

**APPLICAZIONE DELL'APPROCCIO
PERFORMANCE-BASED DESIGN
E DESIGN PARAMETRICO ALLA
CORREZIONE ACUSTICA DI
AMBIENTI DESTINATI
ALL'ASCOLTO DEL PARLATO:**

**il caso studio della sala conferenze
del Museo Egizio di Torino**

Relatori

Louena Shtrepi
Arianna Astolfi
Lorenzo Teppati Losè

Candidato

Stefano Rovera



*alla volontà
e al talento,
di chi sa vederli negli altri.*

Abstract

Lo studio si propone la correzione acustica della sala Conferenze del Museo Egizio di Torino. Questo spazio, caratterizzato da soffitto a volta e superfici rintonacate, presenta caratteristiche acustiche non ottimali per l'ascolto del parlato. Per rendere tale ambiente adatto all'uso divulgativo è necessario intervenire con una correzione acustica che si è scelto di fare attraverso un approccio performance based e di design parametrico. Il progetto si propone di fornire all'ambiente l'apporto fonoassorbente di pannelli posizionati con conformazione a baffles, cercando di quantificare le prestazioni del sistema acustico apposto nell'ordine della loro conformazione geometrica. Le simulazioni acustiche effettuate sono state occasione di definizione e studio di parametri geometrici anche per quanto riguarda la redazione del modello tridimensionale di calcolo, in una valutazione del grado di dettaglio necessario nell'ordine di una ricerca d'automazione della sua trasposizione da modello ottenuto con rilievo laser scanning a modello adatto alle simulazioni acustiche.

Indice

0. Introduzione	9
0.1 Performance-based design	9
0.2 Design Parametrico	11
0.Bibliografia	14
0.Sitografia	15
<hr/>	
1. Acustica Architettonica	16
1.0 Introduzione: Il suono negli spazi chiusi	16
1.1 Trattamento acustico spazi chiusi:	17
proprietà acustiche dei materiali	17
1.1.1 Assorbimento acustico e materiali assorbenti	20
1.1.1.1 Assorbimento per porosità	21
1.1.1.2 Assorbimento per risonanza di cavità	23
1.1.1.3 Assorbimento per risonanza di membrana	28
1.1.1.4 Elementi e corpi assorbenti	30
1.2 Diffusione e diffusori del suono	30
1.2.1 Diffusori di Schroeder	32
1.3.1.1 Coefficiente di scattering e di diffusione	35
1.3 Parametri acustici oggettivi	36
1.3.1 Calcolo dello Speech Transmission Index (STI)	36
1.3.2 Calcolo del Tempo di riverberazione.	40
1.3.3 Rapporti tra energie:	45
Definizione, Chiarezza e Tempo baricentrico	45
1.3.3.1 Indice di definizione	45
1.3.3.2 Indice di Chiarezza	46
1.3.3.3 Tempo Baricentrico	46
1.Bibliografia	47
1.Sitografia	48
<hr/>	
2. Misurazioni e Simulazioni	50
2.0 Introduzione	50
2.1 Risposta all'impulso	50
2.2 Tecniche di misurazione	51

2.2.1	Metodo impulsivo	53
2.2.2	Metodo MLS (Maximum Length Sequence)	54
2.2.3	Metodo TDS (Sweep lineare)	56
2.2.4	Metodo ESS (Exponential Sine Sweep)	57
2.3	Metodi e software di Simulazione	60
2.3.1	Metodi Geometrici	60
2.3.2	Metodi Basati sulle Onde	61
2.3.3	Metodi Ibridi	61
2.3.4	Metodi Statistici	62
2.3.5	Simulazioni Specifiche	62
2.4	Metodo di Simulazione in ODEON	63
2.4.1	Image Source Method (ISM)	64
2.4.2	Early Scattering Method (ESM)	65
2.4.3	Ray Radiosity Method (RRM)	66
2.	Bibliografia	69
1.	Sitografia	69
<hr/>		
3.	Correzione acustica in edifici esistenti	70
3.0	Introduzione: l'acustica delle sale conferenza	70
3.1	Casi studio	71
3.1.1	Correzione acustica di una sala Rinascimentale	71
2.1.2	Legambiente Auditorium a Rispescia	77
2.1.3	Correzione acustica della Cattedrale di Benevento con materiali ceramici	82
3.	Bibliografia	88
<hr/>		
4.	Caso Studio	90
4.1	Il Palazzo Collegio dei Nobili: storia e contesto.	90
4.1.1	Storia dell'Accademia delle Scienze e del Museo Egizio	90
4.1.2	Il Palazzo Collegio dei Nobili	91
4.2	Stato di fatto: materiali, caratteristiche e criticità geometriche dell'ambiente.	94
4.3	Rilievo architettonico	96
4.3.1	Rilievo diretto con metro laser	96

4.3.2	Rilievo fotogrammetrico: raccolta	97
	ed elaborazione dei dati	97
4.3.2.1	Fotogrammetria e Structure from Motion (SfM) per la modellazione 3D	97
4.3.2.2	Acquisizione dei dati	99
4.3.2.3	Elaborazione dei dati acquisiti	104
4.3.3	Rilievo con Terrestrial Laser Scanning (TLS): raccolta ed elaborazione dei dati	108
4.3.3.1	Terrestrial Laser Scanner (TLS)	108
4.3.3.2	Rilievo TLS: raccolta ed elaborazione dei dati	110
4.3.4	Combinazione dei dati e costruzione del modello progettuale.	113
4.4	Rilievo acustico	117
4.5	Simulazione acustica dell'esistente	121
4.5.1	Calibrazione del modello attraverso il confronto delle misure dirette	121
4.5.1.2	Iterazioni e validazione	127
4. Bibliografia		138
4. Sitografia		140

5. Progetto di correzione acustica 142

5.1	Condizioni acustiche ottimali della sala, vuota e occupata	142
5.1.1	Tempo di riverberazione T_{30}	142
5.1.2	Indice di Chiarezza C_{50}	143
5.1.2	Speech Transmission Index STI	144
5.2	Concept di progetto	145
5.3	Progetto parametrico: Configurazione e criticità di interoperabilità dei programmi nell'individuazione dei parametri	149
5.3.1	Impostazione geometrica delle aree di intervento	150
5.4	Misure in camera riverberante	160
5.4.1	Misure di sistemi con più elementi	160
5.4.2	Misure di sistemi di coppia con interassi differenti	163

5.4.3	Misure di sistemi di coppia con a' differenti	166
5.4.3.1	Conformazione A	167
5.4.3.2	Conformazione B	171
5.4.3.3	Conformazione C	175
5.5.4	Confronto delle conformazioni	179
5.6.4.1	Confronto delle conformazioni in base ai valori di a'	185
5.7	Simulazione acustica di progetto	189
5.7.1	Simulazione acustica del sistema di correzione composto da soli baffles	189
5.7.1	Simulazione acustica del sistema di correzione composto da baffles e pannelli integrati.	192
5.7	Render di progetto	202
5.	Bibliografia	205
5.	Sitografia	205
<hr/>		
6.	Conclusioni	206
6.0	Sintesi del lavoro svolto	206
6.1	Risultati raggiunti	206
6.3	Implicazioni e contributi	207
6.4	Limiti e sviluppi futuri	208
7.	Appendici	211
7.1	Prove 0-3	212
7.2	Prove D1-D4	213
7.3	Prove Conformazioni	214
7.3.1	Prove A	214
7.3.1.1	Prove A, coefficienti assorbimento modulo	215
7.3.2	Prove B	216
7.3.2.1	Prove B, coefficienti assorbimento modulo	217
7.3.3	Prove C	218
7.3.3.1	Prove C, coefficienti assorbimento modulo	219
7.4	Confronto delle conformazioni modulari con fattori di forma corrispondenti	220
7.5	Mappe acustiche	222
7.5.1	Livelli di pressione sonora	222
7.5.2	Livelli di pressione sonora Audible Focused (Af)	222
7.5.3	Livelli di pressione sonora diretta	223

0 Introduzione

0.1 Performance-based design

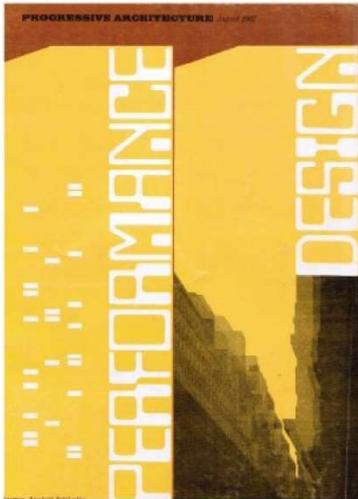


Fig 0.1
Copertina del numero
della rivista "Progressive
Architecture" incentrato sul
performance design, 1967.
Hensel, M. (2013)

Secondo Hensel (2013), negli anni '60, la critica al funzionalismo e agli approcci ai sistemi rigidi in architettura ha indirizzato il dibattito verso diverse direzioni. Il funzionalismo e il razionalismo divennero i temi principali delle discussioni architettoniche, scatenando numerose reazioni contro: neo-funzionalismo, neo-razionalismo, post-funzionalismo, ecc.. Da qui, cominciarono a prendere forma due reazioni parallele significative.

La prima era una critica sintetica al programma come approccio deterministico nella relazione tra spazio e utilizzo dello spazio, radicato negli approcci ai sistemi rigidi.

L'altra si basava sull'integrazione della semiotica in architettura, portando alla ricerca di un legame tra le performance e il significato architettonico, il simbolico.

Quest'ultimo approccio favorì l'ascesa del postmodernismo, che a sua volta venne criticato a partire dalla fine degli anni '80 per operare su un set limitato di riferimenti culturalmente determinati, incapace di produrre una nuova architettura. L'accento si spostò quindi verso sperimentazioni formali più astratte e la ridefinizione dei criteri per una nuova architettura, insieme alla produzione di effetti architettonici. (Hensel, M., 2013)

Nel discorso architettonico, il concetto di prestazione acquisì quindi rilevanza a partire dalla metà del XVIII secolo, grazie all'influenza del progresso scientifico e all'introduzione del concetto biologico di "ambiente". Successivamente, verso la fine degli anni Settanta, la crisi energetica globale e l'aumentata consapevolezza dell'impatto ecologico delle attività umane consolidarono il ruolo centrale delle "prestazioni dell'ambiente fisico" nel dibattito architettonico.

Da quel momento, la valutazione delle performance edilizie si è imposta come un tema cardine per i professionisti, favorita dall'innovazione tecnologica, che ha permesso di analizzare le proposte progettuali con una precisione e una rapidità senza precedenti (Kalay, 2004, citato in Badino, E., 2020).

Studi come "A Review of Performance-Oriented Architectural Design and Optimization in the Context of Sustainability: Dividends and Challenges" pubblicato nel 2020 su Sustainability, mostra una ricerca globale condotta attraverso Web of Science e ScienceDirect, su riviste e atti di conferenze, con parole chiave come "building", "performance", "energy consumption", "design" e "optimization", considerando lavori dal 1990 al 2019. L'obiettivo è esplorare la relazione tra ottimizzazione

energetica e innovazione nella forma architettonica.

Il termine “performance energetica degli edifici” è stato utilizzato come parola chiave, con i primi studi risalenti al 1976. La quantità di ricerche è aumentata progressivamente dal 1990, con un aumento significativo nell’ultimo decennio. In parallelo, sono emersi diversi sistemi di valutazione per la sostenibilità degli edifici a livello globale (Li, S. et al., 2020).

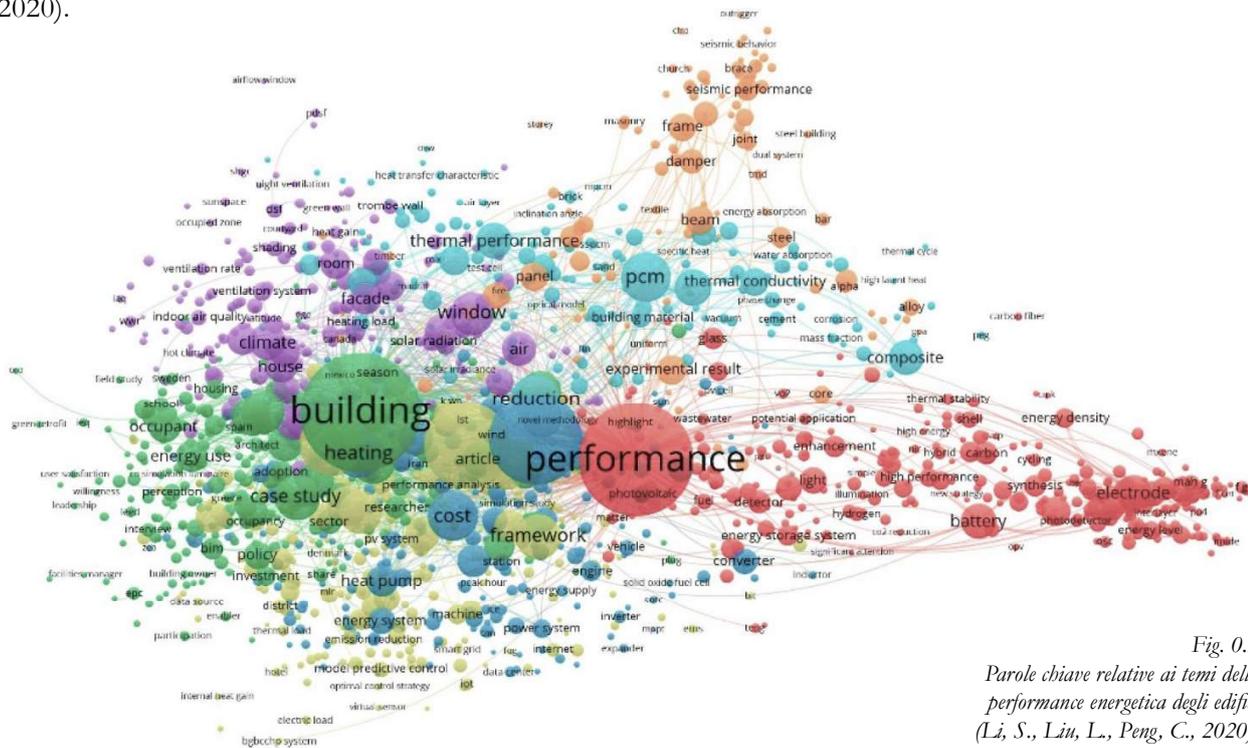


Fig. 0.2
Parole chiave relative ai temi della performance energetica degli edifici (Li, S., Liu, L., Peng, C., 2020).

L’industria dell’architettura, dell’ingegneria e delle costruzioni si avvia quindi verso un’era sostenibile e a basse emissioni di carbonio, le prestazioni dell’architettura stanno attirando sempre più attenzione e ne costituiscono un pilastro sempre più fondamentale. La tecnologia di simulazione ha reso possibile un’analisi quantificata delle prestazioni architettoniche e, di conseguenza, consente direttamente ad architetti e ingegneri di incorporare l’analisi delle prestazioni nel flusso di lavoro progettuale.

Shi sostiene che i progetti architettonici “performance-based” e “performance-driven” differiscano nel fatto che questi ultimi coinvolgano tecniche di ottimizzazione assistite da computer, in modo che le prestazioni possano essere utilizzate come criterio per realmente “guidare” il design (Shi, X. (2010), in un’ottica ormai non più futuristica, oggi, l’IA può influenzare significativamente il processo di progettazione eliminando attività ripetitive, migliorando l’approccio user-centric e stimolando la creatività. L’IA può supportare i processi decisionali, di prototipazione e ideazione dei designer, portando a soluzioni progettuali più creative ed efficaci. Affrontare il bias negli algoritmi di IA e la privacy dei dati è fondamentale per garantire un’integrazione etica dell’IA. La realtà virtuale, il bio-design e il design inclusivo sono ambiti inesplorati in cui l’IA può essere utilizzata. (Sreenivasan, A. & Suresh, M., 2024).

