di assorbimento sono stati calcolati nel tubo tramite il modello Delany-Bazley [32]: un modello matematico basato su dati sperimentali che permette di ricavare le caratteristiche di un materiale fonoassorbente tramite il valore di resistività al flusso. Si è scelto di utilizzare il modello anziché le misure dirette dei coefficienti di assorbimento nel tubo

poiché lo spessore elevato di questo campione avrebbe comportato elevati errori sui risultati.

Si utilizza un generatore di rumore bianco collegato ad un altoparlante e due microfoni Bruel a  $\frac{1}{4}$  di pollice per registrare i valori della parte reale e della parte immaginaria della pressione sonora da cui ricavare la funzione di trasferimento, la misura viene poi ripetuta invertendo la posizione dei microfoni, questa operazione avviene ruotando il supporto su cui sono inseriti.

Tramite il segnale di rumore bianco si creano onde stazionarie all'interno del tubo a tutte le frequenze.

I valori vengono acquisiti in tempo reale con LabVIEW, che in automatico calcola la funzione di trasferimento tra i due microfoni, nello specifico si registrano i valori per 60 secondi, generando uno spettro ogni due secondi, cioè 30 medie.

Le formule per il calcolo di alfa vengono implementate, invece, su Matlab.

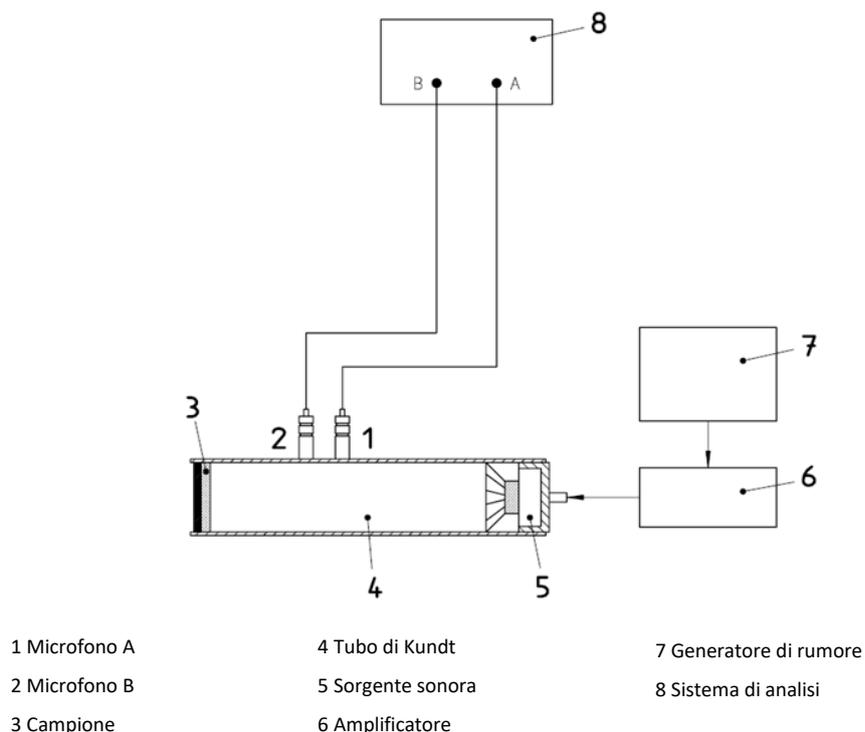


Figura 56: Schema della catena

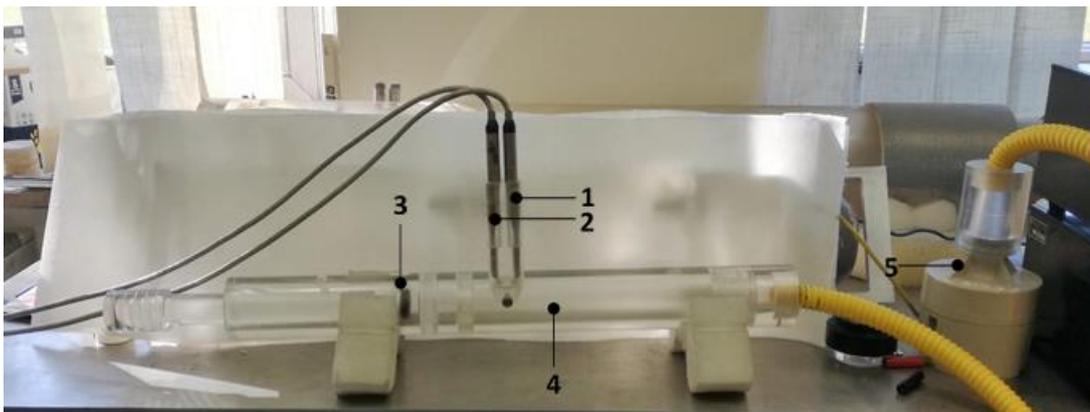


Figura 57: Tubo di Kundt 30 mm



Figura 58: Tubo di Kundt da 50 mm



Figura 59: Generatore di rumore



Figura 60: Provini di diametro 30 mm e 50 mm

Nel tubo da 30 mm i microfoni sono ad una distanza di 16 mm l'uno dall'altro e a 18 cm dal campione.

Nel tubo di diametro 50 mm i microfoni sono a 26 mm tra loro e a 27 cm dal campione.

Dall'equazione 2.16 si ricava la massima frequenza misurabile nel tubo in base al diametro:

$$f_u = \frac{344m/s}{2*0.03m} = 5733 \text{ Hz} , \text{ per il tubo da 30 mm};$$

$$f_u = \frac{344m/s}{2*0.05m} = 3440 \text{ Hz} , \text{ per quello da 50 mm}.$$

Come visto nell'equazione 2.26 anche la distanza tra i due microfoni limita la massima frequenza:

$$f_u = \frac{0.45*344m/s}{0.016m} = 9675 \text{ Hz} , \text{ per il tubo da 30 mm};$$

$$f_u = \frac{0.45*344m/s}{0.026m} = 5954 \text{ Hz} , \text{ per il tubo da 50 mm}.$$

Si considera quindi  $f_u = 5733 \text{ Hz}$  , per il tubo da 30 mm e  $f_u = 3440 \text{ Hz}$  per il tubo da 50 mm.

Dalla distanza tra i microfoni deriva anche un valore di frequenza minima misurabile, ricavabile dall'equazione 2.25:

$$f_l = \frac{344m/s}{20*0.016m} = 1075 \text{ Hz} , \text{ per il tubo da 30 mm};$$

$$f_l = \frac{344m/s}{20*0.026m} = 661 \text{ Hz} , \text{ per il tubo da 50 mm}.$$

Si valuta sostanzialmente quello con la deviazione standard minore, tendenzialmente si scelgono i valori del 50 mm per le frequenze più basse e per le più alte i valori del 30 mm.

<b>diametro</b>	<b>30 mm</b>	<b>50 mm</b>
<b>distanza microfoni</b>	16 mm	26 mm
<b>distanza campione</b>	18 cm	27 cm
$f_u$ (equazione 2.26)	9675 Hz	5954 Hz
$f_u$ (equazione 2.16)	<u>5733 Hz</u>	<u>3440 Hz</u>
$f_l$ (equazione 2.25)	<u>1075 Hz</u>	<u>661 Hz</u>

Tabella 12: Sintesi dei parametri dei due tubi

## **4.4 Misure nella camera in scala**

Quando si misura il coefficiente di assorbimento dei materiali acustici in camera riverberante, molti parametri possono causare errori considerevoli in tutte le bande di frequenza di interesse. Sebbene lo standard stabilisca i dettagli più essenziali per aumentare la precisione dei risultati, si verificano ancora problemi di ripetibilità e riproducibilità [33].

Le differenze sono dovute al campo sonoro a cui è esposto il materiale assorbente durante le misurazioni. Sebbene i dettagli a questo riguardo specificati in ISO-354 siano stati seguiti con l'intento di ottenere un campo diffuso, il campo sonoro nella stanza riverberante, specie se di piccole dimensioni, dipende fortemente anche dalla configurazione del campione. La presenza del campione fonoassorbente all'interno della stanza, infatti, attenua la condizione di campo diffuso nello spazio intorno a sé.

### **4.4.1 Fattori esaminati**

Per valutare la configurazione ottimale della camera esaminata sono state effettuate misure su ogni materiale di diverse dimensioni ed in tre diverse posizioni sul pavimento, sono stati inoltre trattati i bordi dei campioni in due configurazioni: lasciandoli esposti, poi isolandoli con del nastro adesivo in alluminio.

#### **4.4.1.1 Dimensione del campione**

Sebbene il coefficiente di assorbimento del suono sia indipendente dall'area esposta al campo sonoro riverberante, la dimensione del campione testato in relazione alla dimensione della stanza può influenzare i dati misurati [27].

La dimensione del campione del test è quindi una delle variabili valutate in questo studio.

Numerosi studi hanno dimostrato quanto possa influire la dimensione nelle misure in camera riverberante, una possibilità è quella di correggere i dati campione standard per renderli applicabili ad un'area infinita. Tuttavia, non esiste una relazione

generale precisa tra l'assorbimento del campione finito e l'assorbimento dell'area infinita [34].

Nelle camere di piccole dimensioni le influenze sono ancora più importanti essendo il campo più soggetto a modi e quindi meno “diffuso”.

Utilizzare un campione con dimensioni troppo grandi rispetto alle dimensioni della camera riverberante significherebbe modificare di tanto il campo sonoro e perdere gran parte della diffusività, fattore su cui si basa l'applicabilità della formula di Sabine per il calcolo dell'assorbimento. Utilizzare un campione troppo piccolo, al contrario, significa avere assorbimento basso, confrontabile con quello della camera vuota, ed avere effetti di diffrazione, dovuti alle dimensioni importanti dei bordi rispetto alla superficie, ancor più evidenti.

La lunghezza rispetto al rapporto tra le dimensioni dei due lati del campione potrebbe influire sul risultato, compreso l'aumento del coefficiente di assorbimento con la diminuzione della dimensione del campione. Il rapporto d'aspetto consigliato dovrebbe essere compreso tra 1: 1.1 e 1: 1.2 [27].

La dimensione del campione nelle camere standardizzate è di 10-12 m<sup>2</sup>. È possibile adattare il campione seguendo una proporzione tra il rapporto della superficie del campione e il rapporto di volume delle due stanze [9]:

$$\frac{S_1}{S_2} = \left( \sqrt[3]{\frac{V_1}{V_2}} \right)^2 \quad (4.1)$$

In questo caso, essendo in scala 1:5, la superficie dovrebbe essere tra 0.4 m<sup>2</sup> e 0.48 m<sup>2</sup>. Sono state però valutate dimensioni maggiori e minori di quella indicata dallo standard:

- 0,4 m x 0,6 m (S=0,24 m<sup>2</sup>)
- 0,6 m x 0,6 m (S=0,36 m<sup>2</sup>)
- 0,7 m x 0,6 m (S=0,42 m<sup>2</sup>)
- 0,8 m x 0,6 m (S=0,48 m<sup>2</sup>)
- 1,0 m x 0,6 m (S=0,6 m<sup>2</sup>)

#### 4.4.1.2 Orientamento del campione

Anche l'orientamento del campione nella camera riverberante genera variazioni nei coefficienti di assorbimento misurati [33]. Nessuno dei lati del campione deve essere parallelo alle pareti delle stanze o essere entro  $\frac{1}{4}$  di una lunghezza d'onda del suono dalle pareti della stanza per il più basso intervallo di frequenza di interesse per quella stanza [27].

Ogni materiale è stato testato in tre diverse posizioni sul pavimento, come presentato nella Figura 63, rispettivamente orizzontale (indicato con 1), obliquo (2) e verticale (3).

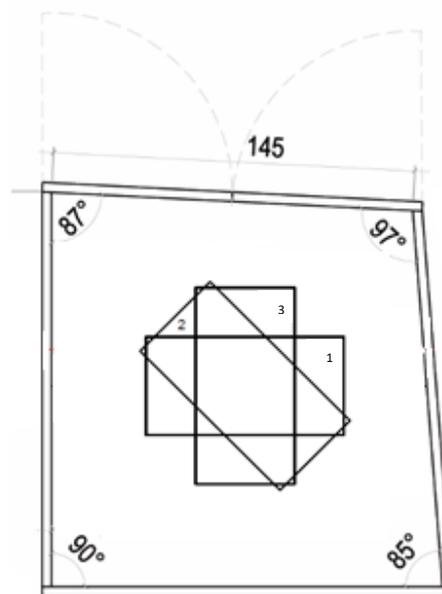


Figura 61: Rappresentazione schematica delle tre posizioni del campione sul pavimento

#### 4.4.1.3 Trattamento dei bordi

È stata effettuata un'analisi sull'influenza dei bordi dei campioni, per capire come, e in quali configurazioni maggiormente, l'isolamento dei bordi potesse influenzare i risultati. La normativa prevede l'utilizzo di una cornice riflettente e rigida con cui coprire il perimetro del campione. È possibile, nel caso in cui i pannelli testati vengano

poi installati con i bordi esposti, lasciare il perimetro scoperto, in questo caso l'area dei bordi va considerata nel calcolo di  $\alpha$  [9].

Nelle misure effettuate si è scelto di utilizzare un nastro adesivo in alluminio per la copertura dei bordi poiché una cornice in legno avrebbe influenzato troppo i risultati, trattandosi di una camera in scala.