0.2 Design Parametrico

«È interessante a questo proposito la figura di Eurito, un pitagorico del V secolo spesso associato a Filolao. Eurito era famoso tra i suoi contemporanei perché, assegnato a qualsiasi oggetto reale un determinato numero (non sappiamo come lo ottenesse), egli dimostrava in un modo caratteristico la necessità naturale del rapporto fra l'uno e l'altro: si provvedeva di un pari numero di sassolini, tracciava la figura dell'oggetto in questione e incastrava lungo il suo perimetro tali sassolini (il numero atto a definire la figura dell'uomo era per esempio 250). Variando le dimensioni dell'oggetto, il numero dei sassolini, che ne esprimevano i rapporti essenziali, non cambiava. In tal modo Eurito voleva stabilire visivamente la relazione, tipica anche del pensiero di Filolao, tra numero e forma limitante gli enti reali: il numero, tradotto in forma, era quindi il principio di individuazione e anche di intelligibilità della natura.» (Vegetti, 1970, p. 81, citato in Langella C. et al., 2017).

Mario Vegetti evidenzia come, già nell'epoca di Pericle, la filosofia naturale greca avesse chiaramente individuato una corrispondenza tra numero e forma.

L'approccio correlativo sviluppato dal matematico tarantino può essere considerato un precursore del metodo parametrico odierno: un sistema che unisce figura, geometria e numero, instaurando una relazione capace di gestire la variabilità dimensionale tra gli aspetti fisico-formali e quelli matematici della realtà (Langella C. et al., 2017).

Quando, a metà del XX secolo, l'informatica ha integrato il linguaggio delle variabili e dei parametri dalla matematica, ha adottato anche la terminologia per algoritmi e procedure programmabili. I primi programmi informatici documentati furono scritti da Ada Lovelace nel 1843 per l'analytical engine proposto da Charles Babbage, basandosi sui suoi algoritmi. Questi algoritmi prevedevano la variazione dei parametri in una serie di cicli che Ada definiva "backing", ma che in realtà rappresentavano i primi esempi di cicli e salti condizionali.

I pionieri del design digitale, come Ivan Sutherland con il sistema Sketchpad del 1963, svilupparono un sistema essenzialmente parametrico per il design architettonico.

Negli anni '70, la progettazione assistita da computer (CAD) assimilò completamente i concetti parametrici, oggi definiti da Mark Burry come la "conditio sine qua non" della progettazione computazionale.

*Fig. 0.3
Ivan Sutherland e
il suo Sketchpad,
considerato il primo
computer coin interfaccia
video, creato nel 1962
al Massachusetts
Institute of Technology's
Lincoln Laboratory di
Lexington.
spectrum.ieee.org*



Tuttavia, parlando di architettura parametrica, il concetto e l'uso del termine precedono la possibilità di utilizzare veri processi computazionali.

Il termine "architettura parametrica" sembra essere stato coniato dall'architetto italiano Luigi Moretti negli anni '40. Tra il 1940 e il 1942, Moretti studiò il rapporto tra progettazione architettonica ed equazioni parametriche sotto l'etichetta di Architettura Parametrica, inizialmente senza l'ausilio dei computer. Tuttavia, entro il 1960, grazie all'uso di un computer IBM 610, Moretti fu in grado di esporre modelli di stadi progettati parametricamente alla XII Triennale di Milano.

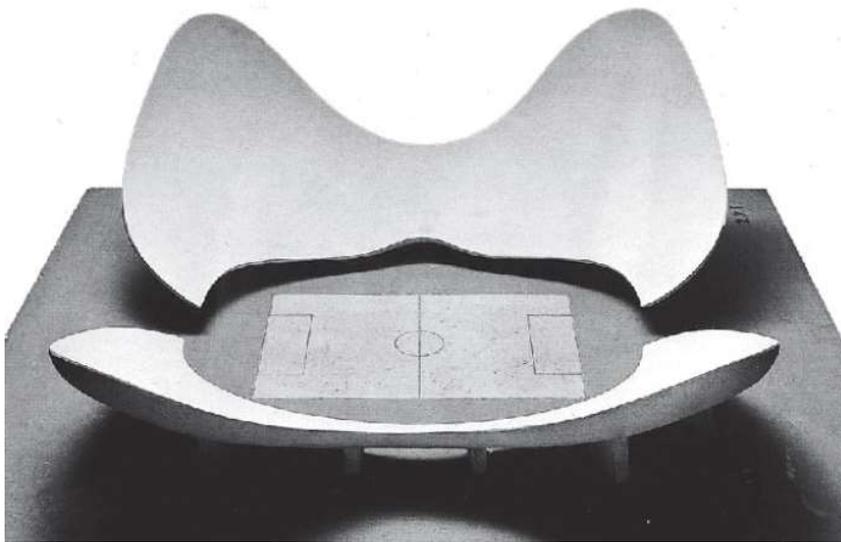


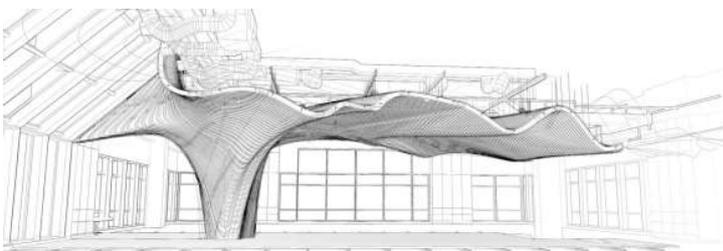
Fig.0.4
Luigi Moretti,
il modello di uno stadio nella
sua esposizione sull'architettura
parametrica durante la
Triennale di Milano, 1960
www.researchgate.net

Preriscindendo dai mezzi utilizzati, il lavoro precedente dello stesso Antoni Gaudí è essenzialmente parametrico. Tuttavia, ciò non emerge direttamente dai suoi scritti, ma dal meticoloso lavoro di analisi successiva di Mark Burry, che sta attualmente contribuendo alla ricostruzione delle forme previste per la Basilica della Sagrada Família a Barcellona. In questo caso, il merito della computazione parametrica potrebbe essere attribuito a Burry piuttosto che a Gaudí. Sebbene esistano esempi ancora più antichi di forme tridimensionali descritte parametricamente, sembra che Moretti sia stato probabilmente il primo a creare forme architettoniche tridimensionali utilizzando un complesso insieme di relazioni parametriche risolte attraverso la computazione digitale (Schumacher, P. 2016).

L'adozione di approcci parametrici ha avuto un impatto significativo, in particolare nella progettazione strutturale con il calcestruzzo armato. In Italia, spiccano le ricerche sulla morfologia strutturale condotte da Pierluigi Nervi e Sergio Musumeci.

Parallelamente, nel settore del design, sono emerse metodologie parametriche come risposta alle sfide poste dal campo aeronautico, dove la necessità di analizzare il comportamento delle strutture

Fig. 0.5, 0.6, 0.7
One Main Office
Renovation by dEEOi
Architects, 2009.
Cambridge, MA, USA.
0.5, immagine di cantiere.
0.6, disegno di progetto.
0.7, vista dell'interno.
parametric-architecture.com



sottoposte a dinamiche di flusso ha portato allo sviluppo di software di progettazione avanzati. Questi strumenti sono stati successivamente adottati da pionieri come Frank O. Gehry, contribuendo a integrare l'approccio parametrico nel design architettonico.

L'evoluzione dei sistemi di modellazione parametrica ha reso possibile la creazione di modelli che integrano numerose variabili progettuali, come geometria, relazioni forma-struttura, scambi energetici e output per la produzione di strutture e superfici. La capacità di gestire questa complessità ha favorito l'emergere di linguaggi distintivi nel panorama architettonico, come testimoniano le opere di figure emblematiche quali Frank O. Gehry, Greg Lynn e Zaha Hadid. Questi linguaggi, riconoscibili per l'innovazione formale e tecnica, rappresentano un punto di incontro tra tradizione e nuove tecnologie, ampliando le possibilità espressive e funzionali dell'architettura contemporanea.

L'impatto dell'approccio parametrico risulta ancora più evidente se si considera che, nel campo del design, i sistemi generativi e prefigurativi sono ormai strettamente legati a nuovi processi di produzione non più basati su tecniche "meccaniche" tradizionali (come taglio, tornitura o fresatura) ma su metodologie "plastiche" connesse alla digital fabrication additiva. Guardando al futuro, si prevede che la maggior parte dei processi industriali adotterà una matrice digitale come elemento centrale per la gestione e il controllo produttivo. Il "codice" digitale è destinato a superare la distinzione tra produzione su piccola scala e realizzazione di grandi serie di artefatti per i mercati globali, aprendo nuovi orizzonti all'industria.

La metodologia computazionale offre vantaggi significativi rispetto al passato, consentendo una maggiore flessibilità e autonomia. Nel design di prodotto, l'approccio parametrico permette di andare oltre la serialità tradizionale, offrendo soluzioni personalizzate che rispondono a esigenze specifiche come l'adattamento a climi e contesti locali o alle caratteristiche biometriche e fisiologiche del corpo umano.

Nell'architettura, invece, questa metodologia emancipa i progettisti dai limiti imposti dalla modularità convenzionale, permettendo di esplorare nuove forme e soluzioni spaziali che si adattano alle necessità funzionali e culturali dei contesti contemporanei (Langella C. et al., 2017).

Bibliografia

Hensel, M. (2013). *Performance-Oriented Architecture: Rethinking Architectural Design and the Built Environment*. John Wiley & Sons Ltd

Li, S., Liu, L., Peng, C., (2020). A Review of Performance-Oriented Architectural Design and Optimization in the Context of Sustainability: Dividends and Challenges. *Sustainability*, 12(4), 1427; <https://doi.org/10.3390/su12041427>

Schumacher, P. (2016) *Parametricism 2.0: Rethinking Architecture's Agenda for the 21st Century*. John Wiley & Sons Inc

Shi, X. (2010). Performance-based and performance-driven architectural design and optimization. *Front. Archit. Civ. Eng. China* 4, 512–518. <https://doi.org/10.1007/s11709-010-0090-6>

Sreenivasan, A., Suresh, M. (2024). Design thinking and artificial intelligence: A systematic literature review exploring synergies, *International Journal of Innovation Studies*, Volume 8, Issue 3, Pages 297-312, ISSN 2096-2487, <https://doi.org/10.1016/j.ijis.2024.05.001>.

Langella C., Scodeller D., Dal Buono, V. (2017). *Design Parametrico E Generativo: Nuove Prospettive Di Ricerca*. MD Journal (3) 6-13 ISSN 2531-9477 [online], ISBN 978-88-940517-7-3

Sitografia

https://www.researchgate.net/figure/Luigi-Morettis-models-and-exposition-on-parametric-architecture-during-the-Triennale-di_fig4_337298716

<https://spectrum.ieee.org/graphical-user-interface>

<https://parametric-architecture.com/one-main-office-renovation-by-decoi-architects/>

Acustica Architettonica 1

1.0 Introduzione: Il suono negli spazi chiusi

Il suono negli spazi chiusi si propaga attraverso la pressione e la depressione del fluido omogeneo, l'aria, contenuto nell'ambiente e delimitato da superfici parzialmente o totalmente riflettenti.

Per descrivere il comportamento acustico degli spazi chiusi si ricorre generalmente a tre diversi metodi, spesso considerati complementari e utilizzati, almeno concettualmente, insieme per fornire un'analisi approfondita di un ambiente:

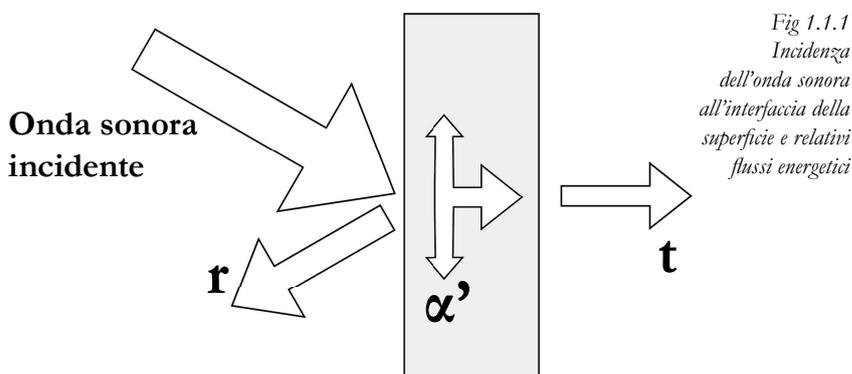
- **Teoria delle onde o teoria modale:** Questo approccio analitico si basa sullo studio dei modi di vibrazione propri di un ambiente chiuso, ottenuti risolvendo l'equazione delle onde e tenendo conto delle condizioni al contorno imposte dalle caratteristiche delle superfici confinanti. Dal punto di vista fisico, rappresenta il metodo più accurato, poiché consente una descrizione dettagliata della distribuzione del campo acustico. Tuttavia, è di difficile applicazione per spazi reali con geometrie complesse, risultando quindi di utilità limitata per molte situazioni pratiche. Rimane comunque un elemento fondamentale per una comprensione profonda dell'acustica ambientale.
- **Teoria geometrica:** Questo metodo semplifica le onde sonore rappresentandole come raggi che si propagano in linea retta e si riflettono in modo speculare sulle superfici, come la luce su uno specchio. Sebbene l'analisi grafica di percorsi limitati di raggi sia di utilizzo circoscritto per lo studio qualitativo delle proprietà riflettenti di superfici specifiche, il metodo ha trovato ampio impiego grazie ai programmi di simulazione ray tracing, che consentono di simulare riflessioni e percorsi acustici in ambienti complessi.
- **Teoria statistica:** Basata sull'ipotesi di un campo acustico omogeneo e diffuso all'interno dell'ambiente, questa teoria considera una distribuzione casuale delle direzioni di propagazione delle onde sonore. Descrive il campo acustico attraverso valori medi delle grandezze principali, risultando particolarmente

utile per l'analisi di fenomeni complessi come la riverberazione. Nonostante le semplificazioni, è il metodo più diffuso per risolvere problematiche pratiche, grazie alla sua versatilità e alle formulazioni generali che forniscono una descrizione efficiente dei comportamenti acustici degli spazi.

Questi tre metodi, sebbene differenti per approccio e precisione, rappresentano una gamma di strumenti complementari per l'analisi acustica, ciascuno con vantaggi specifici a seconda del contesto applicativo. (Spagnolo, R., Cingolani, E. (2008)

1.1 Trattamento acustico spazi chiusi: proprietà acustiche dei materiali

Quando un'onda sonora incontra una superficie, tre fenomeni si verificano all'interfaccia tra l'aria e il materiale: una parte dell'energia sonora viene assorbita (α'), una riflessa (r), e il resto è trasmesso attraverso il materiale verso il lato opposto (t). In particolare, le riflessioni sonore possono essere di tipo speculare, in cui l'onda è riflessa secondo le leggi della riflessione geometrica, o di tipo diffuso, in cui l'energia sonora si disperde in varie direzioni e su un intervallo di tempo più ampio (Cavanaugh, 1999).



Secondo il principio di conservazione dell'energia, la somma dei coefficienti che esprimono la percentuale dell'energia sonora incidente riflessa (r), trasmessa (t) e assorbita (α') è pari a 1:

$$\alpha' + r + t = 1$$

L'interazione tra onda sonora e ostacolo dipende anche dal rapporto tra la dimensione dell'ostacolo e la lunghezza d'onda. Un ostacolo molto più piccolo della lunghezza d'onda non interferisce col suono, mentre uno più grande lo riflette in modo speculare.

Se l'ostacolo ha una dimensione paragonabile alla lunghezza d'onda o presenta asperità, si verifica invece una riflessione complessa detta diffusione (Long, 2006).

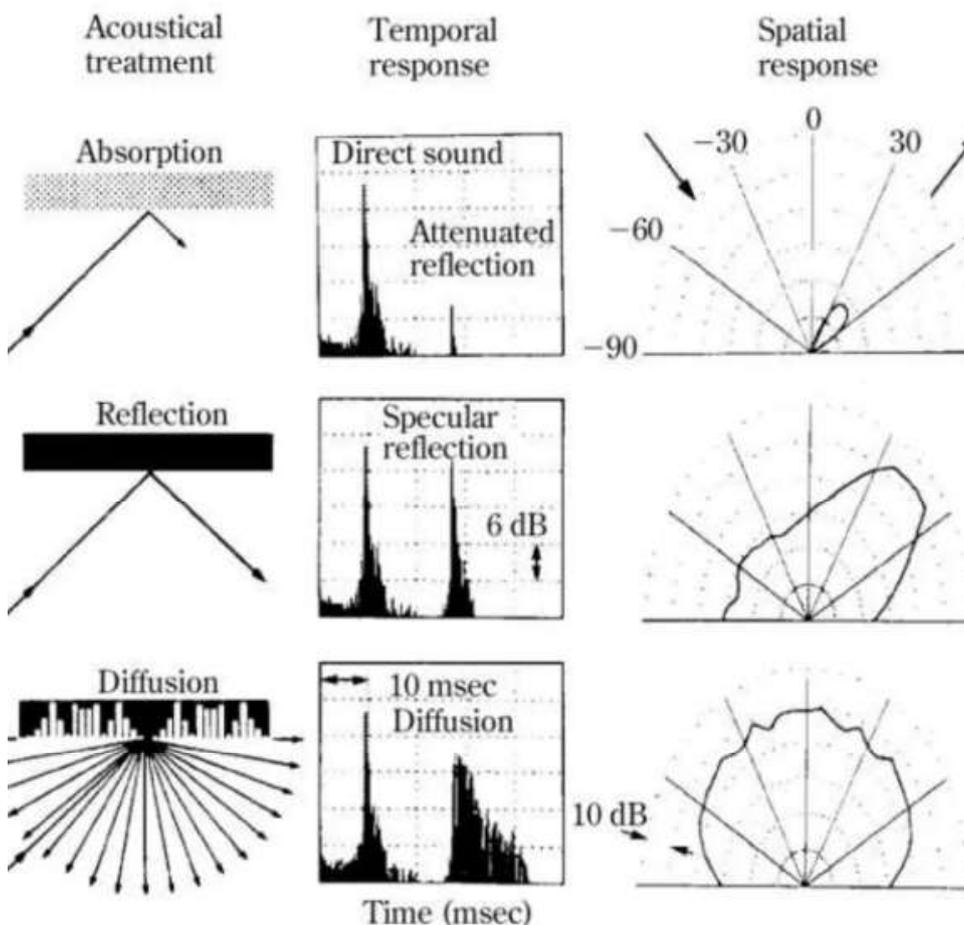


Fig 1.1.2
 Comparazione dei tre
 principi fisici: assorbimento,
 riflessione e diffusione
 www.sosylarastirmalar.com

I parametri comunemente utilizzati per descrivere l'effetto di una superficie su un'onda sonora incidente includono l'ammittenza, l'impedenza, il fattore di riflessione e il coefficiente di assorbimento. Il fattore di riflessione misura l'ampiezza e la variazione di fase mediante il rapporto tra pressione incidente e riflessa; l'impedenza della superficie (z) rappresenta la resistenza caratteristica della superficie alla pressione sonora e dipende dalla densità del mezzo e dalla velocità del suono; l'ammittenza, invece, è il reciproco dell'impedenza (Cox & D'Antonio, 2004).

Il fenomeno della riverberazione è un parametro fondamentale per l'acustica degli ambienti chiusi, rappresentando il decadimento del suono dopo l'interruzione della sorgente sonora. Questo fenomeno dipende strettamente dal tasso di riflessioni sonore in un ambiente: tempi di riverberazione più lunghi o più brevi influiscono sulla percezione del suono e sulla qualità acustica dell'ambiente. Un tempo di riverberazione troppo lungo può generare effetti di distorsione come l'eco, mentre un tempo troppo breve può portare alla percezione di un ambiente acusticamente "morto."

Il tempo di riverberazione T_{60} misura il tempo necessario affinché il livello di pressione sonora decada di 60 dB dopo l'interruzione della sorgente e, in ambienti chiusi con campo sonoro diffuso, può essere previsto utilizzando la formula di Sabine:

$$T_{60} = \frac{0.161 \cdot V}{A}$$

dove A rappresenta l'area di assorbimento acustico equivalente (la somma delle aree effettive di tutte le superfici presenti moltiplicate per i rispettivi coefficienti di assorbimento acustico), V il volume della stanza, e c la velocità del suono nel mezzo.

In ambienti con molti materiali assorbenti, la formula di Sabine non riesce a prevedere correttamente il tempo di riverberazione, e sono state sviluppate altre formule per colmare questa lacuna, come l'equazione di Eyring-Norris e quella di Millington. Grazie agli avanzamenti tecnologici, i modelli geometrici e il ray tracing sono oggi ampiamente utilizzati per simulazioni acustiche, fornendo previsioni accurate degli indicatori acustici, tra cui il tempo di riverberazione (Cox & D'Antonio, 2004).

Anche se tutti i materiali assorbono, riflettono e trasmettono energia sonora quando attraversati da un'onda, essi vengono generalmente classificati in base al fenomeno prevalente, come materiali assorbenti, riflettenti, diffondenti o trasparenti. (Spagnolo, R., Cingolani, E. (2008)

Materiale Assorbente
(rivestito con materiale Trasparente)

Materiale Riflettente

Materiale Diffondente



Fig. 1.1.3
Lewis Central Community
School District Performing
Arts Center
Council Bluffs, Iowa
www.alvine.com

Di seguito, verranno affrontati questi aspetti parlando dei materiali il cui comportamento è omologo alla caratteristica prevalente.

1.1.1 Assorbimento acustico e materiali assorbenti

Non solo nell'interfacciarsi con una superficie, ma anche durante la sua propagazione in aria si verifica assorbimento acustico di parte dell'energia sonora.

L'assorbimento in aria diventa rilevante solo in ambienti molto ampi e per frequenze relativamente alte, mentre l'assorbimento che avviene sulle superfici è variabile e dipende fortemente dal tipo di materiale utilizzato, oltre che dalla frequenza. La scelta e l'installazione dei materiali assorbenti sono, quindi, strumenti fondamentali per ottimizzare la risposta acustica di un ambiente, specialmente per quanto riguarda il tempo di riverberazione.

Le proprietà di assorbimento acustico dei materiali vengono quantificate attraverso il **coefficiente di assorbimento acustico α** , esso varia con la frequenza e l'angolo di incidenza dell'onda. In laboratorio, si misura per incidenza normale, utilizzando il metodo delle onde stazionarie su campioni di piccole dimensioni, o per incidenza casuale, in camera riverberante, su campioni più grandi.

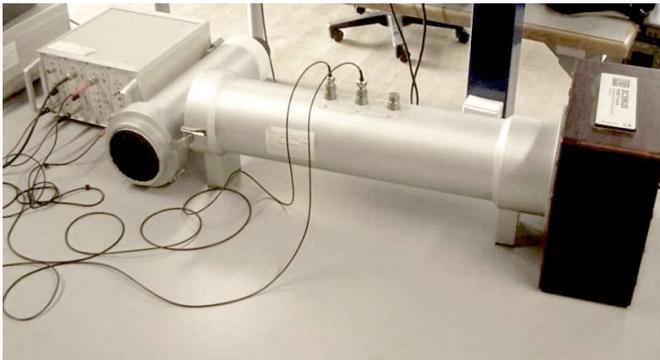


Fig. 1.1.1.1
Tubo ad impedenza per la misura del coefficiente di assorbimento ad incidenza normale.
www.researchgate.net



Fig 1.1.1.2
Camera riverberante TS-Lindgren, i pannelli riflettono i suoni per creare un campo sonoro non direzionale o diffuso all'interno della camera.
www.ets-lindgren.com

Nella pratica acustica, si utilizza il coefficiente di assorbimento acustico apparente α' per esprimere le capacità di assorbimento di un materiale, ovvero il valore ottenuto nei test acustici. Questo coefficiente indica quanta energia sonora non viene riflessa nello spazio, ma è invece assorbita dalla superficie o trasmessa attraverso il materiale.

$$\alpha' + t = \alpha$$

Il coefficiente di assorbimento acustico varia da 0 a 1: valori inferiori a 0,2 sono generalmente associati a materiali riflettenti, mentre valori superiori a 0,5 vengono definiti materiali assorbenti.

È importante sottolineare che il coefficiente acustico non fornisce informazioni sulla quantità di suono che viene trasmessa attraverso il materiale, ma solo quello che non viene riflesso. (Adams, 2016)

Siccome nelle condizioni reali le onde incidono da diversi angoli, il coefficiente di assorbimento per incidenza casuale è quello che più rappresenta le condizioni d'uso reali.

Alla base dell'assorbimento acustico vi è la conversione di una parte dell'energia sonora in calore; tuttavia, il meccanismo varia in base alla struttura dell'elemento assorbente.

Si possono distinguere tre principali meccanismi di assorbimento: per **porosità**, per **risonanza di cavità** e per **risonanza di membrana**. Ciascuno di questi produce un andamento diverso del coefficiente di assorbimento rispetto alla frequenza, come illustrato nello schema.

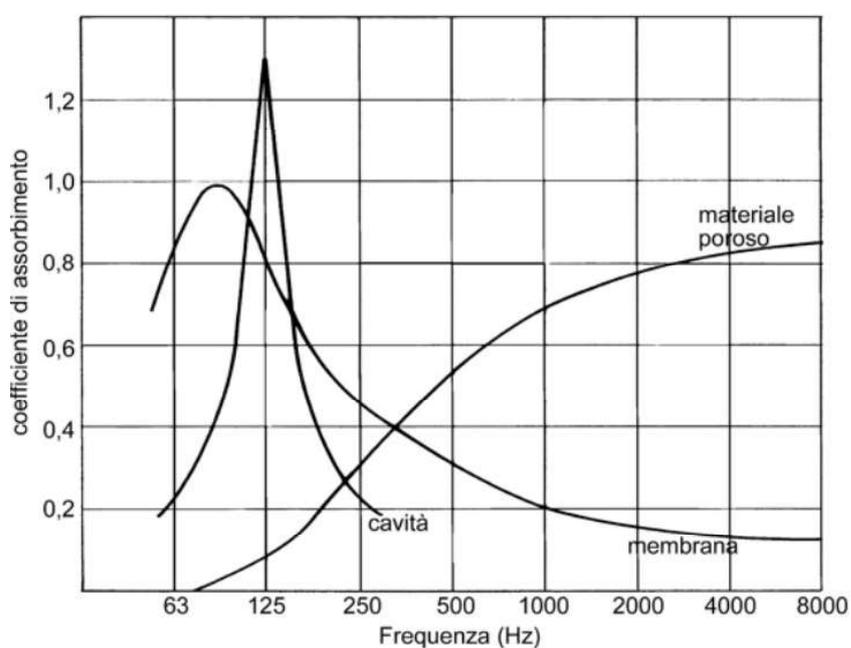


Fig. 1.1.1.3
Andamento qualitativo dell'assorbimento acustico in base ai tre diversi principi fisici fondamentali: porosità, risonanza di cavità, risonanza di membrana (Spagnolo, R., Cingolani, E. 2008)

In alcuni casi, per ampliare la gamma di frequenze su cui l'assorbimento risulta efficace, vengono utilizzate strutture composite che combinano più meccanismi. La scelta di un materiale assorbente non si basa però solo sulle proprietà acustiche: bisogna considerare anche la resistenza meccanica, l'aspetto estetico, la possibilità di essere rivestito o verniciato, il costo, il metodo di montaggio e la resistenza al fuoco. (Spagnolo, R., Cingolani, E. 2008)

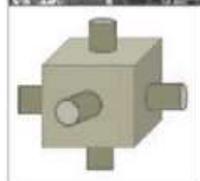
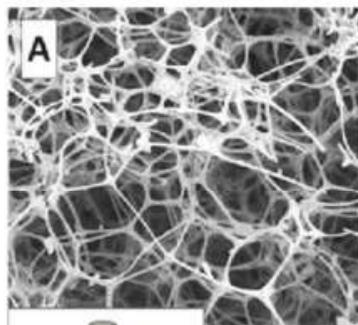
1.1.1.1 Assorbimento per porosità

I materiali porosi o fibrosi acusticamente assorbenti presentano una struttura caratterizzata da pori aperti e interconnessi, con aperture tipicamente inferiori a 1 mm, molto più piccole delle lunghezze d'onda acustiche di interesse. Quando un'onda acustica penetra in uno di questi materiali, le molecole d'aria vengono indotte a vibrare all'interno dei pori e dei canali di collegamento.

Questo movimento provoca una perdita di energia dovuta all'attrito contro le superfici esterne delle fibre o delle particelle che costituiscono il materiale. In base alle dimensioni fisiche dei pori, il materiale si comporta come un mezzo omogeneo, in cui si verificano perdite viscosi, efficaci nell'assorbire l'energia acustica. (Spagnolo, R., Cingolani, E. 2008).

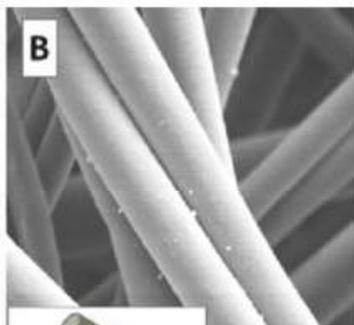
I materiali porosi vengono classificati in cellulari, fibrosi o granulari in base alla loro microstruttura.

Granulare



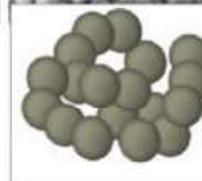
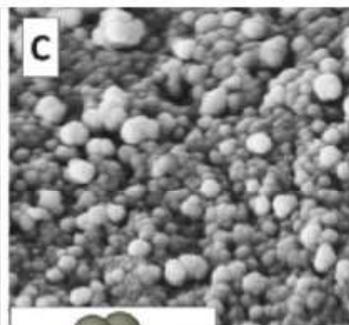
sfere sovrapposte

Fibroso



fibre parallele

Cellulare



celle interconnesse

Fig. 1.1.1.1.1
I tre principali tipi di materiali porosi utilizzati nell'assorbimento acustico
www.researchgate.net

Nei materiali fibrosi, il diametro delle fibre influisce fortemente sulla loro resistenza al flusso: le fibre naturali tendono ad avere diametri maggiori e a creare interstizi più irregolari rispetto a quelle sintetiche. In generale, maggiore è lo spessore delle fibre, maggiore è la resistenza al flusso. Alcuni materiali fibrosi, come la lana minerale, sono anisotropi, e quindi la loro efficacia varia in base all'angolo delle onde sonore incidenti. (Badino, E., 2018).