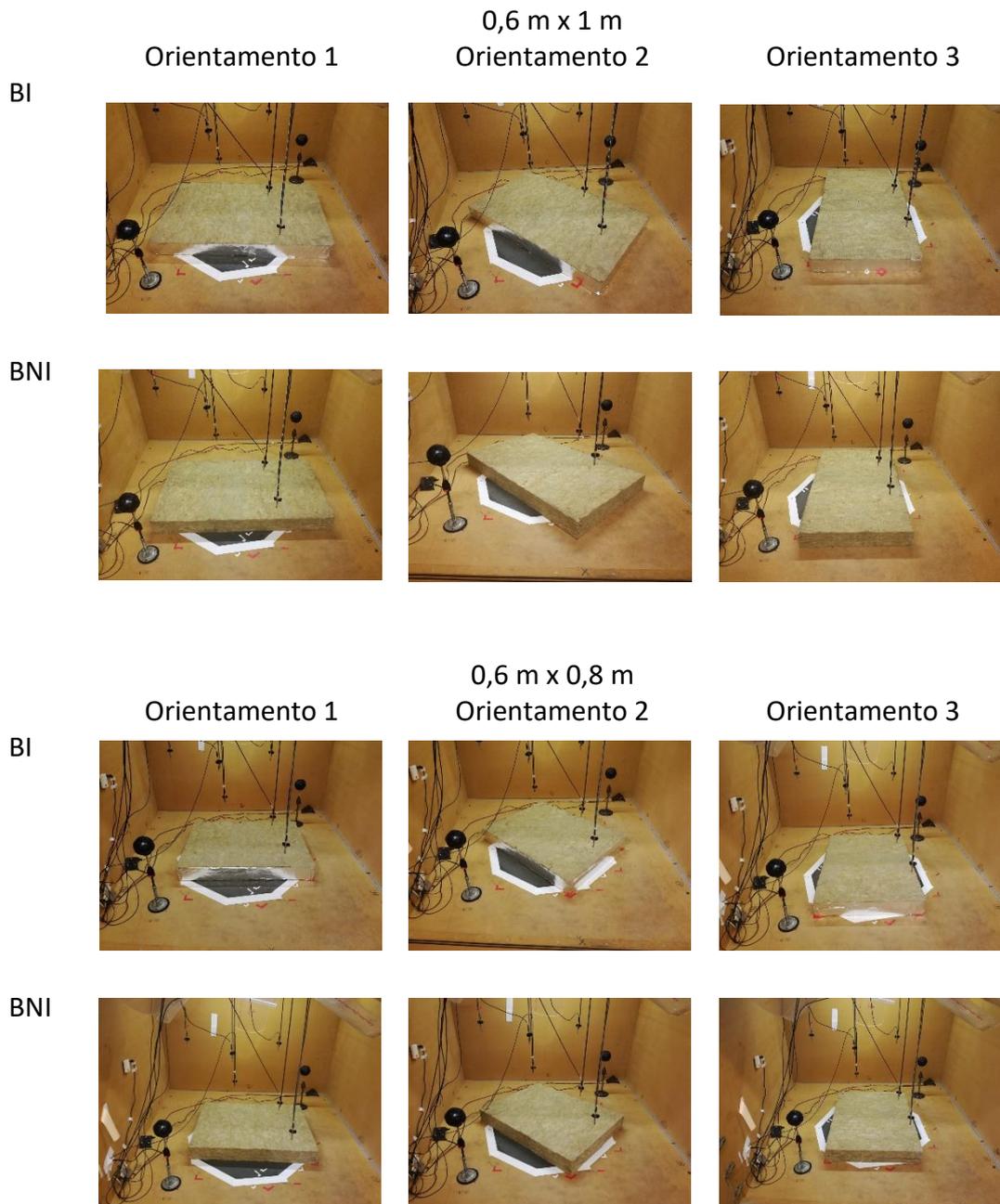
Le configurazioni testate sono le seguenti:

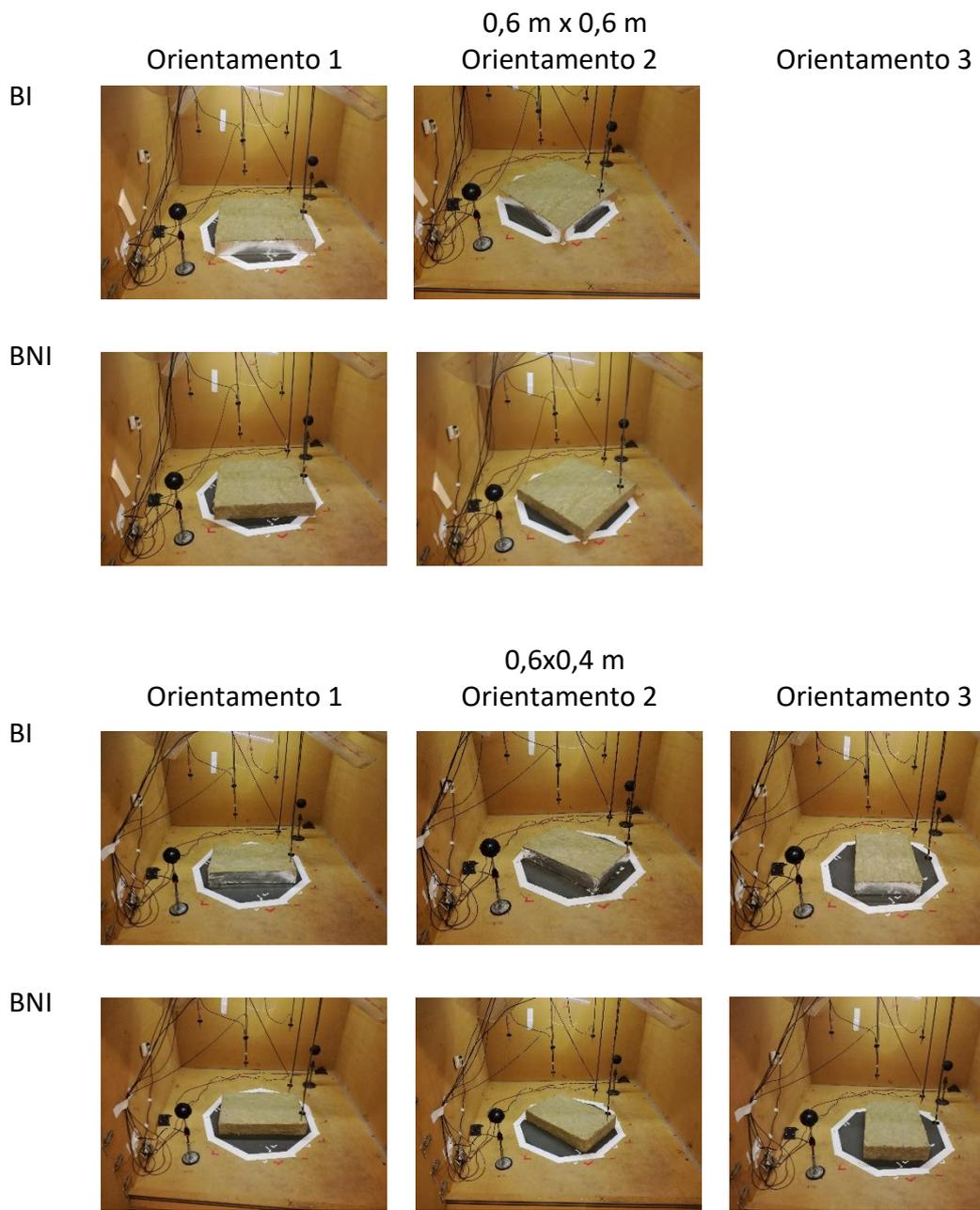
Campione	Orientamento	0.6 x 1 m	0.6 x 0.8 m	0.6 x 0.7 m	0.6 x 0.6 m ***	0.6 x 0.4 m
A	1		BI + BNI		BI + BNI	BI + BNI
	2		BI + BNI		BI + BNI	BI + BNI
	3		BI + BNI			BI + BNI
B	1		BI + BNI		BI + BNI	BI + BNI
	2		BI + BNI		BI + BNI	BI + BNI
	3		BI + BNI			BI + BNI
C**	1		BNI		BNI	BNI
	2		BNI		BNI	BNI
	3		BNI			BNI
	1	BI	BI	BI	BI	BI
D**	2	BI	BI	BI	BI	BI
	3	BI	BI	BI		BI
E	1	BI + BNI	BI + BNI		BI + BNI	BI + BNI
	2	BI + BNI	BI + BNI		BI + BNI	BI + BNI
	3	BI + BNI	BI + BNI			BI + BNI

\*BI sta per Bordi isolati BNI sta per Bordi non isolati  
 \*\* Il campione C è stato valutato solo con i bordi scoperti poiché il bordo ha spessore minimo ed è poco assorbente, il campione D è stato valutato solo con i bordi isolati poiché si tratta della sovrapposizione di due pannelli ed era indispensabile non lasciare spazi tra i due pannelli  
 \*\*\*Nella configurazione 0.6x0.6 il pannello ha forma quadrata, l'orientamento 1 (orizzontale) e l'orientamento 3 (verticale) coincidono.

Tabella 13: Schema delle configurazioni testate

Le combinazioni di setup, effettuate per ogni campione, sono riportate di seguito:





\*BI = bordi isolati, BNI = bordi non isolati

Tabella 14: Fotografie delle configurazioni testate per il campione E

## 5 Analisi e discussione dei risultati

In questo capitolo vengono illustrati i risultati dei diversi setup, confrontandoli di volta in volta con i dati della camera riverberante dell'INRiM e del tubo di Kundt.

Per poter comprendere in modo oggettivo il vasto insieme di dati si è scelto di effettuare, per ogni campione, un'analisi statistica della varianza.

### 5.1 Analisi statistica

Prima di trattare nel dettaglio l'analisi dei dati è indispensabile definire l'approccio statistico utilizzato. Si è utilizzato il software SPSS Statistics [15a], con il quale sono state eseguite delle analisi univariate fattoriali, anche dette ANOVA (ANAlis Of VAriance).

Un'analisi della varianza univariata fattoriale prevede la presenza di una sola variabile dipendente nel modello e due o più variabili indipendenti. Questa tipologia di analisi dà la possibilità di esaminare gli effetti di due o più variabili indipendenti sulla variabile dipendente, consentendo lo studio sia dell'effetto principale (l'effetto medio di una variabile indipendente sulla variabile dipendente, indipendentemente dai valori delle altre variabili indipendenti), sia dell'effetto congiunto delle variabili indipendenti sulla variabile dipendente, ovvero delle interazioni. Aumenta, quindi, la potenza del test, ovvero la probabilità di riscontrare la presenza di un effetto.

Nello specifico, i fattori valutati, cioè le variabili indipendenti, sono:

- Dimensioni del campione;
- Orientamento del campione;
- Isolamento dei bordi.

Le motivazioni alla base di queste scelte sono state presentate nel paragrafo 4.4.1.

Le variabili dipendenti valutate, invece, sono:

- Coefficienti di assorbimento acustico calcolati nella camera in scala ( $\alpha$ );
- Differenze (in valore assoluto e percentuali) tra i coefficienti calcolati nella

camera in scala e quelli di riferimento della camera dell'INRiM;

- Differenze (in valore assoluto e percentuali) tra i coefficienti calcolati nella camera in scala e quelli calcolati nel tubo di Kundt.

Nel modello dell'analisi della varianza ad ogni soggetto  $j$  nel gruppo  $i$  è assegnato un valore:

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij} \quad (5.1)$$

Dove:

$\mu$  è la media generale dei punteggi sul campione totale;

$\alpha_i$  è l'effetto dovuto al trattamento (livello  $i$  della variabile indipendente) ed è costante all'interno del trattamento;

$\varepsilon_{ij}$  è una componente "residua", o di errore causale, specifica per ogni soggetto.

La devianza rappresenta la somma dei quadrati degli scostamenti tra ogni punteggio e la media.

I diversi tipi di devianza sono:

- devianza totale (SST), è la somma dei quadrati degli scarti (differenza tra i singoli punteggi e la media generale della variabile);
- devianza tra i gruppi (o between, SSB): è la somma dei quadrati degli scarti (differenza tra i punteggi medi di gruppo e la media generale), ovvero alla variabilità tra i diversi gruppi;
- devianza entro i gruppi (o within, SSW): è la somma dei quadrati degli scarti tra i punteggi di ogni soggetto e la relativa media di gruppo, ovvero alla variabilità dei soggetti all'interno di ogni gruppo.

Dividendo le devianze per i rispettivi gradi di libertà si ottengono le varianze

- Varianza totale (MST) = devianza totale /  $n-1$ ;
- Varianza tra i gruppi (MSB) = devianza tra i gruppi /  $k-1$ ;
- Varianza entro i gruppi (MSW) = devianza entro i gruppi /  $n-k$ .

Il rapporto tra MSB e MSW è utilizzato per esaminare le ipotesi sulla significatività della variabile indipendente in esame, le ipotesi da verificare sono:

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$  (ipotesi nulla)

$H_1$ : almeno due  $\mu$  diverse.

Da queste analisi si ricava quindi il valore di significatività statistica per ogni fattore, che indica la probabilità che l'ipotesi nulla sia vera. Se il valore di significatività è sufficientemente piccolo ( $< 0.05$ ), si può affermare che l'ipotesi nulla è falsa, cioè c'è almeno una coppia di medie la cui differenza è statisticamente significativa e quindi il fattore analizzato influenza le misure.

Successivamente alle analisi sono stati effettuati dei confronti multipli (detti test post-hoc) sulle variabili risultate significative nell'analisi precedente.

I dati rilevanti delle analisi statistiche vengono illustrati riportando i valori della statistica F, in funzione dei gradi di libertà (gdl) e dell'errore del modello (err), e i valori di significatività (indicati con "p").

## 5.2 Presentazione dei risultati

Si discutono i risultati delle misure e delle analisi statistiche.

I grafici riportati nei seguenti paragrafi sono relativi ai valori di  $\alpha$  calcolati nella camera riverberante in scala esaminata. Per ogni grafico vengono riportati i valori di riferimento di  $\alpha$  calcolati nella camera riverberante 1:1 dell'INRiM, indicati con "Camera 1:1", e nel tubo di Kundt, indicati con "Tubo", e le relative incertezze rappresentate dalle barre di errore (ricavate seguendo la ISO-12999 per quanto riguarda le misure in camera riverberante e dalla deviazione standard per le misure nel tubo). Vengono inoltre rappresentate le curve dei coefficienti  $\alpha$  nel tubo corretti con il modello Spagnolo-Benedetto, indicato con "Tubo S-B". Il modello è stato applicato per trasformare i coefficienti ad incidenza normale del tubo in coefficienti ad incidenza casuale. Le curve di  $\alpha$  "Camera" e  $\alpha$  "Tubo S-B" sono quasi coincidenti. Per  $\alpha$  "Tubo S-B" non si riportano le incertezze.

### 5.2.1 Prima analisi: $\alpha$

La prima fase delle analisi è stata effettuata valutando il coefficiente di assorbimento come variabile dipendente e come variabili indipendenti frequenza (per mantenere

separate le diverse bande), dimensioni e orientamento. Il trattamento del bordo, in questa fase, viene trascurato per consentire un maggiore grado di libertà nel modello.

### **5.2.1.1 Effetto dell'orientamento**

Da questa prima analisi si evince che l'orientamento non è statisticamente significativo ( $p > 0,05$ ):

- Campione A  $\rightarrow F(2, 162) = 1,086$ ;  $p = 0,340$ ;
- Campione B  $\rightarrow F(2, 162) = 0,738$ ;  $p = 0,480$ ;
- Campione C  $\rightarrow F(2, 108) = 0,137$ ;  $p = 0,872$ ;
- Campione D  $\rightarrow F(2, 216) = 0,368$ ;  $p = 0,692$ ;
- Campione E  $\rightarrow F(2, 216) = 0,170$ ;  $p = 0,844$ .

Questo significa che le differenze dovute alle diverse posizioni del campione sono minime. Si può quindi scegliere di tenere il pannello orientato in modo obliquo (Orientamento 2), come prevede lo standard, o di calcolare i coefficienti di assorbimento per tutti e tre gli orientamenti e poi mediarli, per avere un risultato che tiene in considerazione le variazioni del campo, non perfettamente diffuso, della camera.

### **5.2.1.2 Effetto della dimensione**

La variabile dimensione, invece, risulta statisticamente significativa per tutti i campioni eccetto il campione C (pannello di intonaco, spessore = 1,5 cm):

- Campione A  $\rightarrow F(2, 162) = 30,351$ ;  $p = 0,000$ ;
- Campione B  $\rightarrow F(2, 162) = 25,351$ ;  $p = 0,000$ ;
- Campione C  $\rightarrow F(2, 108) = 1,354$ ;  $p = 0,263$ ;
- Campione D  $\rightarrow F(4, 180) = 62,153$ ;  $p = 0,000$ ;
- Campione E  $\rightarrow F(3, 216) = 4,294$ ;  $p = 0,006$ .

Questa eccezione è probabilmente riconducibile allo spessore minimo di questo campione: le dimensioni ridotte dello spessore comportano una minore diffrazione

da parte dei bordi ed una modifica minore del campo diffuso in prossimità dei microfoni.

Si riportano di seguito i grafici delle misure dei cinque campioni che mostrano l'andamento di  $\alpha$  per le diverse configurazioni di dimensioni.

I coefficienti misurati nel tubo relativi al campione E sono stati ricavati tramite il modello Delany-Bazley a partire dai valori di impedenza misurati nel tubo. Per questo motivo non vengono riportate le barre di errore relative ad  $\alpha$  "Tubo".

Inoltre, la scala del campione E è differente dalle precedenti, poiché i valori calcolati per questo materiale raggiungono valori maggiori di 1,6.

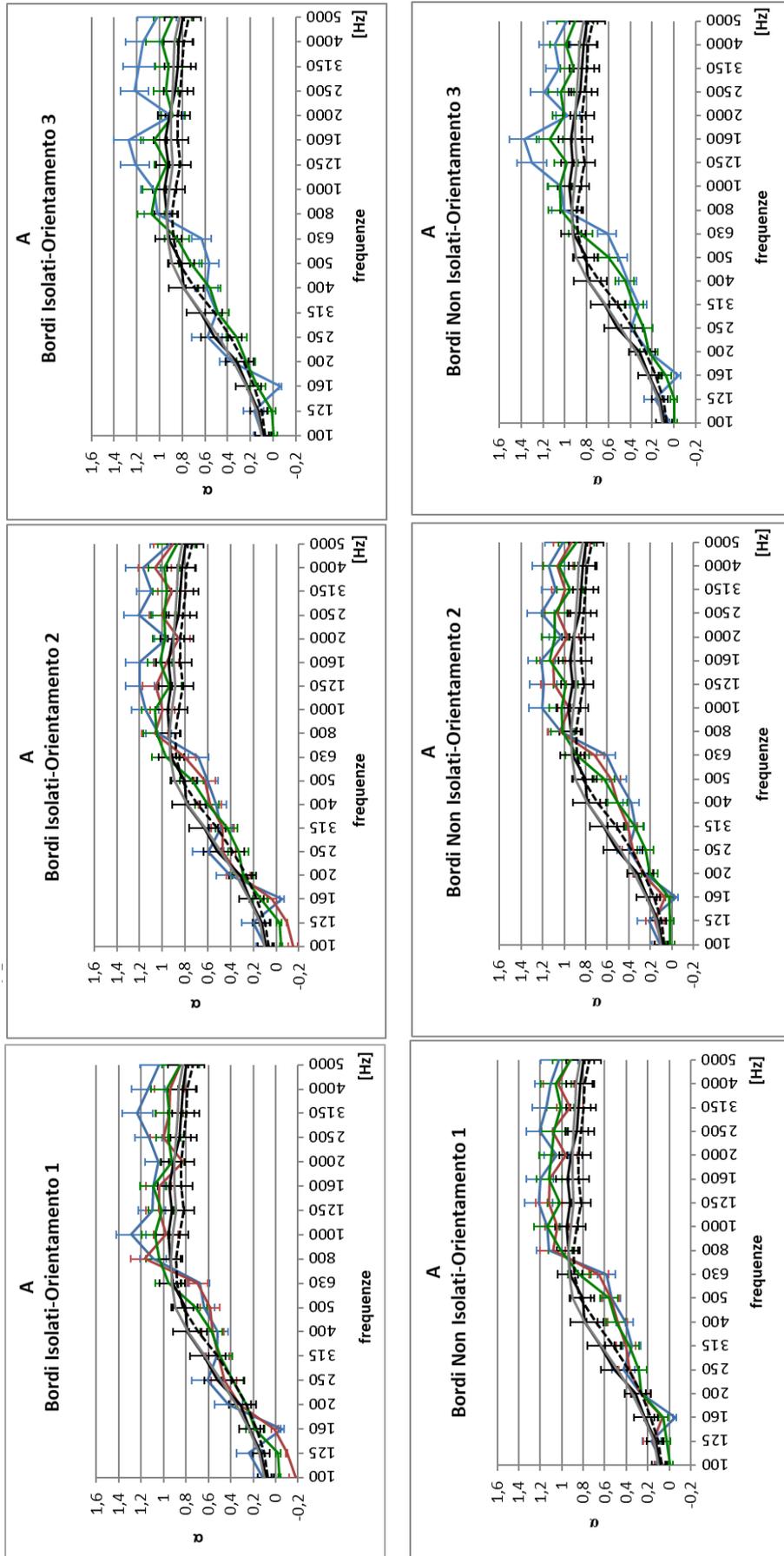


Figura 62: Grafici di  $\alpha$  in funzione della frequenza per il campione A nelle diverse configurazioni (confronto delle dimensioni)

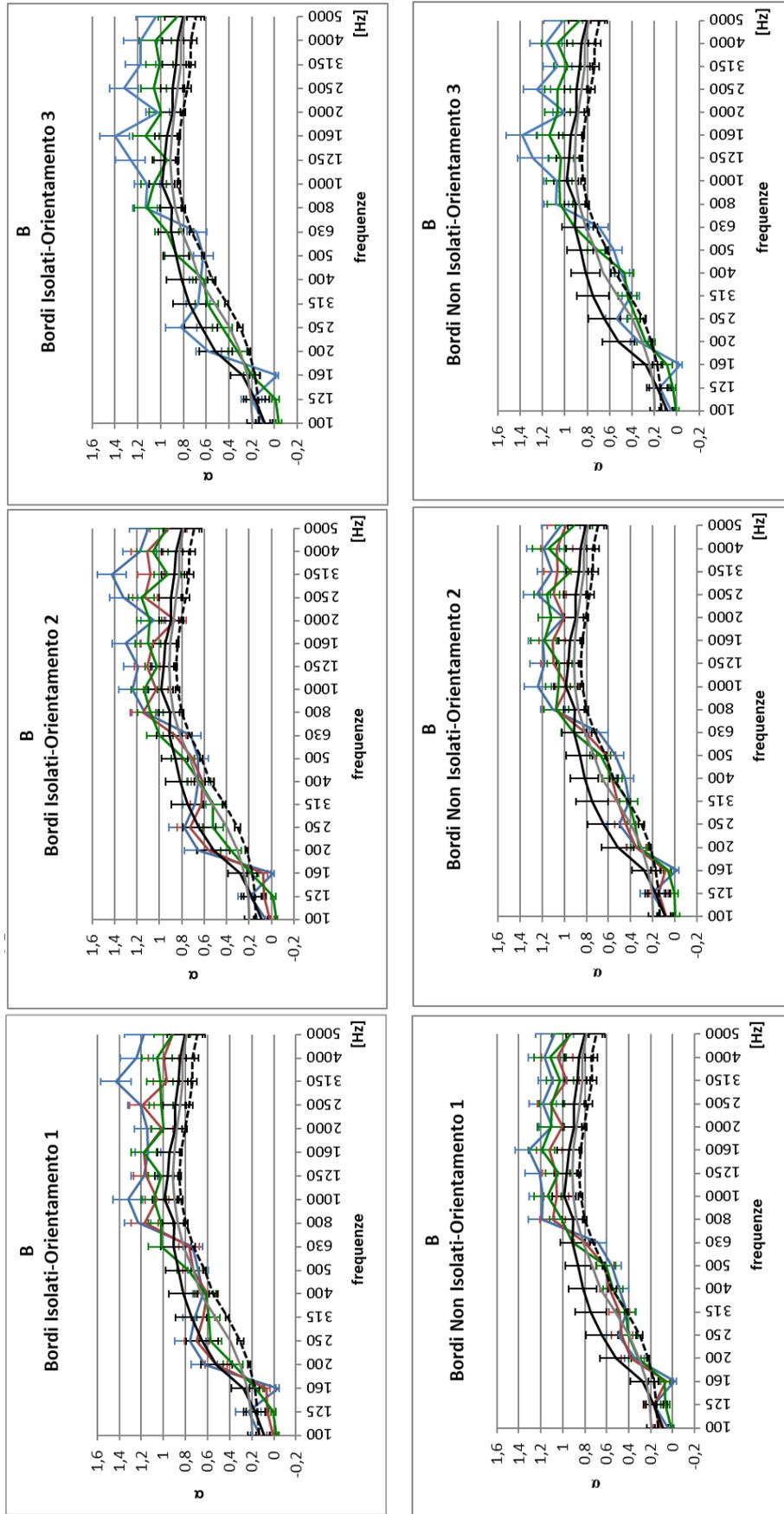


Figura 63: Grafici di  $\alpha$  in funzione della frequenza per il campione B nelle diverse configurazioni (confronto delle dimensioni)

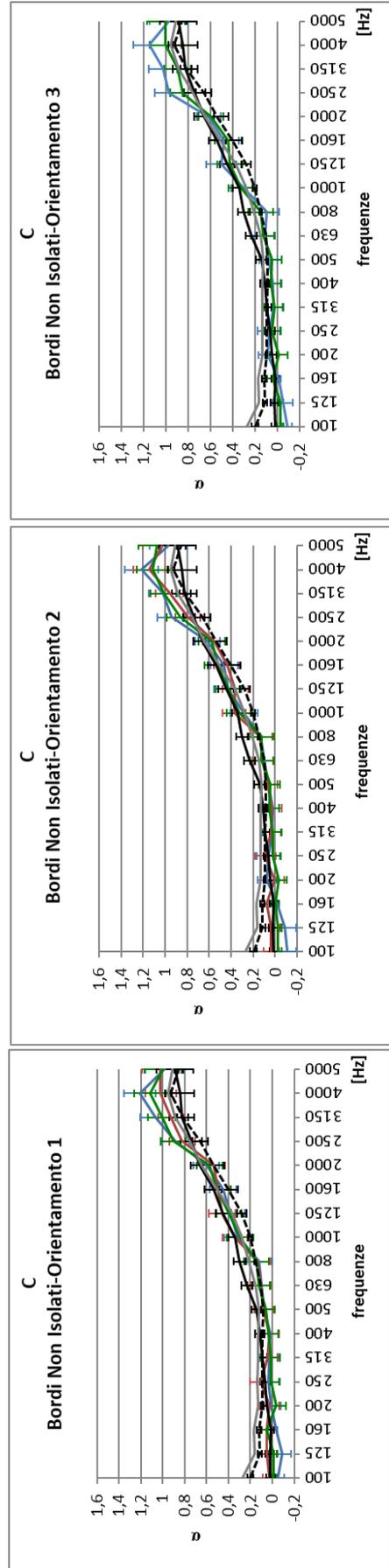


Figura 64: Grafici di  $\alpha$  in funzione della frequenza per il campione C nelle diverse configurazioni (confronto delle dimensioni)

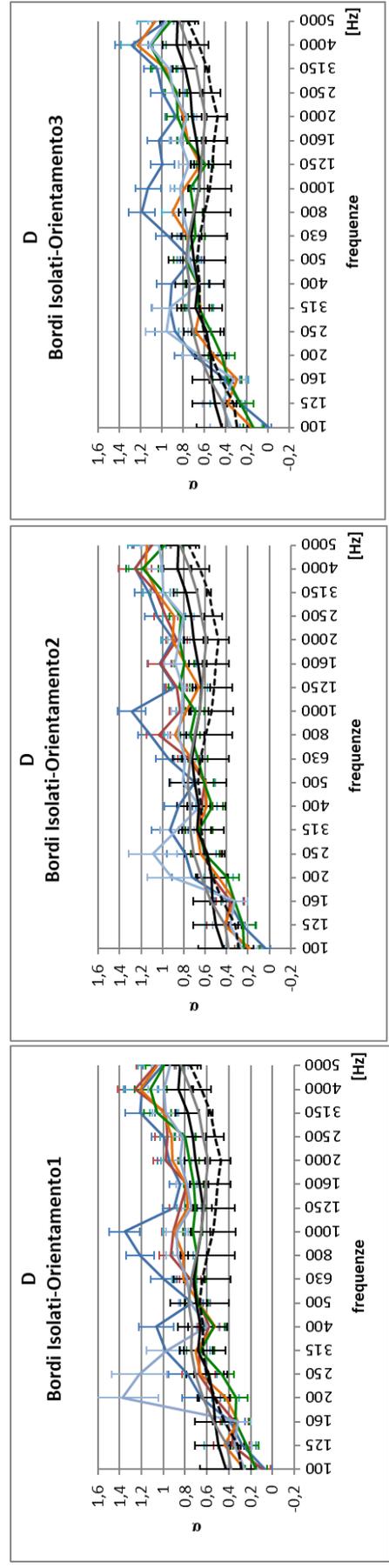


Figura 65: Grafici di  $\alpha$  in funzione della frequenza per il campione D nelle diverse configurazioni (confronto delle dimensioni)