L'efficacia dell'assorbimento dipende anche dallo spessore del materiale e dalla posizione rispetto alla parete rigida sulla quale è stato apposto. Inserendo uno strato sottile di materiale assorbente lungo il percorso di un'onda stazionaria, il massimo assorbimento avviene nei punti di massima velocità delle particelle, ovvero dove l'energia dell'onda incidente viene maggiormente dissipata.

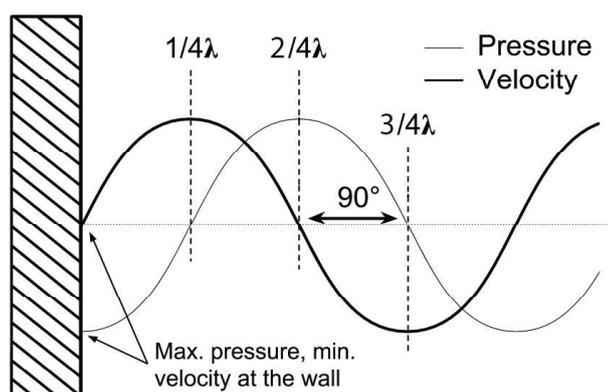


Fig. 1.1.1.1.2
Variazione di velocità e pressione dell'onda sonora in prossimità dell'interfaccia aria-superficie d'incidenza

Il primo punto di massimo assorbimento, situato vicino alla parete rigida, si trova a una distanza di $1/4$ della lunghezza d'onda, dove si verifica la velocità massima delle particelle. I successivi punti di massimo assorbimento si collocano a ogni multiplo dispari di $1/4$ della lunghezza d'onda, allontanandosi dalla parete stessa. In tale scenario ideale, l'andamento del coefficiente di assorbimento in funzione della distanza, normalizzata come $4d/\lambda$, mostra una distribuzione selettiva dell'assorbimento, con massimi posizionati a distanze $d = n(1/4)$, dove n è un numero intero dispari.

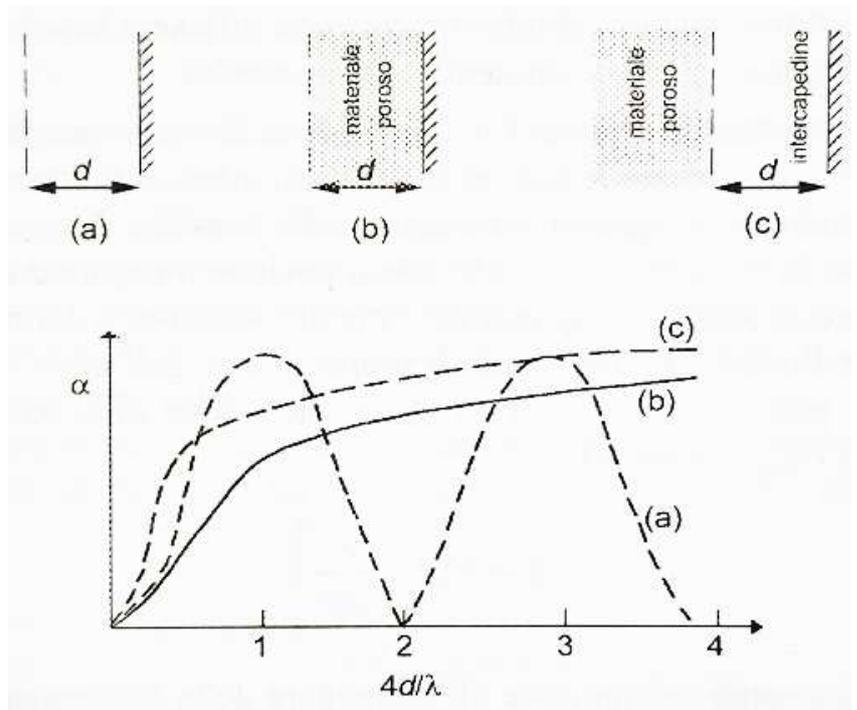


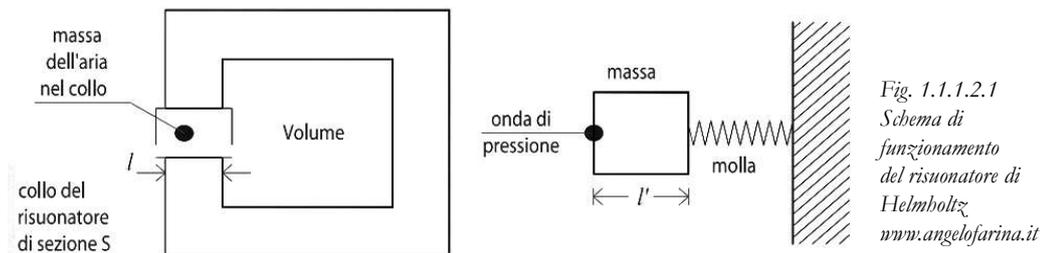
Fig 1.1.1.1.3
Effetto dello spessore del
materiale sull'andamento
del coefficiente di
assorbimento
(Spagnolo, R.,
Cingolani, E. 2008)

In sostanza, i materiali porosi presentano un'efficacia significativa nell'assorbimento acustico alle alte frequenze; tuttavia, questa efficacia tende a ridursi progressivamente con l'aumentare della lunghezza d'onda. La frequenza alla quale il coefficiente di assorbimento assume alti valori prestazionali è influenzata dallo spessore del materiale stesso e dalla presenza di un'eventuale intercapedine d'aria.

1.1.1.2 Assorbimento per risonanza di cavità

L'assorbimento acustico per risonanza si basa spesso sul principio del risonatore di Helmholtz. Come descritto nel capitolo precedente, in questo tipo di risonatore una certa quantità di aria è intrappolata all'interno di una cavità con pareti rigide, collegata all'ambiente esterno attraverso un'apertura stretta, detta collo del risonatore, caratterizzata da una lunghezza l e una sezione di area S . Quando un'onda acustica colpisce il collo del risonatore, l'aria all'interno di questa sezione viene posta in vibrazione, inducendo a sua volta delle compressioni e rarefazioni periodiche nell'aria all'interno della cavità.

Questa dinamica può essere paragonata a un sistema vibrante meccanico: l'aria nel collo del risonatore si comporta come una massa in movimento, mentre quella contenuta nella cavità agisce come una molla elastica.



La frequenza di risonanza del sistema risulta:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{Vl}}$$

Dove c è la velocità del suono.

In letteratura, sono disponibili espressioni della frequenza di risonanza di un risonatore di Helmholtz che risultano più accurate, poiché includono le perdite viscose all'interno della cavità e le correzioni di "bocca". In queste formule, la lunghezza reale l del collo è sostituita da una lunghezza equivalente, ottenuta aggiungendo alla lunghezza reale un fattore correttivo, proporzionale al raggio del collo. Come mostra l'equazione, la frequenza di risonanza risulta direttamente proporzionale alla sezione del collo, mentre è inversamente proporzionale alla lunghezza del collo e al volume della cavità.

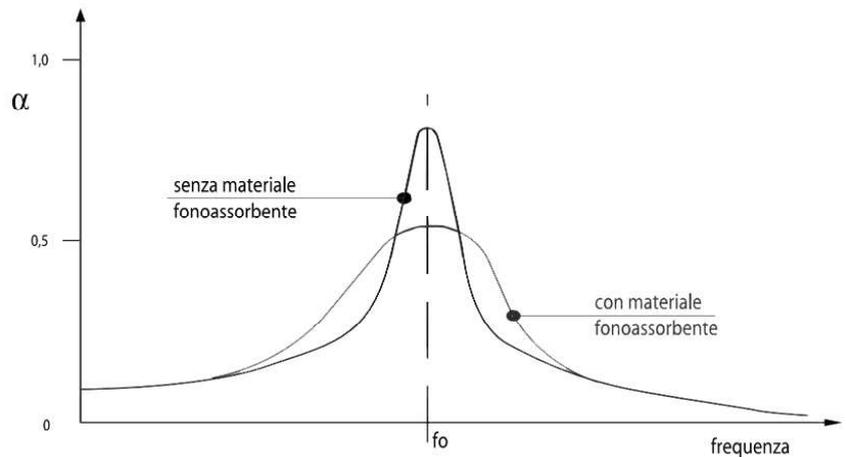


Fig. 1.1.1.2.2
 Risonatori di Helmholtz conservati dall'istituto tecnico tecnologico Montani. Il modello più grande ha un diametro di circa 184 mm ed è accordato sulla nota Do2. Seguendo dimensioni decrescenti si trovano: Sol2, Do3, Mi3, Sol3, Do4 e Re4. L'ultimo risonatore, Mi4, ha un diametro di 44 mm.
 www.istitutomontani.edu.it

Essendo strettamente legato a grandezze geometriche, l'assorbimento acustico di un risonatore di questo tipo è molto selettivo intorno alla frequenza di risonanza, come illustrato in figura, rendendolo particolarmente efficace nell'assorbire toni puri a bassa frequenza, come quelli generati dai modi di vibrazione degli ambienti, che generalmente si trovano nell'intervallo tra 50 e 400 Hz.

Se l'interno della cavità del risonatore è rivestito con un materiale poroso, l'assorbimento si modifica: il valore massimo del coefficiente di assorbimento alla frequenza di risonanza diminuisce, ma si amplia l'intervallo di frequenze su cui l'assorbimento risulta efficace, grazie agli effetti dissipativi introdotti dal materiale poroso nella cavità stessa, rendendone l'applicazione pratica ampiamente più versatile.

Fig. 1.1.1.2.3
Andamento qualitativo del coefficiente di assorbimento associato a un risonatore di Helmholtz nudo o rivestito di materiale assorbente
www.angelojarina.it



Una diffusa applicazione pratica del principio del risonatore di Helmholtz si trova nei pannelli acustici forati, composti da una struttura con fori o fessure, posizionati a una certa distanza dalla parete. In genere, nell'intercapedine tra pannello e parete viene inserito uno strato di materiale poroso. In questa configurazione, ogni foro agisce come il collo di un risonatore, mentre l'aria contenuta nell'intercapedine in corrispondenza del foro funge da cavità del risonatore.

Si può ricavare, con buona approssimazione, la frequenza di risonanza di questi pannelli attraverso la formula:

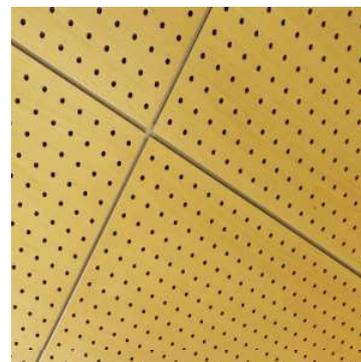
$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{Dt}}$$

Dove P è la percentuale di foratura (area forata/area del pannello interessata dalla foratura), d la distanza dalla parete, cioè lo spessore dell'intercapedine e dell'eventuale materiale poroso appostovi, t lo spessore del pannello (che corrisponde alla lunghezza del collo dei risonatori).

Dall'equazione risulta che la frequenza di risonanza dei pannelli aumenta all'aumentare della percentuale di foratura, mentre è inversamente proporzionale sia allo spessore del pannello sia alla distanza del pannello dalla parete. Considerando che nella pratica la profondità dell'intercapedine non supera solitamente i 30 cm, con percentuali di foratura tra il 10% e il 50% e uno spessore del pannello compreso tra 3 e 30 mm, le frequenze di risonanza dei pannelli forati tendono a rientrare nell'intervallo tra 200 Hz e 5 kHz.

Le prestazioni di assorbimento di questi pannelli possono risultare particolarmente elevate, specialmente se nell'intercapedine viene inserito del materiale poroso assorbente (Spagnolo, R., Cingolani, E. 2008), inoltre, in presenza della cavità di un risonatore, le particelle d'aria sono soggette a variazioni di direzione, che le spingono a concentrarsi in modo particolare verso il foro. Quando sono presenti più fori, l'interazione reciproca tra di essi provoca l'insorgere di fenomeni dissipativi anche a frequenze diverse da quella di risonanza. Di conseguenza, i pannelli forati presentano uno spettro di assorbimento più ampio rispetto a quello prodotto da un singolo risonatore. L'adozione di fori di varie dimensioni contribuisce ulteriormente all'estensione dello spettro di assorbimento, anche se ciò comporta una riduzione dell'efficienza alle singole frequenze. Questi effetti, combinati all'azione di un materiale poroso inserito nella cavità, consentono la realizzazione di pannelli fonoassorbenti ad ampio spettro di frequenze (Fausti, P. et al., 2021).

Fig. 1.1.1.2.4
 Dettaglio di pannelli
 forati in legno
 www.acousticlab.com



Nell'articolo "Experimental and Theoretical Analysis of Sound Absorption Properties of Finely Perforated Wooden Panels" pubblicato su Materials sono state studiate le proprietà di assorbimento di pannelli di legno perforati con piccoli fori di diametro compreso tra 1 e 3 mm, sia sperimentalmente che teoricamente.

Sono stati applicati dei modelli matematici Maa-MPP (micro perforated panels) e Maa-Flex per prevedere l'andamento dei valori di assorbimento dei pannelli forati.

Come illustrato in figura, i coefficienti di assorbimento (SAC) ottenuti tramite esperimenti completi e simulazioni numeriche sono stati confrontati per dimostrare la validità del modello di calcolo Maa-MPP.

Le frequenze di picco dell'assorbimento acustico si trovano nell'intervallo compreso tra 200 e 500 Hz. Con l'aumento dello spessore del pannello o della distanza tra i fori, la resistenza relativa aumenta, causando un incremento dei valori di picco dell'assorbimento, un abbassamento delle frequenze di picco e un restringimento della larghezza di banda di assorbimento. Con l'aumento del diametro dei fori, i valori di picco dell'assorbimento diminuiscono, le frequenze di picco si spostano verso frequenze più alte e la larghezza di banda di assorbimento si amplia.

Hole Distance	Perforation Diameter		
	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm
8 mm	1.23%	2.76%	4.91%
10 mm	0.79%	1.77%	3.14%

Fig. 1.1.1.2.5
 Schema con
 parametri
 geometrici dei
 pannelli forati
 www.mdpi.com

Gli esperimenti sono stati eseguiti su pannelli in legno di tre spessori (t) (5, 8 e 10 mm), con 3 diametri differenti dei fori (1,0 ; 1,5 e 2.0 mm) (d) e con due distanziamenti tra i fori (8 e 10 mm) (Song, B. et al., 2016).