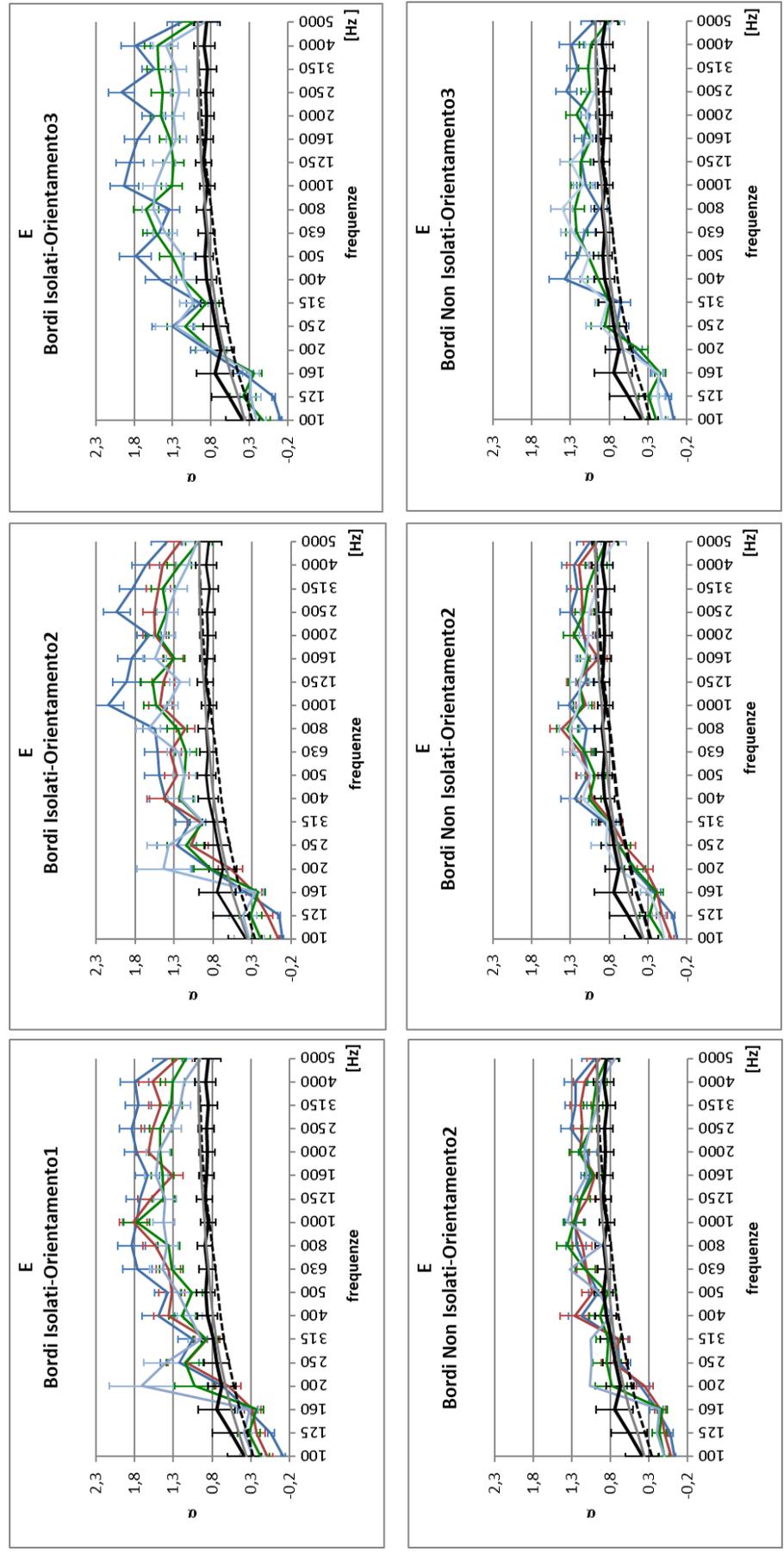
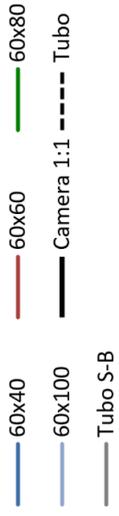


Figura 66: Grafici di  $\alpha$  in funzione della frequenza per il campione E nelle diverse configurazioni (confronto delle dimensioni)

Dai grafici si evince che l'andamento è meno variabile per i campioni con spessori più bassi (spessore A = 4 cm e spessore C = 1,5 cm), al contrario sono presenti maggiori irregolarità quanto più lo spessore aumenta (spessore B = 5 cm, spessore D = 7 cm, spessore E = 10 cm).

In generale si può notare che la dimensione 60x40, cioè la più piccola, si distanzia in modo particolare dalle altre dimensioni in tutti i campioni misurati. Ulteriori analisi su quali siano le dimensioni ottimali saranno svolte nelle analisi menzionate successivamente, basate sulla differenza tra i risultati ottenuti e quelli di riferimento.

### **5.2.1.3 Effetto dei bordi**

Poiché l'orientamento è una variabile statisticamente non significativa, si effettuano le analisi successive non considerando questa variabile, prendendo in considerazione, invece, il trattamento dei bordi e le dimensioni. Ciò significa che i dati relativi all'orientamento vengono "collassati" in un unico gruppo.

I campioni C e D non vengono riportati in questa fase poiché su questi non sono stati trattati i bordi nei due metodi differenti, come spiegato nelle note della Tabella 13.

Nel campione A l'effetto dei bordi ( $F(1, 216) = 2,621$ ;  $p = 0,107$ ) non è significativo.

Nel campione B sia i bordi ( $F(1, 216) = 127,806$ ;  $p = 0,000$ ) che le dimensioni ( $F(2, 216) = 90,605$ ;  $p = 0,000$ ) sono variabili statisticamente significative. Si nota, nei confronti multipli, che le dimensioni 60x80 e 60x60 sono statisticamente diverse dalla dimensione 60x40:

- 60x40 confrontato con 60x60 →  $p = 0,000$ ;
- 60x40 confrontato con 60x80 →  $p = 0,000$ ;
- 60x60 confrontato con 60x80 →  $p = 0,989$ .

Nel campione E l'effetto dei bordi risulta significativo ( $F(1, 288) = 859,723$ ;  $p = 0,000$ ), mentre le dimensioni ( $F(3, 288) = 24,888$ ;  $p = 0,000$ ) danno tutte valori statisticamente compatibili, eccetto la dimensione 60x40. I valori di  $p$  per i confronti a coppie sono i seguenti:

- 60x40 confrontato con 60x60  $\rightarrow p=0,000$ ;
- 60x40 confrontato con 60x80  $\rightarrow p=0,000$ ;
- 60x40 confrontato con 60x100  $\rightarrow p=0,000$ ;
- 60x60 confrontato con 60x80  $\rightarrow p=0,644$ ;
- 60x60 confrontato con 60x100  $\rightarrow p=1,000$ ;
- 60x80 confrontato con 60x100  $\rightarrow p=0,622$ .

Si nota che l'effetto del bordo risulta poco significativo solo per il campione A, che rappresenta tra i tre quello con spessore minore (40 mm).

Si riportano di seguito i riferimenti grafici relativi all'andamento di  $\alpha$  con bordi isolati (BI) e bordi non isolati (BNI).

— BI      — BNI      — Camera 1:1  
- - - Tubo      — Tubo S-B

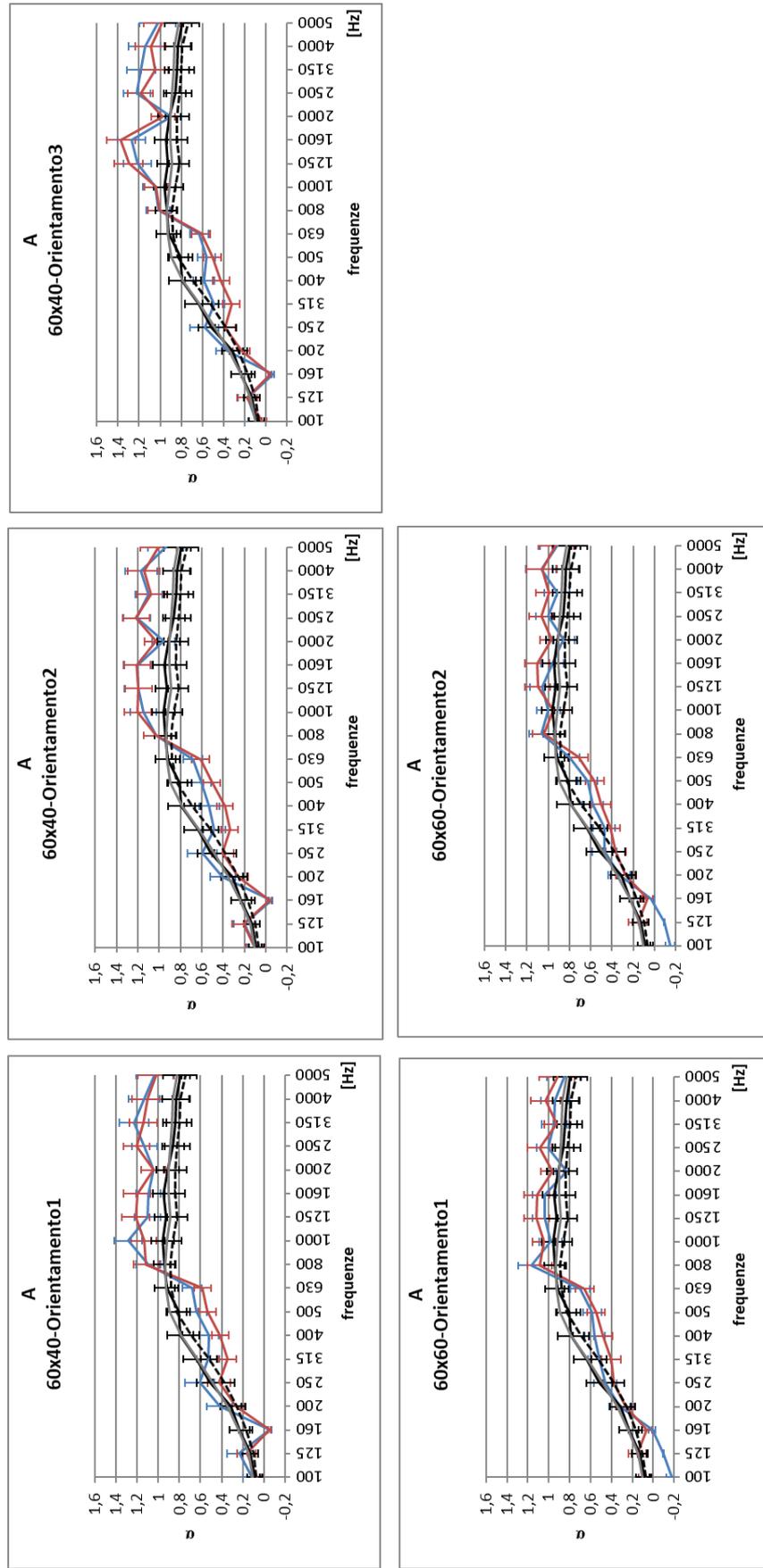


Figura 67: Grafici di  $\alpha$  in funzione della frequenza per il campione A nelle diverse configurazioni (confronto del trattamento bordi) (pt.1)

— BI      — BNI      — Camera 1:1  
- - - Tubo      — Tubo S-B

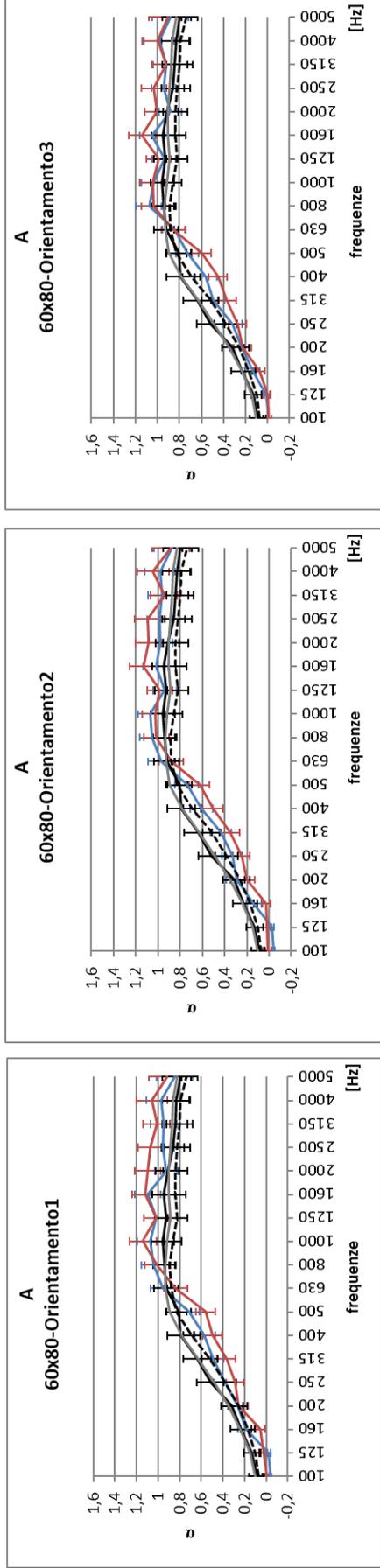


Figura 68: Grafici di  $\alpha$  in funzione della frequenza per il campione A nelle diverse configurazioni (confronto del trattamento bordi) (pt.2)

— BI      — BNI      — Camera 1:1  
- - - Tubo      — Tubo S-B

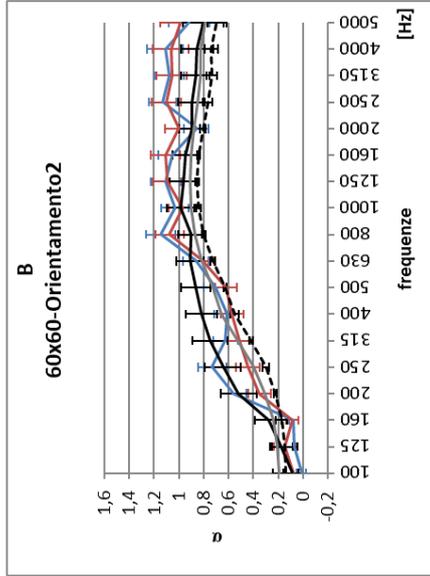
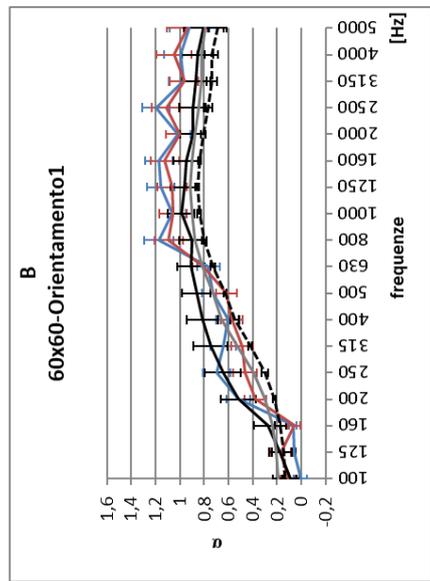
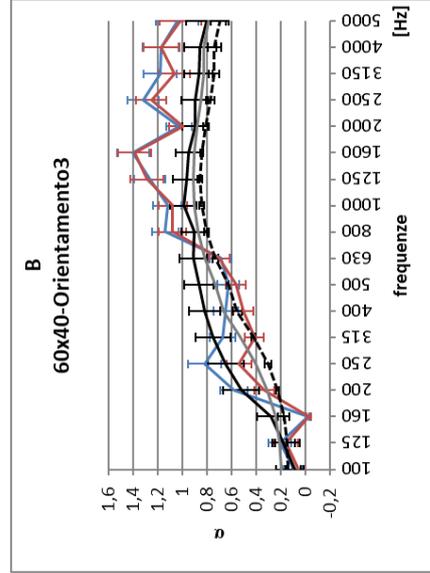
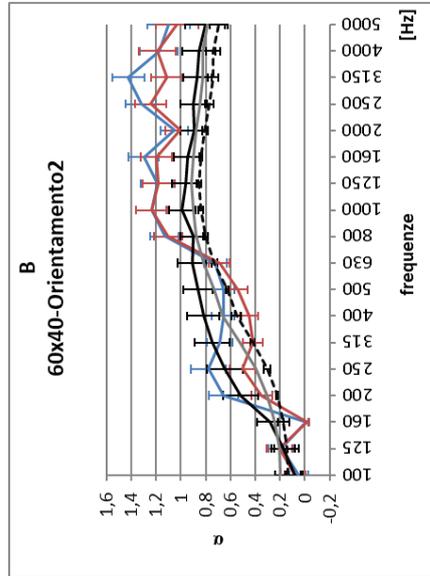
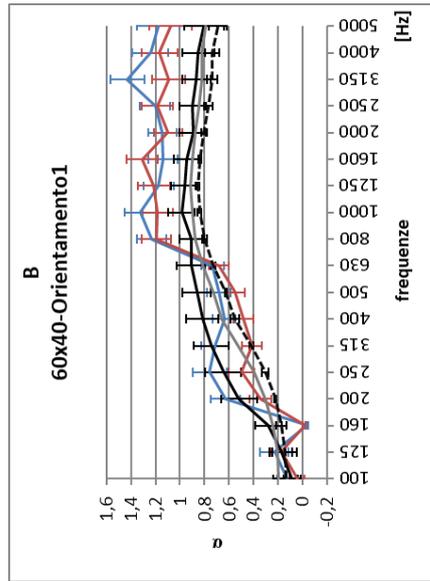


Figura 69: Grafici di  $\alpha$  in funzione della frequenza per il campione B nelle diverse configurazioni (confronto del trattamento bordi) (pt.1)

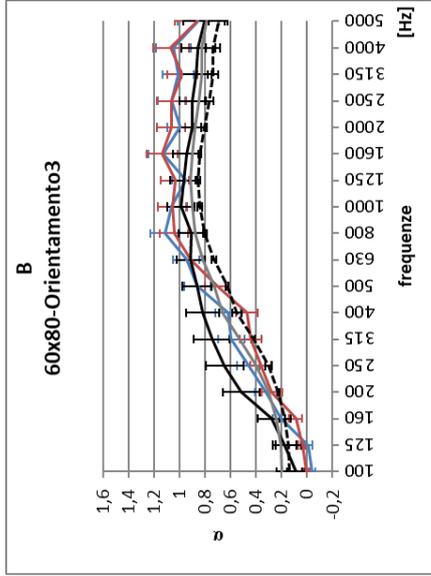
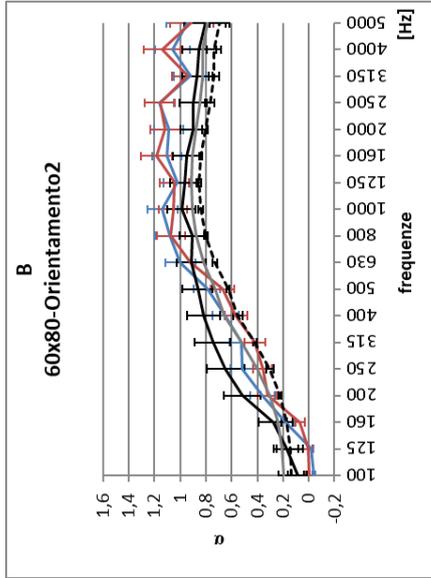
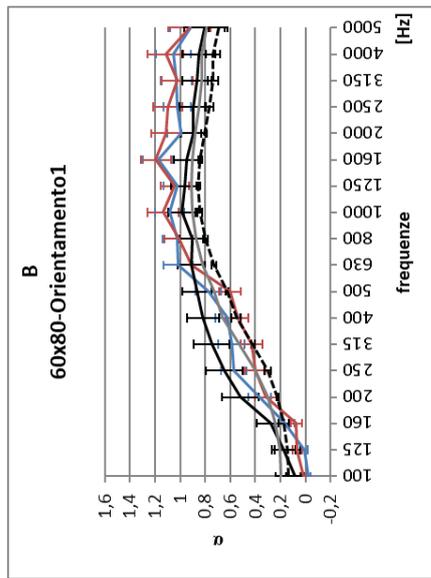
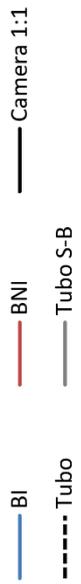


Figura 70: Grafici di  $\alpha$  in funzione della frequenza per il campione B nelle diverse configurazioni (confronto del trattamento bordi) (pt.2)

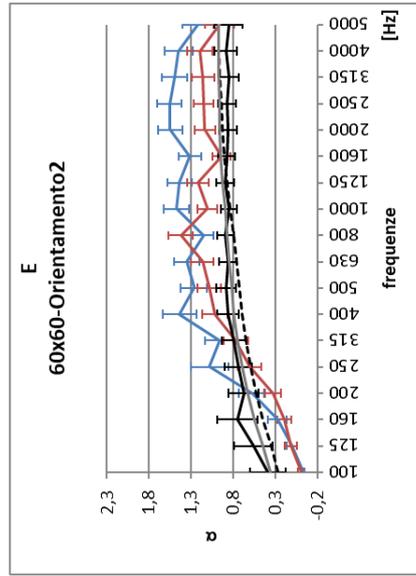
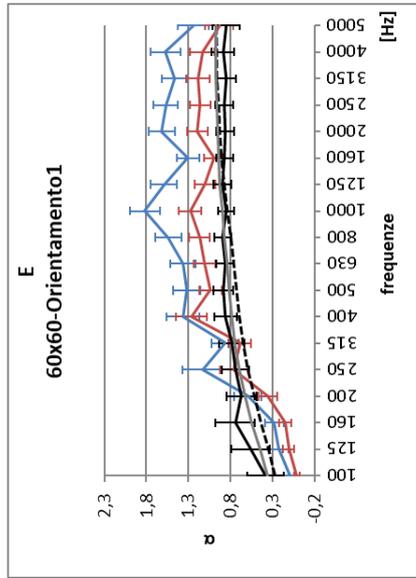
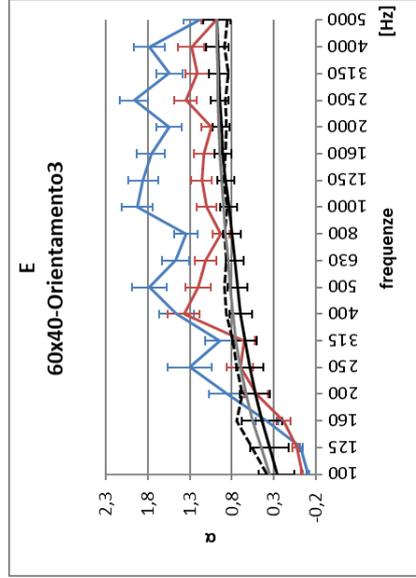
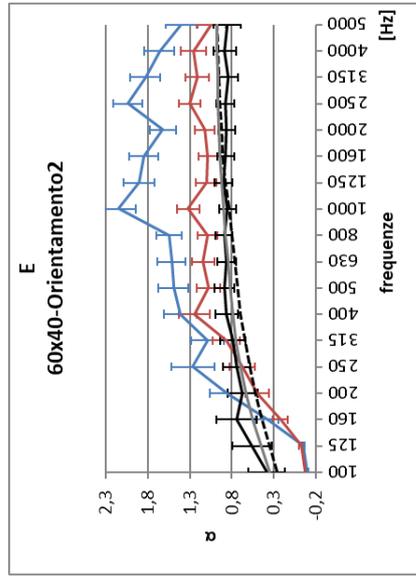
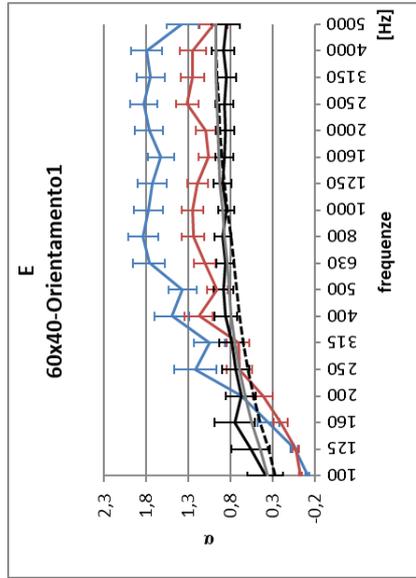
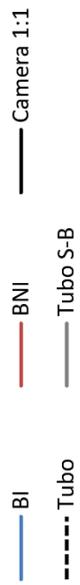


Figura 71: Grafici di  $\alpha$  in funzione della frequenza per il campione E nelle diverse configurazioni (confronto del trattamento bordi) (pt.1)

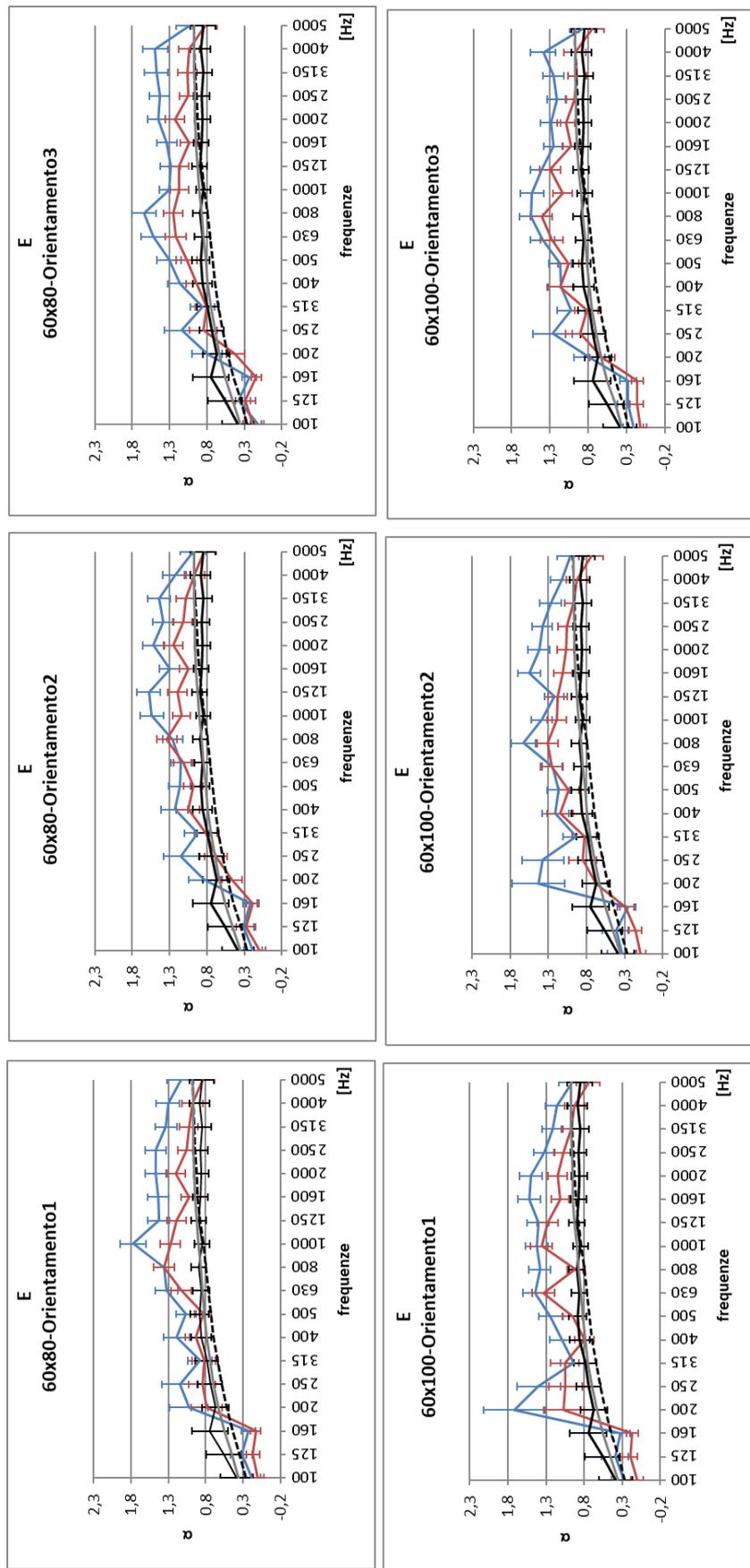
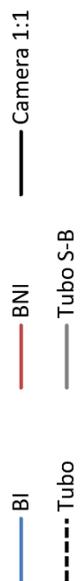


Figura 72: Grafici di  $\alpha$  in funzione della frequenza per il campione E nelle diverse configurazioni (confronto del trattamento bordi) (pt.2)

## 5.2.2 Seconda analisi: differenza con la camera 1:1

Dopo aver analizzato gli effetti statistici dei fattori sui valori di  $\alpha$ , sono state eseguite ulteriori analisi volte a comprendere quali delle configurazioni valutate portano a risultati più vicini a quelli della camera riverberante 1:1. Per questa fase si è quindi considerata come variabile dipendente la differenza, in valore assoluto, tra  $\alpha$  misurato nella camera in scala e  $\alpha$  misurato nella camera 1:1.

Le analisi condotte sulle differenze confermano i risultati riguardo alle influenze dei fattori orientamento e dimensioni.

### 5.2.2.1 Effetto dell'orientamento

L'orientamento non influenza significativamente i risultati. Si può notare, in aggiunta, che l'orientamento 1 (orizzontale sul pavimento) comporta un aumento, seppur minimo, delle differenze in quasi tutti i campioni. L'unica eccezione è il campione C, in cui si hanno differenze minime. L'orientamento 1 rappresenta quindi la scelta meno adatta.

Si riportano di seguito i confronti tra gli orientamenti, divisi in sottoinsiemi diversi in base al valore della media del sottoinsieme: medie maggiori rappresentano differenze maggiori rispetto al riferimento della camera 1:1.

- Campione A
  - Orientamento 1: Sottoinsieme 1, Media = 0,164;
  - Orientamento 2: Sottoinsieme 1, Media = 0,157;
  - Orientamento 3: Sottoinsieme 1, Media = 0,158;
  
- Campione B
  - Orientamento 1: Sottoinsieme 1, Media = 0,179;
  - Orientamento 2: Sottoinsieme 1, Media = 0,178;
  - Orientamento 3: Sottoinsieme 1, Media = 0,170;

- Campione C
  - Orientamento 1: Sottoinsieme 1, Media = 0,090;
  - Orientamento 2: Sottoinsieme 1, Media = 0,094;
  - Orientamento 3: Sottoinsieme 1, Media = 0,817;
  
- Campione D
  - Orientamento 1: Sottoinsieme 1, Media = 0,188;
  - Orientamento 2: Sottoinsieme 1, Media = 0,181;
  - Orientamento 3: Sottoinsieme 1, Media = 0,163;
  
- Campione E
  - Orientamento 1: Sottoinsieme 1, Media = 0,384;
  - Orientamento 2: Sottoinsieme 1, Media = 0,373;
  - Orientamento 3: Sottoinsieme 1, Media = 0,372.