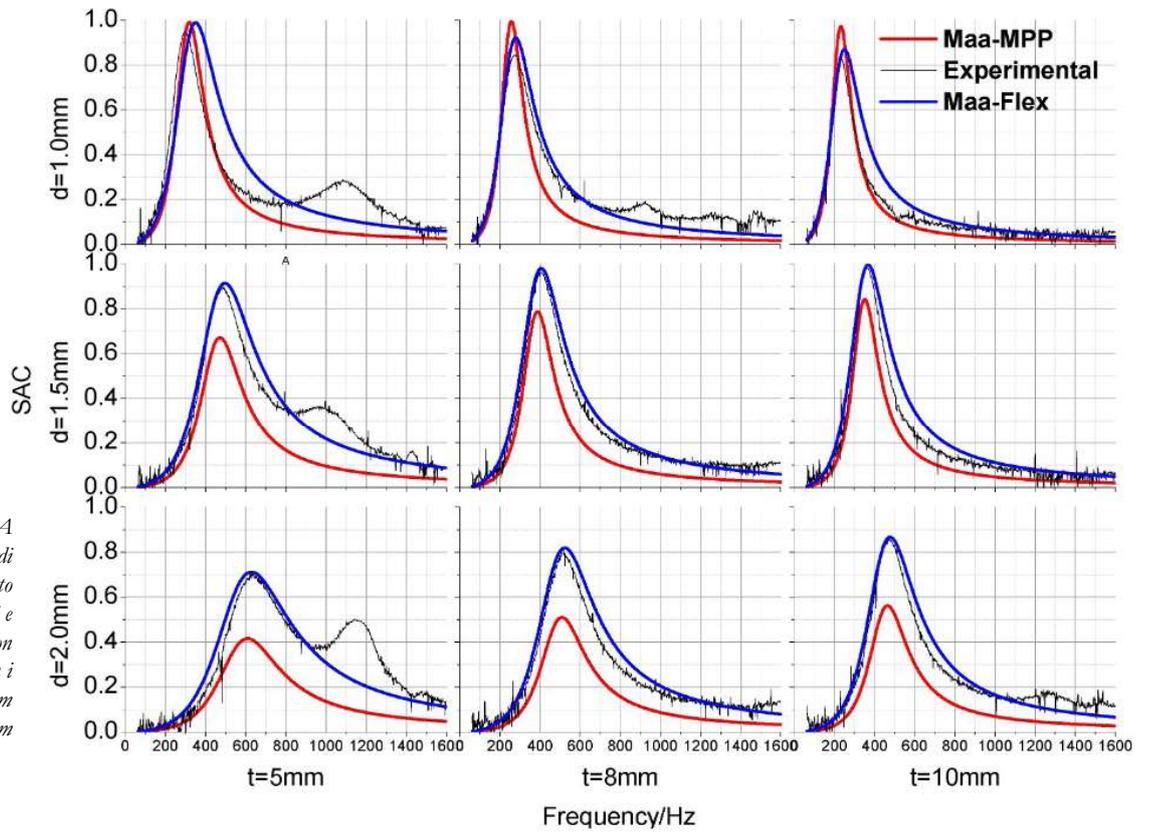


Fig. 1.1.1.2.A
Valori di assorbimento misurati e calcolati con distanza tra i fori di 8 mm
www.mdpi.com

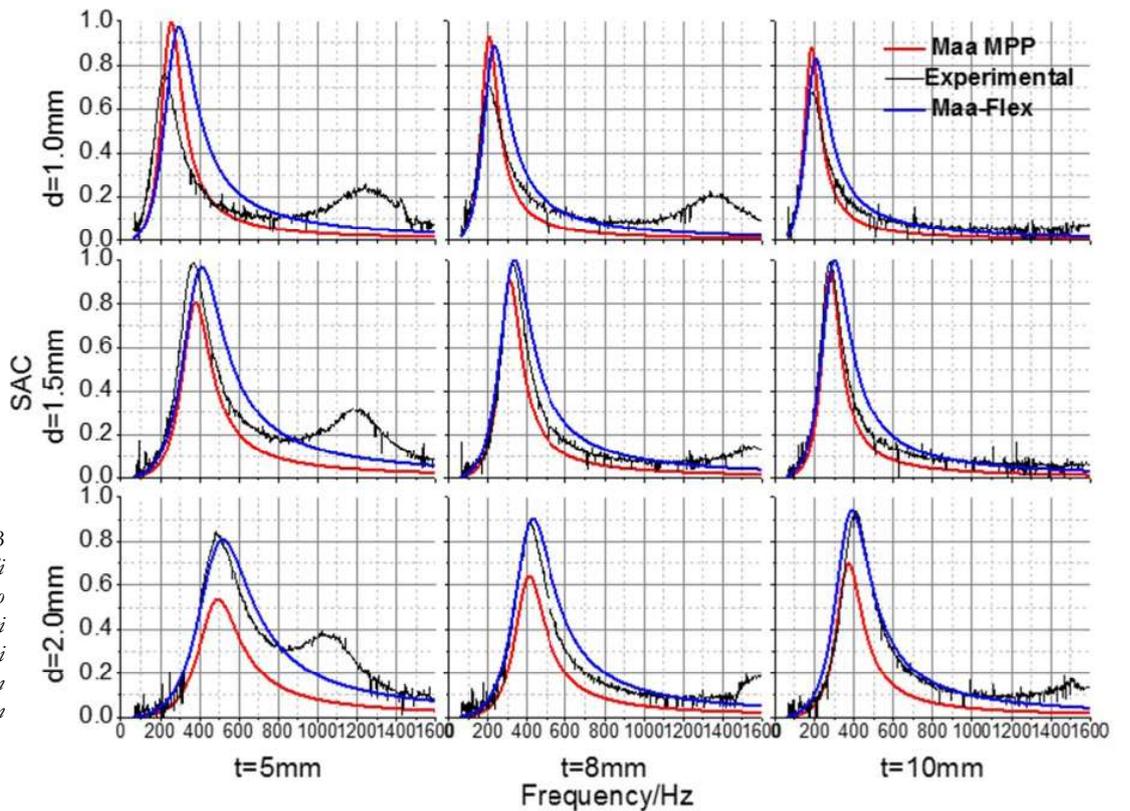


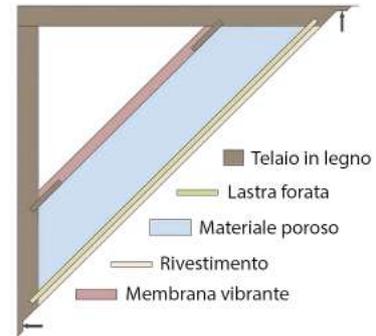
Fig. 1.1.1.2.B
Valori di assorbimento misurati e calcolati con distanza tra i fori di 10 mm
www.mdpi.com

1.1.1.3 Assorbimento per risonanza di membrana

Il comportamento di un sistema costituito da un pannello sottile posto a una distanza moderata da una parete rigida può essere analizzato in maniera analoga al risonatore di Helmholtz.



Fig. 1.1.1.3.1
Bass Trap angolare,
utilizzante, tra gli
altri, il principio della
membrana vibrante.
www.musicalecer.com



In questo contesto, il pannello agisce come una massa vibrante, mentre l'aria racchiusa nell'intercapedine tra pannello e superficie rigida funge da molla acustica, con una rigidità definita dalle caratteristiche fisiche del sistema. In linea teorica, anche la dissipazione di energia dovuta allo smorzamento interno del pannello contribuisce all'assorbimento, sebbene, in generale, la sua entità risulti trascurabile rispetto al fenomeno risonante predominante.

La frequenza di risonanza del pannello viene determinata con la seguente formula:

$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{md}}$$

Dove m (kg/m^2) è la massa per unità d'area, e d la distanza dalla parete, l'intercapedine.

Da questa relazione si nota come la frequenza di massima capacità di assorbimento decresca con l'aumentare della massa specifica del pannello e della profondità dell'intercapedine d'aria tra pannello e parete.

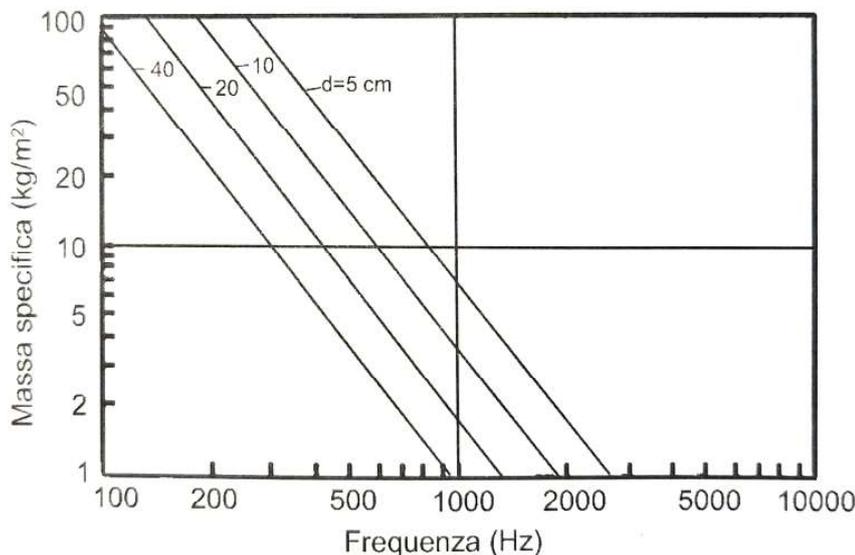


Fig. 1.1.1.3.2
Schema con
parametri
geometrici dei
pannelli forati
www.mdpi.com

I Grafici dello studio “Development of a Panel Membrane Resonant Absorber” pubblicato su Applied Sciences mostrano, tra gli altri esperimenti, come “aumentando lo strato d’aria dietro la rete metallica espansa, la banda di frequenza di assorbimento diventava più ampia, e la frequenza di risonanza si spostava verso frequenze più basse.” (Tsay, Y. et al., 2021)

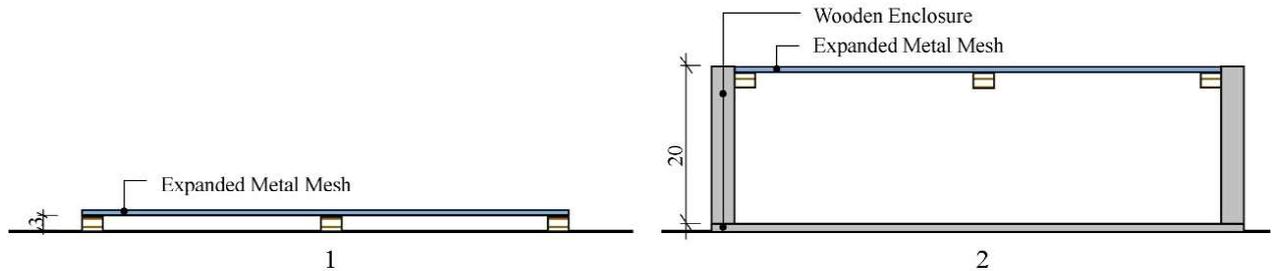
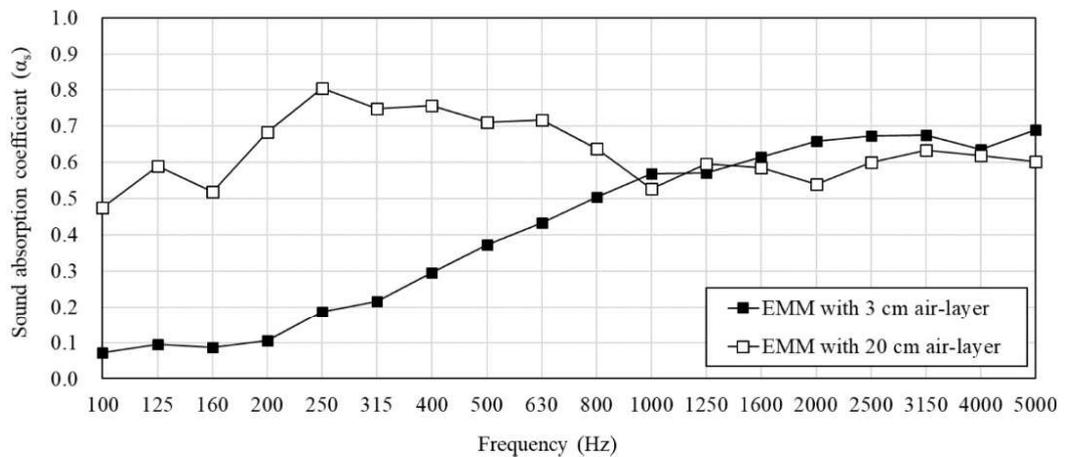


Fig. 1.1.1.3.5 e 6
Sezione del pannello
oggetto dell'esperimento
montato con due
differenti
intercapedini e relativo
grafico di assorbimento
www.mdpi.com



Come nel caso dei risonatori di Helmholtz, anche con i pannelli vibranti si può applicare il principio di apposizione di materiale assorbente nell'intercapedine, praticando dei fori o aperture tali da permettere al materiale poroso di ricevere l'onda sonora (Spagnolo, R., Cingolani, E. 2008).

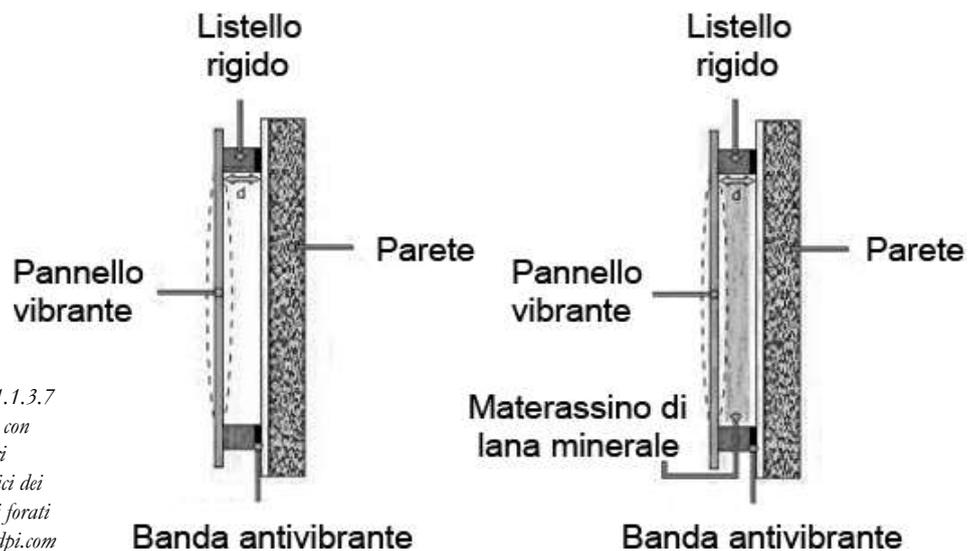


Fig. 1.1.1.3.7
Schema con
parametri
geometrici dei
pannelli forati
www.mdpi.com

1.1.1.4 Elementi e corpi assorbenti

Per tutti quegli elementi presenti in un ambiente che costituiscono una presenza acusticamente rilevante, come sedute, installazioni, le stesse persone presenti, occorre reintrodurre il concetto di Area di Assorbimento equivalente (A) sopracitato nel paragrafo che trattava della formula di Sabine per il calcolo del T_{60} .

In questo caso diventa essenziale eseguire delle misure riproducendo il più fedelmente possibili le condizioni di esercizio dell'elemento (ad es. distanza tra le singole sedute o le loro file). Per la presenza di persone o pubblico presente si può fare affidamento a tabelle che valutano valori medi al m^2 per poltrone occupate o non occupate, diversamente rivestite ed imbottite; valori unitari (quindi in riferimento ad $1 m^2$) persone in piedi, musicisti con strumenti, ecc. “(altri dati possono essere reperiti in p. es. in Beranek, 1996, appendice 5, e in Meta et al., 1999, appendice b)” (Spagnolo, R., Cingolani, E. 2008).

	Frequenza (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Persone in piedi	0,17	0,41	0,91	1,30	1,43	1,47
Musicisti con strumenti	0,60	0,95	1,06	1,08	1,08	1,08
Poltrone in legno, 2 persone per m^2	0,24	0,40	0,78	0,98	0,96	0,87
Poltrone in legno, 1 persona per m^2	0,16	0,24	0,56	0,69	0,81	0,78
Poltrone mediamente imbottite, 0,85 m x 0,63 m	0,72	0,82	0,91	0,93	0,94	0,87
Poltrone mediamente imbottite, 0,9 m x 0,55 m	0,55	0,86	0,83	0,87	0,90	0,87

Fig. 1.1.1.4.1
Tabella con valori di assorbimento di pubblico e sedute (Spagnolo, R., Cingolani, E. 2008)

1.2 Diffusione e diffusori del suono

Un'elevata diffusione del campo acustico promuove una serie di qualità rilevanti nell'ambiente di applicazione, quali, soprattutto, una distribuzione sufficientemente uniforme dell'energia sonora in ogni punto dello spazio e una regolarità negli incrementi e nei decadimenti temporali del suono. Da questa prospettiva, la ricerca di una diffusione adeguata del suono rappresenta uno degli obiettivi primari nella progettazione acustica.

La diffusione sonora può essere ottenuta seguendo diversi principi e adottando varie soluzioni tecniche e spesso un certo grado di diffusione è determinato naturalmente dalla presenza di oggetti o strutture interne che nell'ambiente interferiscono con la propagazione delle onde, alterandone il percorso, o da irregolarità superficiali che, come visto, inducono riflessioni diffuse piuttosto che speculari.



Fig. 1.2.1
Diffusore acustico
www.oneframe.co.nz

L'irregolarità della forma dell'ambiente, ad esempio, dove l'assenza di parallelismo tra superfici diminuisce drasticamente la formazione di onde stazionarie derivanti dalla sovrapposizione dei percorsi dell'onda diretta e di quella riflessa è un principio ampiamente sfruttato nella progettazione delle camere riverberanti, in cui la diffusività sonora è una priorità assoluta, così come l'impiego di pannelli con superfici curve la cui convessità sia orientata verso la riflessione dell'onda affinché l'energia sonora incidente sul pannello tenda a disperdersi lungo un ampio ventaglio di direzioni, diversamente da quanto accade con superfici concave, propense invece a focalizzare il suono.

Fig. 1.2.2
Riflessioni da una superficie convessa (a)
e da una superficie concava (b).
(Spagnolo, R., Cingolani, E. 2008)

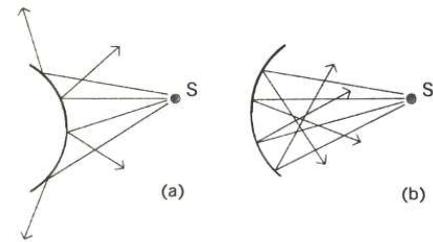
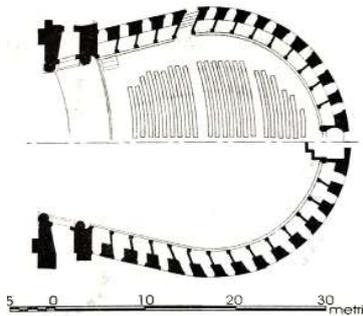


Fig. 1.2.3
Pianta del Teatro San Carlo,
Napoli.
(Spagnolo, R., Cingolani, E. 2008)



Anche la disposizione dei materiali assorbenti sulle superfici può migliorare la diffusione del campo acustico, qualora essi vengano collocati in maniera alternata e irregolare su porzioni di superfici riflettenti e rigide piuttosto che distribuiti uniformemente. Tale configurazione genera brusche discontinuità di impedenza acustica, provocando distorsioni significative nel fronte d'onda riflesso (Spagnolo, R., Cingolani, E. 2008).

“Per la Qualità del suono nella platea dei teatri del tipo in considerazione è importante il rapporto tra l'estensione delle aperture dei palchi e quella delle fasce opache al suono. In molti teatri barocchi era fatto largo uso del legno, e in particolare di pannelli sospesi in legno decorato. Queste strutture si comportano come sistemi fonoassorbenti efficaci alle frequenze basse” (Spagnolo, R., Cingolani, E. 2008).



Fig. 1.2.4
Teatro San Carlo, Napoli.
immagine: www.anfols.it

Gli accorgimenti sopra elencati presentano tuttavia due limitazioni rilevanti: la necessità di ricorrere a elementi o irregolarità di dimensioni fisiche considerevoli per ottenere effetti significativi alle basse e medie frequenze, caratterizzate da lunghezze d'onda elevate; e la difficoltà di prevedere le loro prestazioni in maniera affidabile e quantitativa, anziché solo qualitativa. In linea di principio, queste problematiche possono essere superate con l'introduzione di dispositivi specifici, ossia i diffusori acustici.

1.2.1 Diffusori di Schroeder

Dalla loro ideazione, i diffusori acustici di Schroeder hanno conosciuto varie evoluzioni. Tra questi, i più diffusi nella realizzazione pratica si basano su sequenze periodiche di residui quadratici, fisicamente realizzate come una serie di scanalature di uguale larghezza ma di profondità variabile, separate da sottili setti rigidi. La profondità massima di ciascuna scanalatura è stabilita in funzione della lunghezza d'onda più grande del suono da diffondere, mentre la larghezza deve essere inferiore alla metà della minima lunghezza d'onda da diffondere.



Fig. 1.2.1.1
Diffractal 21-GL di Schubert Studio Akustik, diffusore a residui quadratici per frequenze da 20 a 250 Hz. schubertstudio.eu

Considerando una superficie rigida caratterizzata da rilievi di altezza d e un fronte d'onda acustico che la raggiunge in direzione perpendicolare, la modalità di riflessione del fronte d'onda dipenderà dall'altezza dei rilievi rispetto alla sua lunghezza d'onda: Possiamo analizzare tre casi distinti:

- Se $d \ll \lambda$, la superficie si comporta come se fosse perfettamente liscia, riflettendo il fronte d'onda in maniera speculare.
- Se $d = \lambda/4$, i fronti d'onda riflessi dalla sommità dei rilievi risultano anticipati di $\lambda/2$ rispetto a quelli riflessi dalla superficie sottostante. Di conseguenza, nella direzione normale, le componenti del fronte d'onda si annullano, e non vi è propagazione di pressione sonora in questa direzione. Tuttavia, non essendovi alcuna dispersione di energia nel sistema, il fronte d'onda deve necessariamente essere riflesso in altre direzioni. Man mano che ci si discosta dalla direzione normale, le differenze di percorso tra il rilievo e la superficie si riducono, incrementando l'ampiezza del fronte d'onda. Questo è il principio alla base della diffusione tramite riflettori rigidi: la superficie diffusante altera la fase dei fronti d'onda, inducendo il fronte riflesso a propagarsi in direzioni differenti da quella speculare.
- Se $d = \lambda/2$, i fronti d'onda riflessi dai rilievi e dalla superficie si allineano nuovamente in fase, giungendo all'osservatore come un'onda unica. In questo caso, i rilievi non generano alcuna variazione rilevante e la superficie agisce come se fosse liscia, riflettendo in maniera speculare.

Una sequenza regolare di rilievi genererà quindi diffusione del suono, ma solo alle frequenze che siano multipli dispari di $\lambda/4$. Inoltre, tali frequenze saranno influenzate dall'angolo d'incidenza del fronte d'onda in arrivo. Per ottenere una riflessione diffusiva ottimale nel più ampio spazio di frequenze è dunque necessario un pattern, una sequenza, di rilievi che alteri le fasi delle onde incidenti: solitamente la profondità delle scanalature segue una sequenza con fattori di forma ricavabili in più modi:

- **Le sequenze di massima lunghezza (MLS):** furono le prime ad essere utilizzate da Schroeder. La scelta di queste sequenze è dovuta alla loro caratteristica di distribuire uniformemente l'energia su tutte le frequenze. Utilizzando le MLS, si ottiene un diffusore efficace per una singola ottava di frequenze, un limite che può essere superato impiegando diverse sequenze numeriche per coprire un intervallo di frequenze più ampio (Ninni, E., 2019).
- **Sequenze a residui quadratici:** la profondità di ciascuna scanalatura è calcolata come $n^2 \bmod p$, dove p è un numero primo. Se prendiamo $p = 5$, otteniamo una serie pari a: 0, 1, 4, 4, 1, 0, 1, ... con periodicità di 5, che si ripete quindi ogni 5 valori (Howard, D. M., Angus, J. A. S., 1996).
- **Sequenze di radici primitive:** la profondità della scanalatura è calcolata come $a^n \bmod p$, dove p è un numero primo e a una costante chiamata radice primitiva. Per esempio, con $a = 2$ e $p = 5$, otteniamo la sequenza: 1, 2, 4, 3, 1, ... con periodicità di 4 ($p - 1$) (Howard, D. M., Angus, J. A. S., 1996).
- **Altre sequenze:** secondo il teorema di Wiener-Khinchine, la trasformata di Fourier di una funzione di autocorrelazione fornisce lo spettro di potenza. Applicando la trasformata di Fourier all'autocorrelazione dei coefficienti di riflessione speculare, si ottiene la distribuzione dell'energia dispersa. Pertanto, un buon diffusore dovrebbe presentare una funzione di autocorrelazione dei coefficienti di riflessione che si avvicina a una funzione Delta di Dirac.

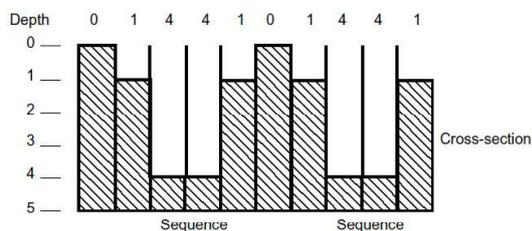
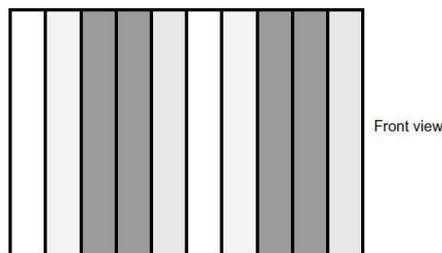


Fig. 1.2.1.2
 Tipica costruzione
 di un diffusore a
 residuo quadratico,
 pianta e vista
 frontale
 (Howard, D. M.,
 Angus, J. A. S.,
 1996)



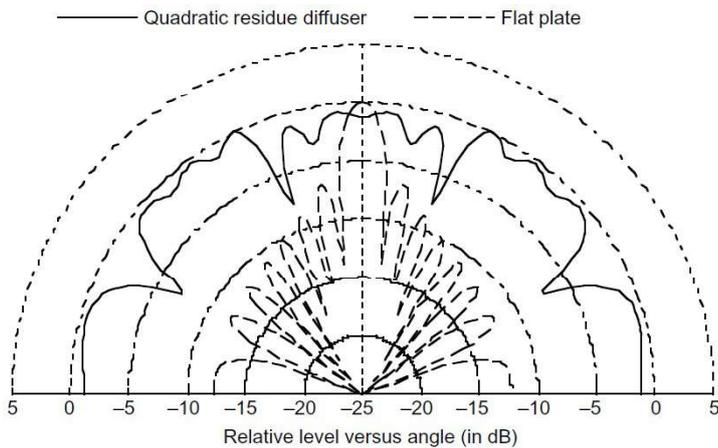


Fig. 1.2.1.3
Prestazioni tipiche di un diffusore a residui quadratici rispetto a una piastra piana; per comodità di rappresentazione le risposte sono state normalizzate a 0 dB nella direzione speculare. (Howard, D. M., Angus, J. A. S., 1996)

Questi diffusori, detti anche a reticolo di fase, possono essere classificati come monodimensionali o bidimensionali. In presenza di una diffusione semicilindrica, i diffusori sono considerati unità monodimensionali, mentre in caso di una diffusione emisferica, i diffusori assumono la forma di unità bidimensionali (Ninni, E., 2019).

Queste sequenze ottengono le loro prestazioni distribuendo la fase del fronte d'onda riflesso su almeno un ciclo del fronte d'onda incidente. Per fare ciò, la loro profondità massima deve essere pari a $\lambda/2$ della frequenza di progetto più bassa. Questo implica che, per ottenere una diffusione adeguata anche alle medio basse frequenze sia necessaria una profondità significativa. Ad esempio, per avere una diffusione efficace fino a 500 Hz, è necessaria una profondità di 34 cm. Per arrivare a 250 Hz, questa profondità dovrebbe essere raddoppiata. Tuttavia, anche un semplice rilievo di $\lambda/4$ può fornire diffusione, seppure con una certa dipendenza dalla frequenza in oggetto; essa rappresenta il limite minimo per un diffusore acustico (Howard, D. M., Angus, J. A. S., 1996).

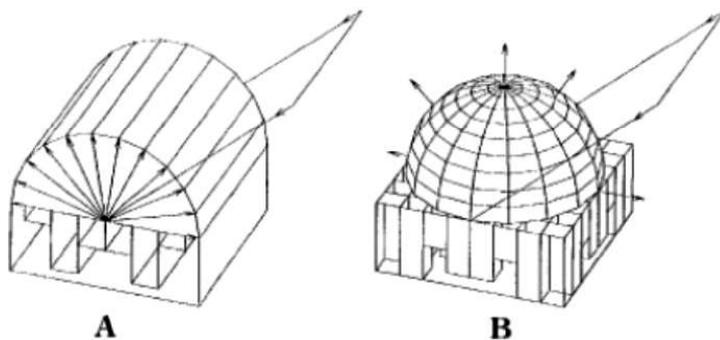


Fig. 1.2.1.4
Diagrammi di diffusione: semicilindrico, di un diffusore a retico quadratico monodimensionale (A) e emisferico, di un diffusore bidimensionale (B) (Ninni, E., 2019)

L'introduzione dei diffusori di Schroeder ha non solo stimolato l'approfondimento dello studio di dispositivi analoghi basati su principi differenti, ma ha anche incentivato l'adozione di grandezze misurabili capaci di quantificare la riflessione diffusa da una superficie, analogamente a quanto il coefficiente di assorbimento definisca la porzione di energia incidente che viene assorbita, mediante procedure standardizzate in ambienti anecoici o riverberanti. (Spagnolo, R., Cingolani, E. 2008)

1.3.1.1 Coefficiente di scattering e di diffusione

Negli ultimi decenni è cresciuto l'interesse verso le proprietà diffondenti dei materiali e i relativi metodi di misurazione. Questo fenomeno è legato principalmente a due esigenze: da un lato, migliorare l'accuratezza dei modelli di acustica geometrica (Geometric Room Acoustic Model - GRAM), e dall'altro, disporre di un parametro che permetta di classificare i materiali in base al loro grado di diffusività sonora.

Per rispondere a queste esigenze, strettamente correlate ma distinte, sono stati introdotti due diversi coefficienti: il coefficiente di scattering, utilizzato nei modelli GRAM, e il coefficiente di diffusione sonora, rilevante per i produttori di materiali diffondenti. Questa distinzione non è sempre chiara, tanto che ricercatori e studiosi si sono impegnati a specificare quando è opportuno impiegare un coefficiente piuttosto che l'altro. In particolare, il coefficiente di scattering indica quantitativamente quanta energia viene riflessa in modo non speculare, mentre il coefficiente di diffusione sonora offre informazioni sull'uniformità delle riflessioni sonore.

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

*Fig. 1.2.1.1.1
Confronto tra coefficiente di scattering e coefficiente di diffusione sonora.
(Ninni, E., 2019)*

La loro diversa natura è ulteriormente confermata dalla standardizzazione di due specifiche norme ISO: la ISO 17497-1 per la misurazione del coefficiente di scattering e la ISO 17497-2 per quella del coefficiente di diffusione sonora.