### **5.2.2.2 Effetto delle dimensioni**

Per quanto riguarda le dimensioni, si può constatare che 60x40, oltre a distaccarsi dai valori delle altre dimensioni, porta a risultati di differenze maggiori ed è quindi da escludere.

Si riportano di seguito i confronti tra le dimensioni, divisi in sottoinsiemi diversi in base al valore della media del sottoinsieme calcolata. Medie maggiori rappresentano differenze maggiori.

- Campione A
  - Dimensione 60x40: Sottoinsieme 2, Media = 0,204;
  - Dimensione 60x60: Sottoinsieme 1, Media = 0,143;
  - Dimensione 60x80: Sottoinsieme 1, Media = 0,131;

- Campione B
  - Dimensione 60x40: Sottoinsieme 2, Media = 0,226;
  - Dimensione 60x60: Sottoinsieme 1, Media = 0,14;
  - Dimensione 60x80: Sottoinsieme 1, Media = 0,155;
  
- Campione C
  - Dimensione 60x40: Sottoinsieme 2, Media = 0,103;
  - Dimensione 60x60: Sottoinsieme 1, Media = 0,077;
  - Dimensione 60x80: Sottoinsieme 1, Media = 0,086;
  
- Campione D
  - Dimensione 60x40: Sottoinsieme 4, Media = 0,278;
  - Dimensione 60x60: Sottoinsieme 2 e 3, Media = 0,170;
  - Dimensione 60x70: Sottoinsieme 1 e 2, Media = 0,140;
  - Dimensione 60x80: Sottoinsieme 1, Media = 0,123;
  - Dimensione 60x100: Sottoinsieme 3, Media = 0,174;
  
- Campione E
  - Dimensione 60x40: Sottoinsieme 2, Media = 0,480;
  - Dimensione 60x60: Sottoinsieme 1, Media = 0,381;
  - Dimensione 60x80: Sottoinsieme 1, Media = 0,320;
  - Dimensione 60x100: Sottoinsieme 1, Media = 0,325.

In generale, si nota che i valori delle differenze per il campione E sono i più alti, dato interessante poiché si tratta del campione con spessore maggiore (10 cm). Mentre quello che presenta differenze minime è il campione C, ossia il pannello con spessore minore (1,5 cm).

Per ciascun campione è stato valutato anche l'andamento della differenza percentuale, ossia  $\frac{\Delta\alpha}{\alpha_{camera\ 1:1}} \times 100$ . L'utilità della differenza relativa percentuale è quella di confrontare l'errore direttamente con i valori misurati, in questo modo si

può interpretare velocemente quanto l'errore è grande, dunque se è più o meno tollerabile.

Confrontando i risultati, si può concludere che, per lo stesso materiale e per le misure nella stessa configurazione, alle frequenze più basse (< 400 Hz) si verificano differenze fino al 400% e alle frequenze medie e alte le differenze si abbassano a livelli minori del 50%. Escludendo le configurazioni con dimensioni 60x100 e 60x40 i limiti degli errori scendono sotto il 40%.

### **5.2.2.3 Effetto dei bordi**

Ulteriori considerazioni vanno fatte includendo il fattore di isolamento dei bordi.

Per il campione A, in questo caso, il trattamento dei bordi modifica significativamente i risultati (  $F(1, 216) = 61,240$ ;  $p = 0,000$  ): si nota che, per tutte le dimensioni testate, le misure con il bordo non isolato forniscono risultati più distanti da quelli di riferimento:

- Media bordi isolati = 0,396;
- Media bordi non isolati = 0,410.

Il campione B presenta differenze minori nelle configurazioni "Bordi non isolati-60x60" e "Bordi non isolati-60x40", nella 60x80, invece, i risultati delle misure con bordi isolati si confermano migliori. Escludendo quindi i risultati riguardanti la configurazione 60x40, non è possibile concludere quale sia la configurazione dei bordi migliore. Le differenze restano comunque minime.

Per quanto riguarda il campione E, si nota che le dimensioni con differenze minori e confrontabili risultano le maggiori (60x100 e 60x80), mentre la dimensione minore (60x40) è quella con valori più distanti da quelli di riferimento.

Il fattore bordo risulta significativo: si nota un netto miglioramento dei risultati nelle misure effettuate con i bordi scoperti rispetto a quelle con i bordi isolati:

- Media bordi isolati = 0,247;
- Media bordi non isolati = 0,152.

Questa condizione è probabilmente legata all'errore generato dallo spessore particolarmente grande del pannello: gli errori legati ai bordi generano un assorbimento fittizio, quindi valori di  $\alpha$  calcolati molto più alti di 1.

In questo caso, quindi, l'assorbimento dei bordi lasciati scoperti riesce a contrastare gli effetti dovuti alla diffrazione abbassando i valori calcolati.

Nei risultati, in particolare nelle configurazioni 60x100, si notano picchi particolarmente importanti nella banda centrata a 200 Hz (Figura 72). I picchi sono particolarmente accentuati nell'orientamento 1. La ragione può essere la fissazione parallela di due bordi del materiale rispetto a due delle pareti laterali della camera riverberante che genera effetti di diffrazione tra essi. Isolando i bordi, infatti, questo effetto sembra attenuarsi. L'errore resta comunque trascurabile, dal momento che le misure si considerano valide per frequenze maggiori di 400 Hz.

### 5.2.3 Terza analisi: differenza con il tubo

Poiché l'andamento delle curve di  $\alpha$  misurato in camera 1:1 e  $\alpha$  misurato nel tubo di Kundt sono molto simili, valutare le differenze con i valori calcolati nel tubo come variabile dipendente non apporta nessuna informazione aggiunta alle analisi statistiche sui fattori influenti. È però interessante notare che i valori calcolati nella camera in scala si avvicinano di più ai valori del tubo per le frequenze più basse (< 400 Hz), cioè ai valori di assorbimento ad incidenza normale.

Per mostrare graficamente questo comportamento si fa riferimento ai grafici in Figura 73, in cui vengono riportati, per tutte le frequenze, i valori delle differenze  $|\alpha_{camera\ in\ scala} - \alpha_{camera\ 1:1}|$  e  $|\alpha_{camera\ in\ scala} - \alpha_{tubo}|$ . Per comodità si riportano solo i grafici riferiti all'orientamento 2, per le dimensioni 60x80, con bordi isolati (ad eccezione del campione C in cui si sono effettuate le misure solo con i bordi non isolati).

— |  $\alpha_{\text{camera}}$  in scala- $\alpha_{\text{camera}}1:1$  |  
 — |  $\alpha_{\text{camera}}$  in scala- $\alpha_{\text{tubo}}$  |

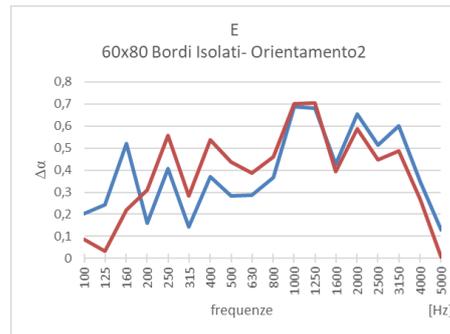
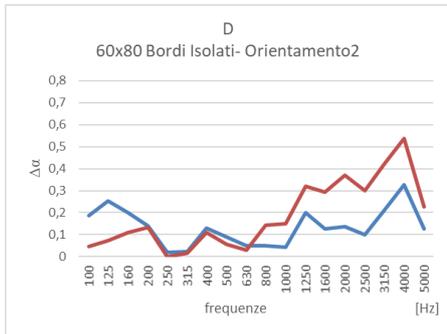
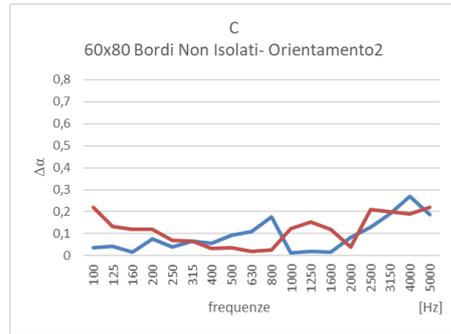
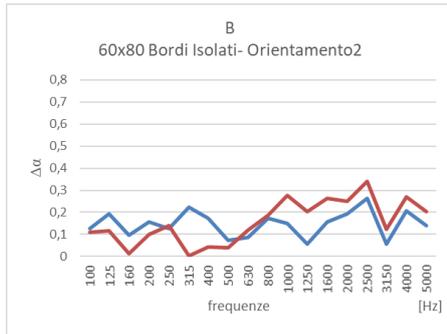
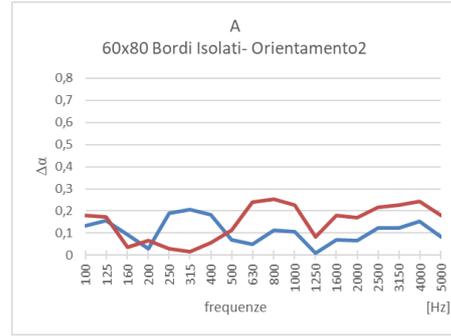


Figura 73: Confronti di  $\Delta\alpha$  per i cinque campioni

Le eccezioni a questo comportamento sono il campione C, per cui entrambe le differenze sono minime, e il campione E, in cui si verificano errori molto alti dovuti allo spessore e per cui si hanno coefficienti calcolati nel tubo tramite Delany-Bazley [32].

## 6 Diffrazione per l'effetto bordo

Come già anticipato, uno degli effetti da tenere in considerazione in una camera riverberante di dimensioni ridotte è quello dell'effetto bordo. Si tratta della diffrazione delle onde sonore sui bordi del campione di materiale poroso, da cui deriva un calcolo inaccurato dei coefficienti di assorbimento acustico [35].

Lo studio del 2008 di De Bruijn [35] ha messo in evidenza il fenomeno simulando matematicamente il campo generato dalle riflessioni dell'onda sonora incidente sulla superficie fonoassorbente. Si riporta un'immagine particolarmente esplicativa del fenomeno (Figura 74) in cui è possibile vedere l'andamento dell'onda in prossimità dei bordi del materiale, che si comportano come due fonti di energia.

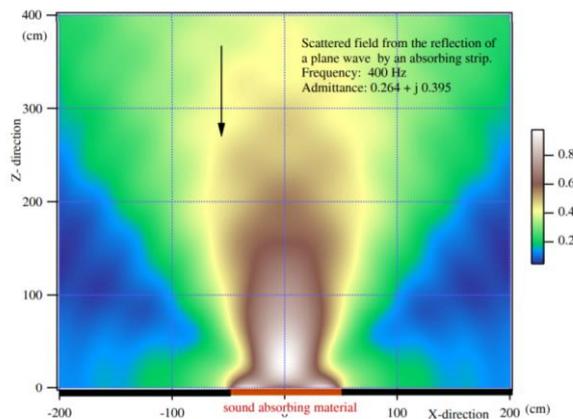


Figura 74: Campo scatterizzato simulato su una striscia di materiale assorbente [35]

L'assorbimento addizionale dovuto alla diffrazione aumenta all'aumentare dell'angolo di incidenza dell'onda.

Il rapporto tra il perimetro e la superficie del campione, detto rapporto perimetrale ( $E$ ), influenza il coefficiente di assorbimento in base alla seguente relazione sperimentale [36]:

$$\alpha = \alpha_{\infty} + \beta * E \quad (5.2)$$

dove:

$\alpha$  = coefficiente di assorbimento misurato per il campione;

$\alpha_{\infty}$  = coefficiente di assorbimento per un campione di dimensioni infinite, ossia non influenzato dagli effetti di bordo;

$\beta$  = Costante che dipende dal materiale misurato e dalla frequenza.

Questa formula indica che più piccolo è il campione, maggiore è l'effetto del bordo: nelle camere riverberanti grandi con campioni grandi,  $E$  è circa  $1,2 \text{ m}^{-1}$  e l'effetto di bordo dovuto alla diffrazione viene trascurato. Nelle camere riverberanti in scala come quella descritta, per un campione di  $0,5 \text{ m}^2$ , il rapporto perimetrale  $E$  è maggiore di  $5 \text{ m}^{-1}$  e porta ad un effetto di bordo che non può più essere trascurato. Dalla formula (5.2) è, però, evidente che, conoscendo il valore di  $\beta$  per ogni banda di frequenza, è possibile correggere il valore di  $\alpha$  misurato trovando il valore di  $\alpha_{\infty}$ , ossia l'assorbimento di un campione di dimensioni ipoteticamente infinite.

## 6.1 Studio nella camera riverberante in scala

In questo lavoro sono state, dunque, effettuate delle misure per cercare di comprendere come il valore di  $E$  influenzasse i coefficienti di assorbimento nella camera in esame. La valutazione è stata effettuata sul campione A.

Sono state effettuate cinque misure dello stesso materiale con cinque configurazioni diverse (valori di  $E$  diversi). Per fare ciò si sono effettuate le misure del campione suddividendolo, di volta in volta, in più parti e posizionandole in maniera ravvicinata: in questo modo si mantiene l'area costante di  $0,48 \text{ m}^2$ , ma si aumenta il perimetro totale del campione, aumentando così il valore di  $E$ .

Dagli studi condotti negli anni sugli effetti di  $E$  in camere riverberanti, si è concluso che ad influenzare i valori di  $\alpha$  sono, chiaramente, anche le distanze tra i diversi pezzi del campione [37]: il grafico della Figura 75 indica i coefficienti di assorbimento misurati per due campioni rettangolari di  $1,2 \times 3,7 \text{ m}$  dello stesso materiale collocati al centro della stanza con tutti i bordi del campione mantenuti a un minimo di  $2 \text{ m}$  dalle pareti e variando la distanza tra i due pezzi. L'andamento di  $\alpha$

è mostrato in riferimento al rapporto tra distanza e lunghezza d'onda. Viene inoltre mostrato l'effetto della separazione del campione dalle pareti.

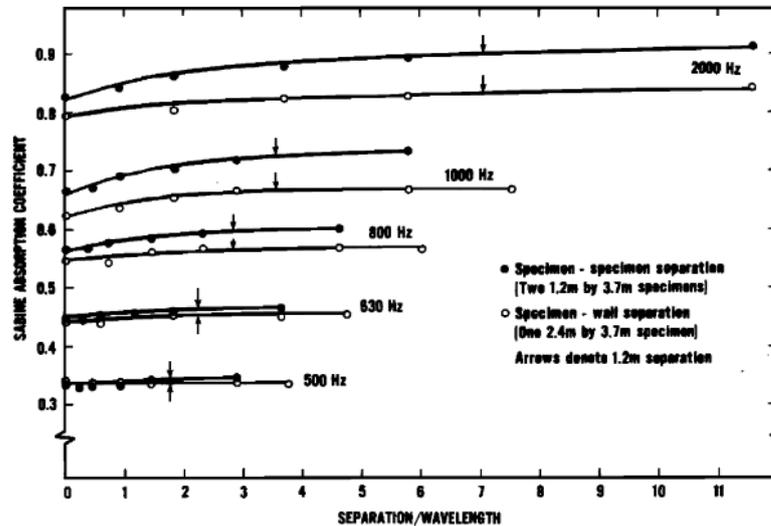


Figura 75: Andamento del coefficiente di assorbimento in relazione alle distanze tra pannelli e alle distanze dalle pareti [37]

Da questi valori sperimentali è immediato comprendere che l'effetto della distanza tra i pezzi del materiale influenza il valore di  $\alpha$  per valori minori di 2 metri, mentre lasciano invariati i coefficienti per valori maggiori.