1.3 Parametri acustici oggettivi

In riferimento alla normativa UNI 11532 entrata a far parte del corpo normativo nazionale italiano il 5 Marzo 2020, i parametri oggettivi applicati dalla presente nelle misurazioni e/o nelle simulazioni anche solo come strumento di controllo ausiliare, sono stati i seguenti:

- **Tempi di riverberazione**, nello specifico T_{30} , T_{20} , **EDT**
- **Indice di Definizione, D50**
- **Indici di Chiarezza, C_{50} , C_{80}**
- **Tempo baricentrico T_s**

Inoltre, secondo normativa, è stato misurato e valutato in progetto anche lo **Speech Transmission Index (STI)**, parametro acustico utilizzato per valutare la qualità dell'intelligibilità del parlato in un ambiente. Indica quanto chiaramente una persona può comprendere la parola in un dato ambiente, considerando diversi fattori come il rumore di fondo, la riverberazione, e le caratteristiche del sistema di diffusione del suono. Esso si applica alle categorie A1, A2, A3 ed A4 di cui alla Fig. 1. Per ambienti di dimensioni inferiori ai 250 m³ in alternativa allo STI può essere utilizzato il descrittore C_{50} . I valori di riferimento per STI sono indicati nell'immagine sottostante e sono riferiti ad ambiente arredato e con la presenza di due persone al massimo (Tecnici rilevatori).

Valori di <i>STI</i>	Qualità del parlato in accordo con la CEI EN 60268-16
$0 < STI \leq 0,3$	Pessimo
$0,3 < STI \leq 0,45$	Scarso
$0,45 < STI \leq 0,6$	Accettabile
$0,6 < STI \leq 0,75$	Buono
$0,75 < STI \leq 1$	Eccellente

Fig. 1.3.1
Relazione tra STI e qualità della comprensione del parlato
UNI 11532-1

1.3.1 Calcolo dello Speech Transmission Index (STI)

Da normativa UNI 11532-1:

Le prestazioni del percorso di trasmissione vengono quantificate mediante la determinazione della funzione di trasferimento della modulazione per le 7 bande di ottava da 125 Hz a 8 kHz, ottenendo $7 \times 14 = 98$ valori di fattore di riduzione della profondità di modulazione m per ogni posizione d'ascolto. I valori di m sono corretti per tenere conto degli effetti di mascheramento uditivo, cioè la riduzione della sensibilità uditiva dovuta a suoni più forti nella banda contigua a più bassa frequenza, e della soglia assoluta di ricezione.

Descrizioni in dettaglio delle tipologie d'utilizzo			
Categoria	Descrizione dell'utilizzo	Obiettivo qualitativo	Esempi
A1	Musica Prevalentemente rappresentazioni musicali	Buona acustica per musica non amplificata; ammessa limitata comprensione del parlato	Aule per la musica con musica suonata e canto
A2	Parlato/Conferenze Presentazioni parlate dove si ha un oratore frontale;	Elevato grado di intelligibilità del parlato	Aule didattiche, Aule magne
A3	A3.1 Ambienti della categoria A2 per persone che hanno problemi di deficit uditivi o parlano una lingua diversa ovvero aule speciali	Elevato grado di intelligibilità del parlato anche per persone con deficit uditivi o non madrelingua oppure con differenze linguistiche	Aule didattiche, Aule magne
	A3.2 Parlato Comunicazione con la presenza contemporanea di più persone parlanti nell'aula	Elevato grado di intelligibilità del parlato anche con più oratori contemporaneamente	Aule didattiche, aule per colloqui, aule per seminari, aule per gruppi studio o di lavoro, laboratori, uffici amministrativi, aula insegnanti e similari
A4	Più persone parlanti nella stanza (come Categoria A3.2) e destinate a persone con particolari necessità (aule speciali) Escluse aula speciale di volume superiore a 500 m ³ , oppure per	Elevato grado di intelligibilità del parlato con più oratori contemporaneamente, e per persone con deficit uditivi o non madrelingua oppure con differenze linguistiche	Aule didattiche, aule per colloqui, aule per seminari, aule per gruppi studio o di lavoro, laboratori, uffici amministrativi, aula insegnanti e similari. Ambienti per le videoconferenze
	utilizzo musicale		
A5	Sport: piscine e palestre e similari	Comunicazione verbale possibile ma a distanze brevi	Palestre piscine per utilizzo come ambienti sportivi in generale

Categoria	Descrizione dell'utilizzo	Esempi
A6.1	Spazi senza permanenza	Vani scala
A6.2	Spazi con permanenza ridotta	Spogliatoi palestre e similari
A6.3	Ambienti per la permanenza a lungo termine e/o di collegamento	Ambienti espositivi con interattività oppure sorgente di rumore elevata (Multimedia, arte visive e suoni, ecc) Spazi di studio, spazi/corridoi per attività didattiche alternative/ricreative, in scuole di ogni ordine e grado. Laboratorio, Biblioteche
A6.4	Ambienti con necessità di riduzione del rumore e di comfort nell'ambiente	Reception / area desk (bidelleria) con postazione di lavoro fissa Laboratorio con postazione di lavoro fissa, mense in scuole di ogni ordine e grado. Area distribuzione nelle mense
A6.5	Ambienti con particolare necessità di riduzione del rumore e di comfort nell'ambiente	Sale da pranzo. Aule e spogliatoi nelle scuole materne e nido

Fig. 1.3.1.1
Tabelle con descrizione dettagliata di utilizzo per le categorie da A1 a A6
UNI 11532-2

Entrambi gli effetti sono considerati come un rumore immaginario che comporta un decremento dell'effettivo rapporto segnale/rumore, e quindi una riduzione della profondità di modulazione. L'effetto del mascheramento è rappresentato come una linea retta la cui pendenza dipende dal livello del segnale nella banda di ottava precedente. L'intensità dovuta all'effetto del mascheramento uditivo nella banda di ottava f si ottiene dalla seguente relazione:

$$I_{am,f} = I_{f-1} \cdot amf$$

dove I_{f-1} è l'intensità nella banda di ottava precedente (banda di ottava $f-1$) amf è il fattore dimascheramento uditivo dipendente dall'intensità (I_{f-1}). L'intensità (I_{f-1}) per una banda di ottava $f-1$ è data da:

$$I_{f-1} = 10^{\left(\frac{L_{f-1}}{10}\right)}$$

dove L_{f-1} è il livello di pressione sonora nella banda $f-1$, in decibel.

Il fattore di mascheramento uditivo amf per la banda di ottava f dipende dall'intensità della banda $f-1$.

In Fig. sono riportati i valori del livello di mascheramento uditivo in decibel ($amdB$) per la banda di ottava f in funzione del livello di pressione sonora L (dB) nella banda di ottava $f-1$. Si fa notare che il livello di mascheramento uditivo è funzione del livello totale di pressione sonora in quella banda di ottava, che comprende sia il parlato che il rumore ambientale.

La banda di ottava 125 Hz non è mascherata.

Fig. 1.3.1.2
Livello di mascheramento uditivo in funzione del livello nella banda di ottava
UNI 11532-1

Livello nella banda d'ottava $f-1$ (dB)	<63	≥63 e <67	≥67 e <100	≥100
Mascheramento uditivo $amdB$ (dB)	$0,5 \times L - 65$	$1,8 \times L - 146,9$	$0,5 \times L - 59,8$	-10

Il fattore di mascheramento uditivo amf per una banda di ottava è dato dalla relazione:

$$amf = 10^{\left(\frac{amdB}{10}\right)}$$

La soglia assoluta di udibilità è intesa come un intrinseco limite inferiore del livello di rumore all'interno di ogni banda di ottava che riduce l'effettivo rapporto segnale rumore quando i livelli del parlato sono bassi. La soglia assoluta di udibilità è riportata in Fig. 1.4.1.3, in decibel, come livello in ogni banda di ottava ($L_{rs,f}$).

Fig. 1.3.1.3
Soglia assoluta di udibilità nelle bande di ottava
UNI 11532-1

		Frequenza centrale delle bande di ottava (Hz)						
		125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
Soglia assoluta di udibilità (dB)	$L_{rs,f}$	46	27	12	6,5	7,5	8	12

L'intensità della soglia assoluta di udibilità per una banda di ottava f è data da:

$$I_{rs,f} = 10^{\left(\frac{L_{rs,f}}{10}\right)}$$

dove $L_{rs,f}$ è la soglia assoluta di udibilità per la banda di ottava f , in decibel.

I fattori di riduzione della modulazione $m_{f,F}$ sono corretti secondo la relazione:

$$m'_{f,F} = m_{f,F} \frac{I_f}{I_f + I_{am,f} + I_{rs,f}}$$

dove $m'_{f,F}$ è il fattore di riduzione della modulazione corretto, I_f è l'intensità per la banda di ottava f ,

$I_{am,f}$ è l'intensità per l'effetto del mascheramento uditivo sulla banda di ottava f ,

$I_{rs,f}$ è l'intensità della soglia assoluta di udibilità nella banda di ottava f .

Ciascuno dei 98 valori corretti viene convertito in rapporto

segnale/rumore effettivo, $(S/N)_{eff}$,

definito come quel rapporto segnale/rumore equivalente che da solo, cioè in assenza di riverberazione, fornirebbe lo stesso valore di m' :

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{eff,f,F} = 10 \log \left(\frac{m'_{f,F}}{1 - m'_{f,F}} \right)$$

I rapporti segnale/rumore effettivi sono limitati all'intervallo tra -15 dB e +15 dB. Valori minori di -15 dB sono assunti pari a -15 dB, mentre valori maggiori di +15 dB sono assunti pari a 15 dB.

Ogni rapporto segnale/rumore apparente è convertito in indice di trasmissione $(T_{I,f,F})$, compreso in un intervallo tra 0 e 1:

$$T_{I,f,F} = m_{f,F} \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_{eff,f,F} + 15}{30}$$

Per ogni banda di ottava f viene calcolato l'indice di trasferimento della modulazione (M_{TI_f}) come media aritmetica degli indici di trasmissione per le 14 frequenze di modulazione:

$$M_{TI_f} = \frac{1}{14} \sum_{F=1}^{14} T_{I,f,F}$$

Infine si ottiene l'indice STI dalla somma ponderata degli indici di trasferimento della modulazione per tutte le 7 bande di ottava in accordo con la seguente relazione:

$$STI = \sum_{f=1}^{174} \alpha_f \cdot MTI_f - \sum_{f=1}^6 \beta_f \cdot \sqrt{MTI_f \cdot MTI_{f+1}}$$

dove MTI_f è l'indice di trasferimento della modulazione per la banda f , α_f è il fattore di ponderazione per la banda f e β_f è il fattore di ridondanza tra la banda f e la banda $f+1$.

I fattori α_f e β_f sono riportati in Fig. I fattori α_f rappresentano il contributo relativo di ogni banda di ottava allo STI .

I fattori β_f rappresentano la frazione di sovrapposizione dell'informazione fra due bande di ottava adiacenti rispetto all'intelligibilità del parlato. In pratica, bande di ottava adiacenti contengono informazione ridondante per l'intelligibilità del parlato e, se una banda di ottava non contribuisce all'intelligibilità (perché mascherata dal rumore o dalla riverberazione), allora la banda adiacente può parzialmente compensare per questo contributo mancante.

Sesso del parlatore		Frequenza centrale delle bande di ottava (Hz)						
		125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
Maschio	α	0,085	0,127	0,230	0,233	0,309	0,224	0,173
	β	0,085	0,078	0,065	0,011	0,047	0,095	-
Femmina	α	-	0,117	0,223	0,216	0,328	0,250	0,194
	β	-	0,099	0,066	0,062	0,025	0,076	-

Fig. 1.3.1.4
Fattori di ponderazione (α_f) e di ridondanza (β_f) per la determinazione dell'indice STI nei casi di voce maschile e femminile
UNI 11532-1

L'indice STI è stato correlato a scale soggettive di qualità della comunicazione, come quella riportata in Fig. 1.4.5

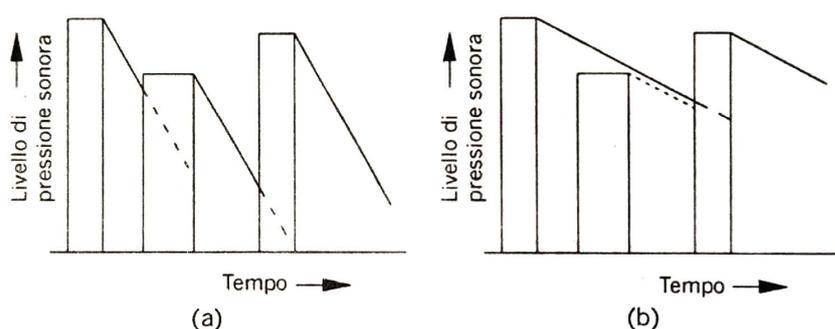
1.3.2 Calcolo del Tempo di riverberazione.

Battendo le mani in una sala, il suono generato si prolungherà con una "coda sonora" che si affievolirà via via a seconda delle caratteristiche acustiche della stanza. In ambienti molto grandi, come locali di ampie dimensioni, questa coda sonora potrà essere percepita per alcuni secondi. Al contrario, in un ambiente domestico arredato, il battito di mani sarà seguito da un alone acustico che svanirà ben più rapidamente. Questo fenomeno provoca un allargamento temporale degli eventi sonori singoli, che appaiono decisamente più brevi quando percepiti all'esterno.

Il fenomeno della riverberazione e i suoi effetti qualitativi sulla comunicazione sonora negli spazi chiusi erano conosciuti anche prima che W.C. Sabine, alla fine dell'Ottocento, formulasse una base scientifica per lo studio della materia, pubblicata postuma nel 1922.

Il tempo di riverberazione è una misurazione convenzionale della durata della coda sonora ed è definito classicamente come l'intervallo necessario affinché il livello di pressione sonora decada di 60 decibel rispetto al valore iniziale. Tale misurazione viene effettuata quando la sorgente che sosteneva il regime stazionario precedente viene interrotta.

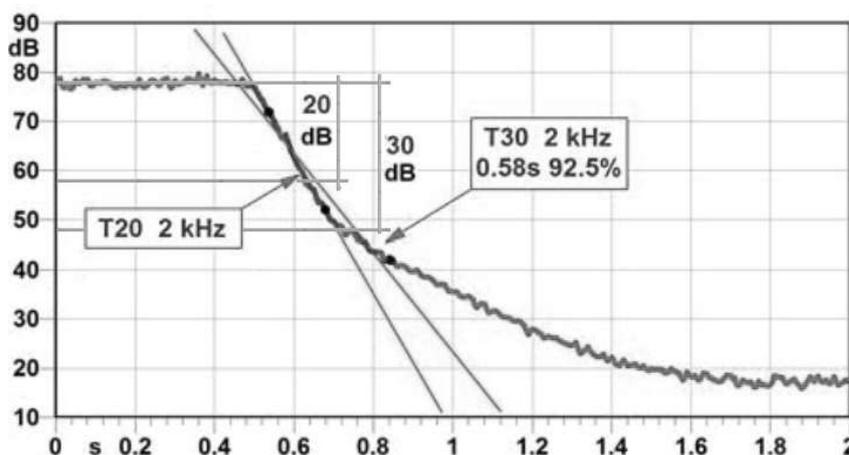
Fig. 1.3.2.1
Livelli di pressione sonora di 3 eventi sonori brevi emessi in un grande ambiente,
(a) la coda sonora breve consente una buona chiarezza
(b) La coda sonora del primo impulso maschera il secondo causando confusione nella percezione di quest'ultimo.
(Spagnolo, R., Cingolani, E. 2008)



Generalmente, il tempo di riverberazione viene calcolato analizzando la pendenza media del decadimento del livello di pressione sonora nel tempo. In condizioni ideali di campo sonoro perfettamente diffuso, il tracciato di questo decadimento risulta lineare con una pendenza negativa, anche per un ampio intervallo dinamico. Tuttavia, nei casi reali, il decadimento presenta spesso pendenze variabili o segmenti multipli, a volte con concavità verso l'alto o il basso, a seconda delle caratteristiche dello spazio acustico.