Nella camera in scala studiata non è possibile, chiaramente, avere distanze superiori di 5 cm poiché la grandezza della camera non lo permette. Questo significa che nella valutazione di  $\beta$  le distanze tra i pezzi del campione avranno un effetto significativo, apportando un errore maggiore.

Le misure nelle diverse configurazioni sono state effettuate posizionando i pannelli (campione A) in obliquo (come orientamento 2) prima con una distanza di 5 cm tra i pezzi, poi con una distanza di 1 cm.

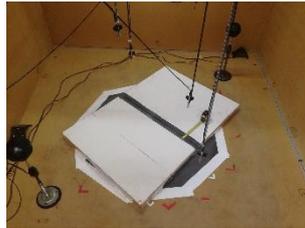
Distanza tra pannelli: 5 cm

Distanza tra pannelli: 1 cm

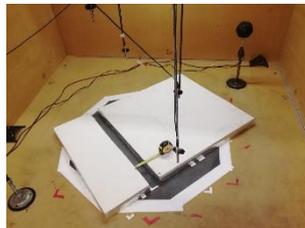
60x80  
E=5,8



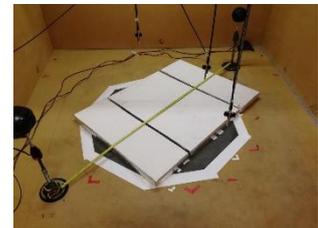
60x40+60x40  
E=8,3



60x20+60x60  
E=8,3



60x20+60x40+60x20  
E=8,96



4(60x20)  
E=13,3

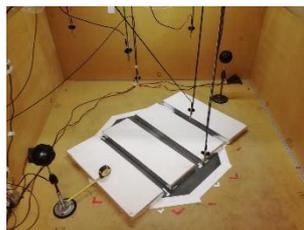


Tabella 15: Fotografie delle configurazioni testate

## 6.2 Risultati dello studio

I risultati delle misure effettuate sono stati confrontati, si riportano di seguito i grafici corrispondenti alle misure con distanza tra i pannelli  $d=5$  cm e  $d=1$  cm.

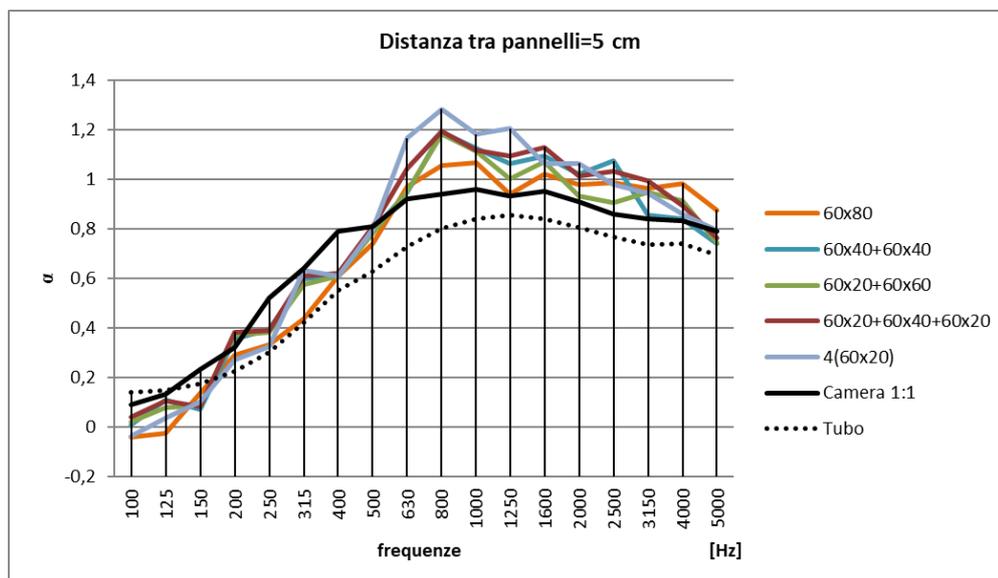


Figura 76: Grafico di  $\alpha$  per le diverse configurazioni con distanza tra i pannelli di 5 cm

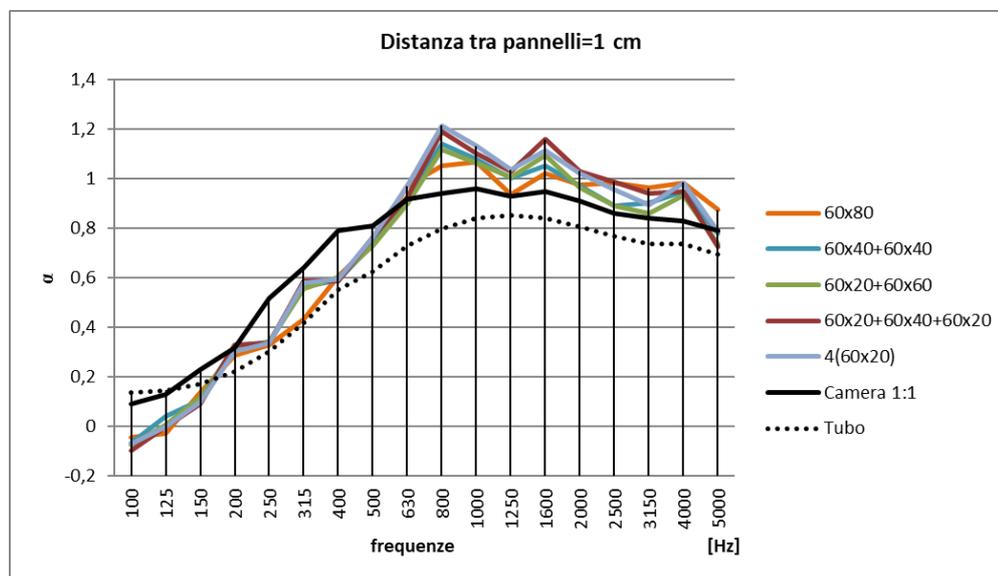


Figura 77: Grafico di  $\alpha$  per le diverse configurazioni con distanza tra i pannelli di 1 cm

Dai grafici si nota immediatamente che per la configurazione con  $E$  minore, cioè quella con il pannello intero 60x80 cm, la curva di  $\alpha$  presenta valori più bassi. I valori aumentano con una certa regolarità con l'aumentare di  $E$ , in particolare si nota la

curva più alta, che corrisponde alla configurazione con E maggiore, ossia quella con quattro pannelli separati di dimensioni 60x20 cm.

Dai punti calcolati viene sviluppata una linea di tendenza per ogni terzo di ottava dai 400 Hz ai 5000 Hz. Le frequenze minori di 400 Hz sono state escluse poiché al di fuori del range misurabile in una camera riverberante di dimensioni ridotte.

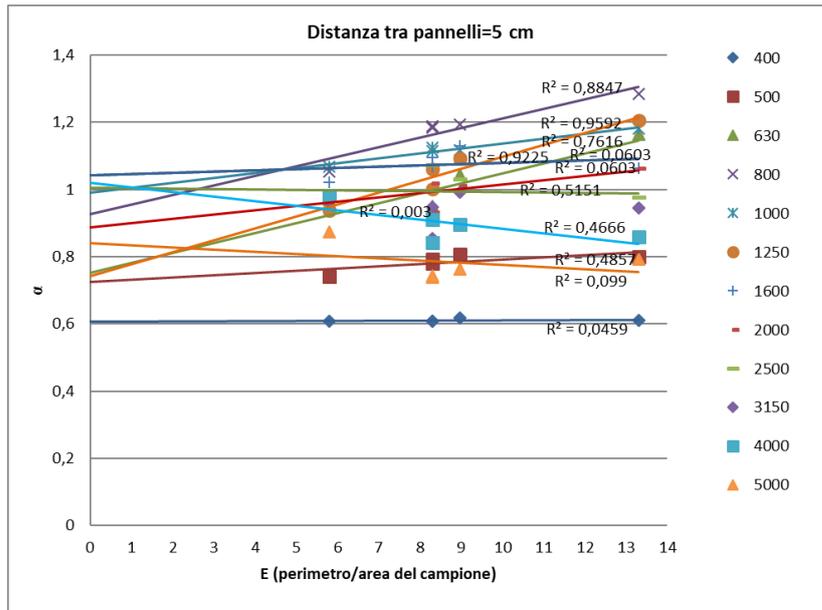


Figura 78: Grafico delle linee di tendenza per le frequenze da 400 Hz a 5000 Hz con distanza tra i pannelli di 5 cm, si riportano i valori di R<sup>2</sup> per mostrare il livello di approssimazione

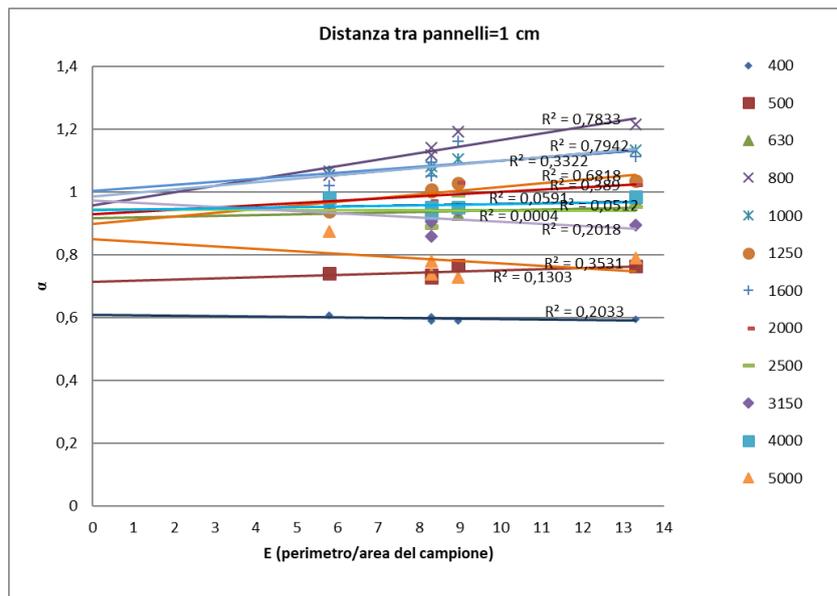


Figura 79: Grafico delle linee di tendenza per le frequenze da 400 Hz a 5000 Hz con distanza tra i pannelli di 1 cm, si riportano i valori di R<sup>2</sup> per mostrare il livello di approssimazione

L'intercetta della linea di tendenza rappresenta il valore di  $\alpha$  calcolato per un campione con  $E=0$ , cioè di area infinita, indicato con  $\alpha_\infty$ .

Di seguito si riportano i grafici contenenti i due andamenti di  $\alpha$  e  $\alpha_\infty$ , calcolati rispettivamente con distanze di 1 cm e 5 cm. In entrambi i grafici si riporta un riferimento ai coefficienti di assorbimento calcolati nella camera riverberante dell'INRiM e nel tubo di Kundt.

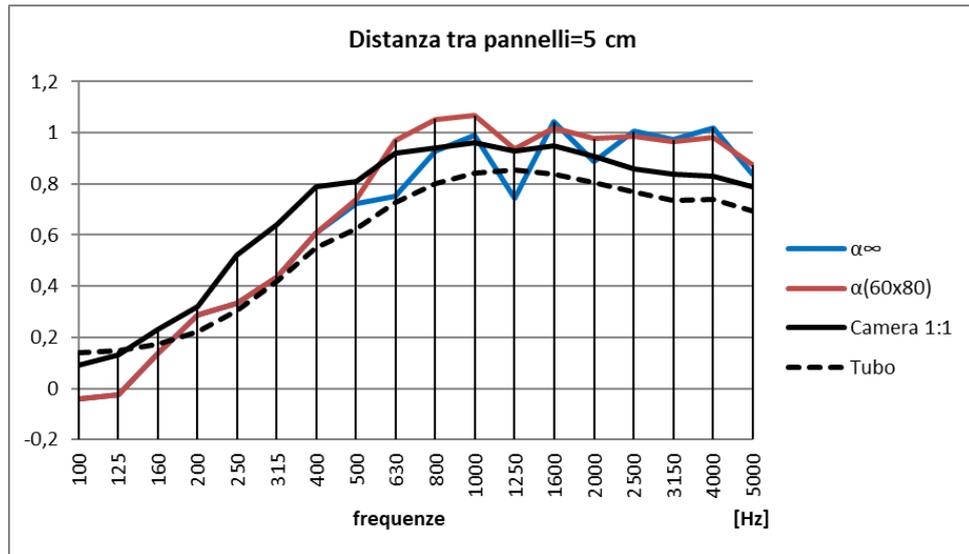


Figura 80: Confronto tra  $\alpha_\infty$  e  $\alpha$  calcolato per il pannello di dimensioni 60x80 cm, distanza di 5 cm

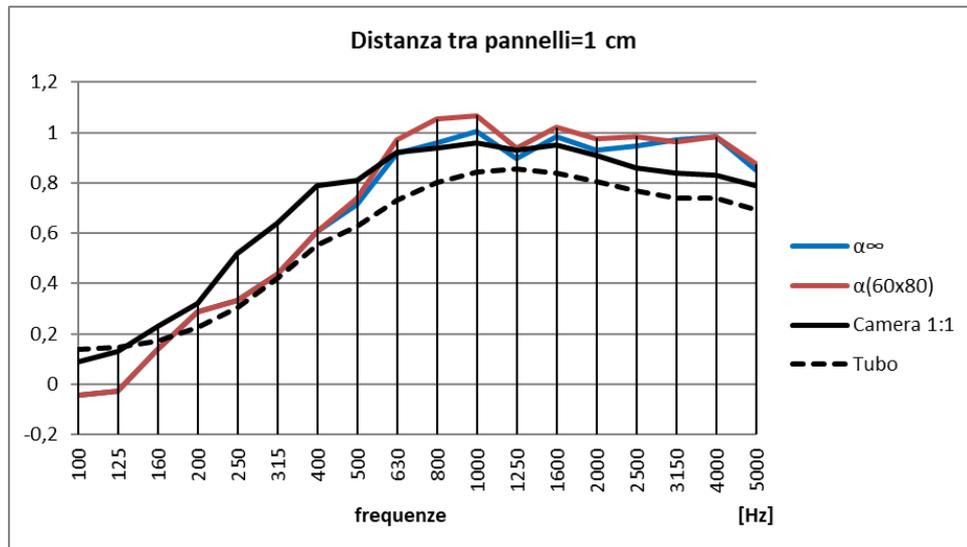


Figura 81: Confronto tra  $\alpha_\infty$  e  $\alpha$  calcolato per il pannello di dimensioni 60x80 cm, distanza di 1 cm

Dall'andamento dei due grafici di può notare l'influenza delle due distanze utilizzate. Il calcolo basato sulle configurazioni con distanza di 1 cm risulta il più efficace: i valori di  $\alpha_{\infty}$  risultano più simili a quelli della camera riverberante 1:1 ed hanno un andamento più regolare, si nota un abbassamento dei valori superiori ad 1. Le configurazioni con distanza di 5 cm, però, producono risultati più affidabili, poiché le linee di tendenza approssimano meglio i punti sperimentali (valori di  $R^2$  maggiori). In generale, le correzioni aggiunte sull'effetto di bordo generano dei valori molto più simili a quelli della camera riverberante di riferimento.

# Conclusioni

Questo studio si è occupato di caratterizzare la camera riverberante in scala 1:5 del Politecnico di Torino, nello specifico ci si è concentrati sulle misure di assorbimento acustico dei materiali fonoassorbenti.

Per fare ciò è stato realizzato uno studio della normativa ISO 354, lo standard adottato per il design delle camere riverberanti e per le misure dell'assorbimento acustico. Si è effettuato un adattamento dei punti trattati in tale normativa per renderli significativi nel caso della camera con dimensioni ridotte.

È stato realizzato un setup di sei microfoni e due sorgenti con posizioni fisse, per un totale di 12 combinazioni sorgente-microfono come richiesto da normativa, ed un programma Matlab che rendesse il processo di misura immediato ed automatico.

Una volta completate queste fasi "preparative" sono state portate avanti le misure di cinque campioni fonoassorbenti con caratteristiche differenti.

Su ogni campione sono state testati dimensioni, orientamenti e isolamento dei bordi per comprendere quali tra queste variabili potessero influenzare i risultati.

Sulla base delle misure effettuate sono stati, quindi, analizzati i risultati tramite analisi statistica della varianza. Le analisi dei risultati sono state, inoltre, effettuate confrontando i valori di assorbimento calcolati nella camera in scala studiata con quelli di riferimento calcolati nella camera riverberante 1:1 e nel tubo di Kundt.

Le analisi hanno portato alle seguenti conclusioni:

- le dimensioni del campione testato devono essere comprese tra 60x80 cm e 60x60 cm. Dimensioni al di fuori di questo range generano errori nel calcolo dell'assorbimento acustico;
- l'orientamento con cui si posiziona il campione all'interno della stanza ( $0^\circ$  -  $45^\circ$  -  $90^\circ$  sul piano del pavimento) non influenza significativamente le misure. Ciò significa che si può scegliere di effettuare le misure per i tre orientamenti e mediarli o misurare i coefficienti solo per il campione orientato a  $45^\circ$ , come richiesto dalla normativa;

- l'errore dei coefficienti di assorbimento dipende in modo particolare dallo spessore del materiale testato.
- l'isolamento dei bordi con un materiale riflettente è necessario poiché i risultati ricavati dalle misure con i bordi scoperti sono statisticamente diversi da quelli con i bordi isolati, in generale l'isolamento dei bordi risulta il più corretto in quanto i valori calcolati si avvicinano di più a quelli di riferimento. Si è notato, però, che nel caso di materiali con spessori elevati lasciare i bordi non isolati attenua l'errore dovuto alla diffrazione.

Il lavoro conferma le affermazioni della letteratura a riguardo: la camera riverberante in scala valutata si è dimostrata uno strumento abbastanza affidabile per le misure acustiche poiché mostra un buon confronto nell'assorbimento acustico a frequenze superiori ai 400 Hz, sono però da escludere i materiali con spessori superiori ai 5 cm poiché in questo caso si calcolano valori di assorbimento troppo elevati rispetto ai valori di riferimento. Oltre i 1000 Hz, la camera fornisce valori di assorbimento acustico più alti rispetto alla camera riverberante di dimensioni standard, ciò è dovuto a diversi fattori: le dimensioni ridotte dei campioni, il campo diffuso facilmente deteriorabile e l'effetto di diffrazione dei bordi.

Nonostante le sue dimensioni (minori di quelle richieste dalla normativa), la camera testata fornisce valori prossimi all'intervallo di riproducibilità.

È stata poi eseguita un'analisi volta a comprendere l'effetto della diffrazione dei bordi. In letteratura sono stati realizzati diversi studi a riguardo, ma sempre in camere riverberanti di dimensioni reali, cioè con volumi maggiori di 200 m<sup>3</sup>.

Nel caso di camere riverberanti di dimensioni ridotte l'effetto del bordo influenza maggiormente le misure. Si è infatti constatato che, tendenzialmente, i coefficienti di assorbimento calcolati crescono all'aumentare del valore di E, che rappresenta il rapporto tra perimetro e superficie del campione. Dividendo di volta in volta il pannello in più parti e realizzando le misure per ogni configurazione è stato possibile estrapolare i valori di assorbimento acustico per un ipotetico campione di area infinita, cioè E=0. Questi valori si avvicinano infatti ai valori calcolati nella camera riverberante 1:1.

Ulteriori ricerche saranno possibili per cercare di migliorare il metodo portato avanti finora. Una raccomandazione potrebbe essere quella di provare ad utilizzare la formula di Eyring per il calcolo dei tempi di riverberazione, per comprendere se e come questa formula riduca l'errore rispetto alla formula di Sabine, utilizzata nelle analisi presenti.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] T. J. Cox and P. D'Antonio, *Acoustic Absorbers and Diffusers*, Second edi., vol. 4, no. 77. 2009.
- [2] R. Spagnolo, *Manuale di Acustica*. 2001.
- [3] J. Arenas and M. Crocker, "Recent Trends in Porous Sound-Absorbing Materials," *Noise Vib. Control Mag.*, 2010.
- [4] J. Bear, *Dynamics of Fluids in Porous Media*. 1972.
- [5] M. Matyka, A. Khalili, and Z. Koza, "Tortuosity-porosity relation in porous media flow," *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.*, 2008.
- [6] F. Jacobsen, T. Poulsen, J. H. Rindel, A. C. Gade, and M. Ohlrich, *Fundamentals of Acoustics*. 1999.
- [7] ISO 3746, "Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure - Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane," *STANDARDS*, 2001.
- [8] G. Moncada Lo Giudice and S. Santoboni, *Acustica Applicata*. 1995.
- [9] ISO Standards, "Measurement of sound absorption in a reverberation room" *ISO Stand. 354*, 2003.
- [10] ISO 226:1997, "Acoustics -- Preferred frequencies," *Organisation Internationale de Normalisation (ISO)*. 1997.
- [11] ISO, "ISO 9613-1," *Acoustics -- Attenuation of sound during propagation outdoors -- Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*. 1996.
- [12] Y. Hidaka, H. Yano, and H. Tachibana, "Correction for the effect of atmospheric sound absorption on the sound absorption coefficients of materials measured in a reverberation room.," *J. Acoust. Soc. Jpn.*, vol. 9, pp. 217–223, 1988.
- [13] J. R. Veen, J. Pan, and P. Saha, "Development of a Small Size Reverberation Room Standardized Test Procedure for Random Incidence Sound Absorption Testing," *SAE Trans.*, 2005.
- [14] C. Moritz, J. Shaw, and A. Carrera, "Improving the accuracy of sound

- absorption measurements according to ISO 354," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 127, no. 3, p. 1752, 2010.
- [15] International Organization For Standardization, "ISO 12999-2 Acoustics - Determination and application of measurement uncertainties in building acoustics -- Part 2: Sound absorption coefficients," no. May. 2014.
- [16] T. D. Olynyk, D., & Northwood, "Comparison of Reverberation Room and Impedance Tube Absorption Measurements.," *J. Acoust. Soc. Am.*, 1964.
- [17] A. Cummings, "Impedance tube measurements on porous media: The effects of air-gaps around the sample," *J. Sound Vib.*, 1991.
- [18] International Organization For Standardization, "ISO 10534-1." .
- [19] International Organization For Standardization, "ISO 10534-2," vol. 1998. 2001.
- [20] R. Spagnolo and G. Benedetto, "Reverberation time in enclosures: The surface reflection law and the dependence of the absorption coefficient on the angle of incidence," *J. Acoust. Soc. Am.*, 1985.
- [21] A. Duval, J.-F. Rondeau, L. Dejaeger, F. Sgard, and N. Atalla, "Diffuse field absorption coefficient simulation of porous materials in small reverberant rooms: finite size and diffusivity issues," *10eme Congrès Français d'Acoustique*, no. April, pp. 12–16, 2010.
- [22] U. M. Stephenson, "Different assumptions -Different reverberation formulae," in *Proceedings of Inter-Noise 2012*, 2012.
- [23] A. Chappuis, "Small Size Devices for Accurate Acoustical Measurements of Materials and Parts Used in Automobiles," *SAE Tech. Pap.*, 1993.
- [24] R. Del Rey, J. Alba, L. Bertó, and A. Gregori, "Small-sized reverberation chamber for the measurement of sound absorption," *Mater. Construcción*, vol. 67, no. 328, p. 139, 2017.
- [25] D. Hernandez, E. J. Liu, J. H. Huang, and Y. C. Liu, "Design and Construction of a Small Reverberation Chamber Applied to Absorption and Scattering Acoustic Measurements," *Adv. Mater. Res.*, vol. 1077, pp. 197–202, 2014.
- [26] 17497-1:2004 BS-ISO, "Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces -

Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room," *Iso*, 2004.

- [27] P. Saha and J. R. Veen, "Thoughts behind Developing SAE Standard J2883 - Random Incidence Sound Absorption Tests Using a Small Reverberation Room," *Sae*, vol. 4970, 2015.
- [28] A. Gerbotto, "Caratterizzazione di una camera riverberante in scala." 2016.
- [29] D. N.-S. Hon and N. Shiraishi, *Wood and cellulosic chemistry. Second edition, revised and expanded.* 2013.
- [30] W. T. Simpson, *Equilibrium Moisture Content of Wood in Outdoor Locations in the United States and Worldwide.* 1998.
- [31] P. Dietrich *et al.*, "ITA-Toolbox – An Open Source MATLAB Toolbox for Acousticians," in *Fortschritte der Akustik - DAGA*, 2012.
- [32] M. E. Delany and E. N. Bazley, "Acoustical properties of fibrous absorbent materials," *Appl. Acoust.*, 1970.
- [33] A. Cops, J. Vanhaecht, and K. Leppens, "Sound absorption in a reverberation room: Causes of discrepancies on measurement results," *Appl. Acoust.*, 1995.
- [34] T. D. Northwood, M. T. Grisaru, and M. A. Medcof, "Errata : Absorption of Sound by a Strip of Absorptive Material in a Diffuse Sound Field [J. Acoust. Soc. Am. 31, 595 (1959)]," *J. Acoust. Soc. Am.*, 1959.
- [35] A. De Bruijn, "On the scattering of a plane wave by porous sound-absorbing strip," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 123, no. 5, p. 3141, 2008.
- [36] M. Sato, Kozi; Koyazu, "Dependence of Sound Absorption Coefficient upon Area of Acoustic Materials," *Kobayashi Institute of Physical Research, Kokubunji, Tokyo, Japan*, no. ii. pp. 10–12, 1958.
- [37] T. Bartel, "Effect of absorber geometry on apparent absorption coefficients as measured in a reverberation chamber," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 69, no. 4, pp. 1065–1074, 1980.

## SITOGRAFIA

- [1a] [www.puntofai date.com/it/isolamento-acustico/8249-422-pannello-fonoassorbente-piramidale-akustik-stop-in-poliuretano-espanso-100x100-cm-vari-spessori-isolamento-acustico.html](http://www.puntofai date.com/it/isolamento-acustico/8249-422-pannello-fonoassorbente-piramidale-akustik-stop-in-poliuretano-espanso-100x100-cm-vari-spessori-isolamento-acustico.html)
- [2a] [www.steacom.it/bioedilizia/378-pannello-isolante-in-vetro-cellulare-80-x-60-cm-.html](http://www.steacom.it/bioedilizia/378-pannello-isolante-in-vetro-cellulare-80-x-60-cm-.html)
- [3a] [3csrl.com/camper-nuovi/font-vendome-horizon/isolamento-esterno-100-in-lana-di-vetro/](http://3csrl.com/camper-nuovi/font-vendome-horizon/isolamento-esterno-100-in-lana-di-vetro/)
- [4a] [www.archiproducts.com/it/prodotti/edilana/pannello-isolante-termico-acustico-igrometrico-edicork-180\\_303444](http://www.archiproducts.com/it/prodotti/edilana/pannello-isolante-termico-acustico-igrometrico-edicork-180_303444)
- [5a] [www.edilportale.com/prodotti/isolmant/pannello-fonoisolante-in-fibra-di-poliestere/isolSPACE-industry\\_241266.html](http://www.edilportale.com/prodotti/isolmant/pannello-fonoisolante-in-fibra-di-poliestere/isolSPACE-industry_241266.html)
- [6a] [img.archiexpo.es/images\\_ae/photo-g/55063-1683645.jpg](http://img.archiexpo.es/images_ae/photo-g/55063-1683645.jpg)
- [7a] [www.iuav.it/Ateneo1/docenti/architetto/docenti-st/Fabio-Pero/materiali-/elementi-d/scheda-4-fonoassorbimento.pdf](http://www.iuav.it/Ateneo1/docenti/architetto/docenti-st/Fabio-Pero/materiali-/elementi-d/scheda-4-fonoassorbimento.pdf)
- [8a] [www.crit.rai.it/eletel/2010-3/103-04.pdf](http://www.crit.rai.it/eletel/2010-3/103-04.pdf)
- [9a] [community.plm.automation.siemens.com/t5/Testing-Knowledge-Base/Sound-Absorption/ta-p/398589](http://community.plm.automation.siemens.com/t5/Testing-Knowledge-Base/Sound-Absorption/ta-p/398589)
- [10a] [www.technature.ca/acoustics-101/reflected-sound/](http://www.technature.ca/acoustics-101/reflected-sound/)
- [11a] [chrgasa.org/wp-content/uploads/2016/01/Room-Acoustics-Measurement-Techniques-by-Michelle-Vigeant.pdf](http://chrgasa.org/wp-content/uploads/2016/01/Room-Acoustics-Measurement-Techniques-by-Michelle-Vigeant.pdf)
- [12a] [slideplayer.com/slide/4173735/](http://slideplayer.com/slide/4173735/)
- [13a] [pcfarina.eng.unipr.it/dispense02/035.pdf](http://pcfarina.eng.unipr.it/dispense02/035.pdf)
- [14a] [www.autoneum.com/alpha-cabin-ii/](http://www.autoneum.com/alpha-cabin-ii/)
- [15a] [www.ibm.com/analytics/it/it/technology/spss/](http://www.ibm.com/analytics/it/it/technology/spss/)