Per ragioni tecniche, il tempo di riverberazione classico T_R viene determinato interpolando una retta sul tracciato del decadimento tra i -5 e i -35 dB, e viene comunemente indicato come T_{30} (Spagnolo, R., Cingolani, E. 2008).

Fig. 1.3.2.2
Interpolazioni dell'onda sonora relative ai decadimenti presenti nelle porzioni del segnale misurato per i due intervalli:
10 dB (EDT)
20 dB (T_{20})
30 dB (T_{30}).



Le caratteristiche ideali della riverberazione dipendono sia dal tipo di sorgente sia dalle dimensioni dello spazio acustico. Sebbene ogni contesto possa presentare esigenze diverse, esistono alcune linee guida ampiamente accettate.

Innanzitutto, il decadimento del riverbero dovrebbe seguire un andamento esponenziale regolare, con una riduzione costante in decibel per unità di tempo. Tale uniformità assicura una certa chiarezza acustica, evitando che le riflessioni disordinate compromettano la nitidezza dell'ascolto. Allo stesso modo, la durata del riverbero ottimale varia in base al tipo di sorgente, ad esempio, per una musica che richiede un'elevata articolazione e precisione, come quella caratterizzata da un ritmo rapido o da passaggi complessi, è preferibile un'acustica più "asciutta", mentre per musica lenta e armonica risulta più adatto un riverbero più lungo e avvolgente.

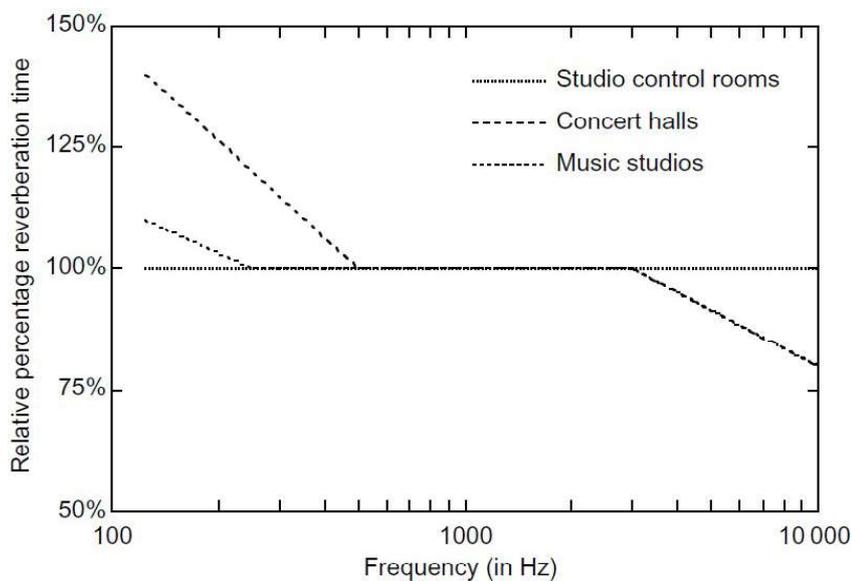


Fig. 1.3.2.3
Tempi di riverberazione ideali in relazione alla frequenza nei diversi tipi di ambiente.
 (Howard, D. M., Angus, J. A. S., 1996)

Un'altra regola generale è che, man mano che aumenta il volume dello spazio performativo, il tempo di riverberazione ideale si allunga per ogni tipo di musica, per adeguarsi alla maggiore propagazione del suono. È stato osservato inoltre che un lieve aumento del tempo di riverberazione nelle basse frequenze, intorno al 125 Hz, di circa il 40% rispetto alla gamma delle frequenze medie (1 kHz), tende a essere preferito dagli ascoltatori, poiché conferisce "calore" al suono.

Questo incremento nella gamma bassa amplifica il livello dei suoni il cui timbro ha fondamentali deboli, migliorando la qualità complessiva del campo riverberato alle basse frequenze. Tuttavia, nel caso della registrazione musicale o dell'ascolto di musica registrata, questo effetto di incremento del riverbero nelle basse frequenze può risultare indesiderato; in tali situazioni, è quindi preferibile una caratteristica di riverberazione piatta (Howard, D. M., Angus, J. A. S., 1996).

La norma UNI 11532-2 riporta i valori di riferimento del tempo di riverberazione ottimale. Il T_{ott} , corrispondente ad un'occupazione d'esercizio convenzionale dell'ambiente pari all'80% ad eccezione della categoria A5, è determinato in relazione alla destinazione d'uso specifica dell'ambiente considerato ed al suo volume, attraverso le formule di calcolo visibili in Fig.

Categoria	Ambiente occupato all'80%	
A1	$T_{ott,A1} = (0,45\log V + 0,07)$	$30\text{ m}^3 \leq V < 1000\text{ m}^3$
A2	$T_{ott,A2} = (0,37\log V - 0,14)$	$50\text{ m}^3 \leq V < 5000\text{ m}^3$
A3	$T_{ott,A3} = (0,32\log V - 0,17)$	$30\text{ m}^3 \leq V < 5000\text{ m}^3$
A4	$T_{ott,A4} = (0,26\log V - 0,14)$	$30\text{ m}^3 \leq V < 500\text{ m}^3$
Categoria	Ambiente non occupato	
A5	$T_{ott,A5} = (0,75\log V - 1,00)$ $T_{ott,A5} = 2,00$	$200\text{ m}^3 \leq V < 10000\text{ m}^3$ $V \geq 10000\text{ m}^3$

Fig. 1.3.2.4
Formule di calcolo per
il tempo di riverberazione
ottimale (T_{ott}) per le categorie
da A1 a A5
UNI 11532-2

Inoltre “Per le persone con problemi uditivi o disturbi legati alla concentrazione o attenzione, il tempo di riverberazione deve essere conforme alle Categorie A3.1 o A4. Nel caso di aule multifunzione (A2, A3 e A4), il tempo di riverberazione deve soddisfare i valori più restrittivtra quelli per le categorie considerate.” (ISO, 2020)

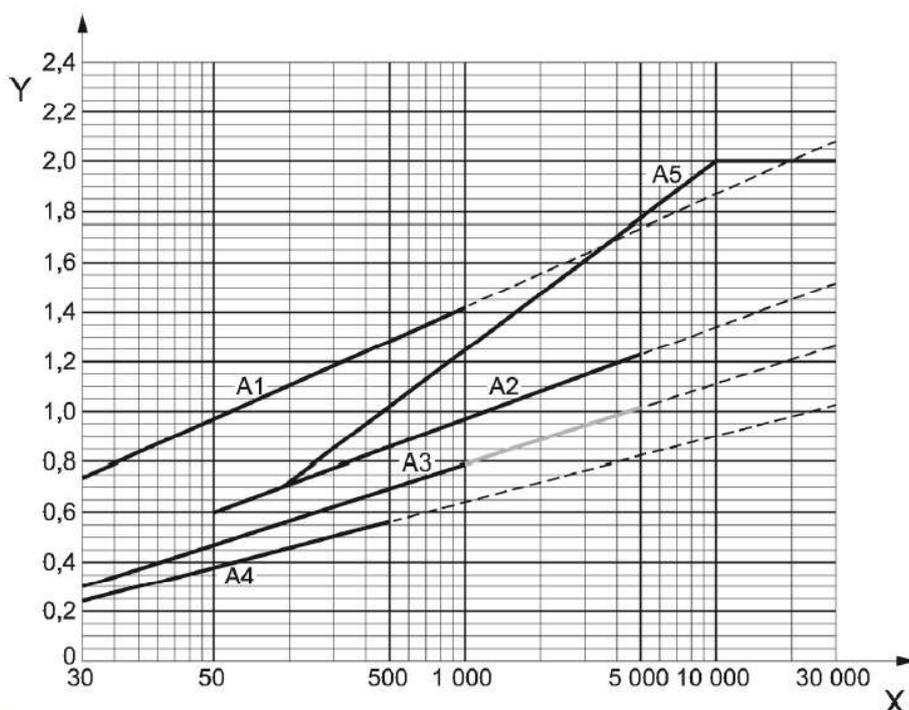


Fig. 1.3.2.5
Dipendenza
dal tempo di
riverberazione
ottimale (T_{ott})
dal volume in
relazione alla
destinazione d'uso
UNI 11532-2

Per quanto riguarda gli ambienti inoccupati, cioè considerati con occupazione di esercizio inferiore all'80%, "i valori nello stato non occupato ma arredato, come al momento della verifica, deve essere effettuata conformemente nelle bande d'ottave tra 125 Hz e 4000 Hz:

$$T_{inocc} = \frac{T_{occ}}{\left(1 - T_{occ} \frac{\Delta A_{pers}}{0.16V}\right)}$$

dove:

T_{occ} Tempo di riverberazione ottimale per l'ambiente occupato all'80%, in secondi

T_{inocc} Tempo di riverberazione ottimale ad ambiente non occupato (risultato della misurazione), in secondi

V Volume dell'ambiente, in metri cubi

ΔA_{pers} Superficie aggiuntiva equivalente di assorbimento acustico delle persone, in metri quadrati (UNI, 2020).

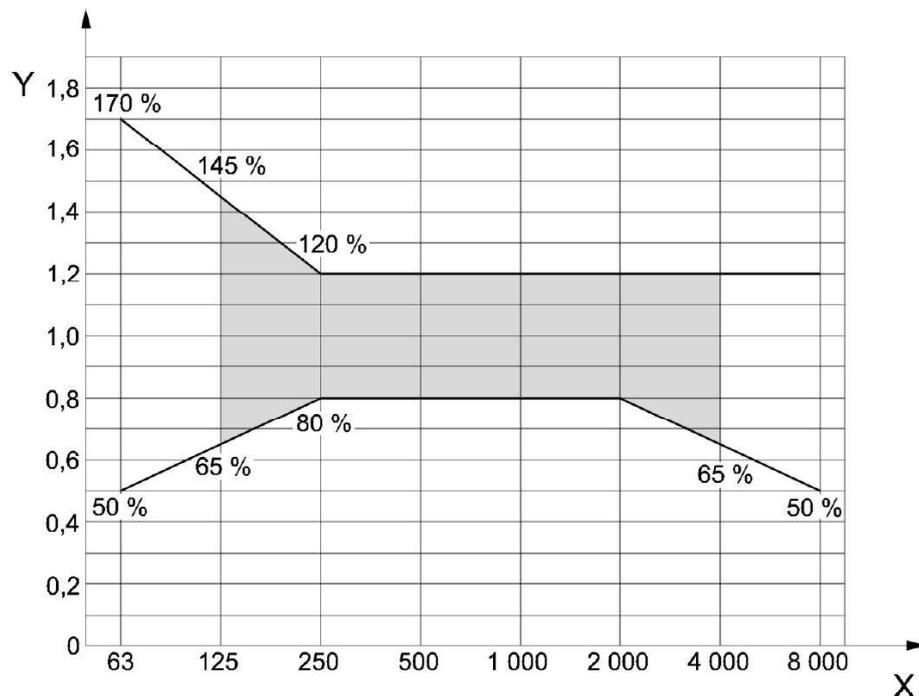


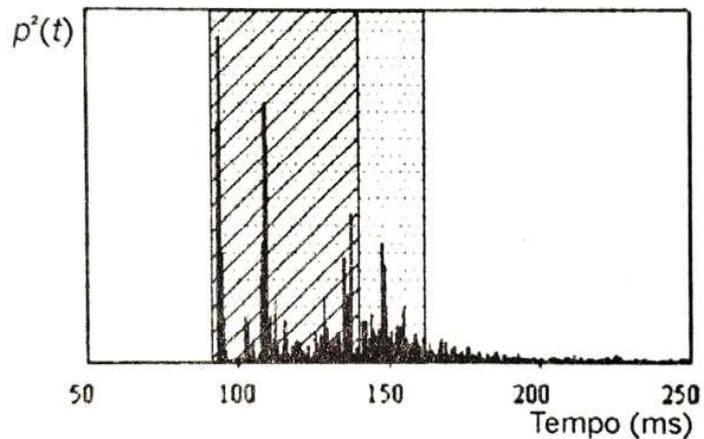
Fig. 1.3.2.6
Andamento ed intervallo di conformità del tempo di riverberazione T in funzione della frequenza per le categorie da A1 a A4
UNI 11532-2

1.3.3 Rapporti tra energie:

Definizione, Chiarezza e Tempo baricentrico

Molti studiosi hanno esplorato l'idea che il rapporto tra l'energia contenuta in una specifica porzione dell'ecogramma energetico e quella in un'altra porzione possa essere un valido descrittore fisico per determinati effetti soggettivi percepiti. Questo concetto generale è illustrato in figura, dove l'area compresa tra l'arrivo del suono diretto ($t = 0$) e l'istante successivo a $t = 50$ ms definisce l'energia utile alla chiarezza del parlato, mentre l'area sottesa tra $t = 0$ e $t = 80$ ms identifica l'energia utile alla chiarezza musicale.

Fig. 1.3.3.1
Quote di energia nella risposta
all'impulso al quadrato.
retino diagonale per la musica,
puntinato per il parlato.
(Spagnolo, R., Cingolani, E.
2008)



1.3.3.1 Indice di definizione

Nel 1953, Thiele, basandosi sugli studi di Haas (1951) e di altri ricercatori, propose per primo un indice di "Definizione" (Deutlichkeit) espresso come il rapporto tra l'energia contenuta nei primi 50 ms della risposta all'impulso e l'energia totale. Questi studi avevano evidenziato, tra le altre cose, come il suono che arriva con un breve ritardo rispetto al suono diretto possa produrre un incremento dell'intensità percepita

$$D = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad [\%]$$

Dove $t = 0$ è l'istante in cui il suono diretto giunge al ricevitore.

L'indice di Definizione, considerato il precursore delle frazioni energetiche, fu inizialmente introdotto come parametro correlato alla percezione nitida e chiara del parlato all'interno di una sala.

1.3.3.2 Indice di Chiarezza

Tra i diversi parametri sviluppati successivamente per descrivere la chiarezza musicale, anch'essi basati su frazioni energetiche, l'indice di chiarezza è quello che ha ricevuto il maggior riconoscimento e utilizzo:

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad [dB]$$

Dove il pedice 50 rappresenta i 50 ms considerati come periodo e relativa porzione energetica iniziale; 80 ms per il C_{80} .

Questo parametro, introdotto dalla Scuola di Dresda da Reichardt et al. (1975), fu elaborato sulla base di studi condotti in camere anecoiche, utilizzando campi sonori sintetici. Il C_{80} (Klarheitsmaß) è stato concepito per descrivere due attributi fondamentali: la trasparenza temporale, che si riferisce alla nitida percezione di note in rapida successione, e la trasparenza armonica, relativa alla chiarezza di note suonate contemporaneamente da uno o più strumenti.

Tuttavia, si osservò che i parametri basati su frazioni energetiche, come il C_{80} , sono eccessivamente sensibili alla posizione temporale dell'energia rispetto al limite di integrazione, generando variazioni nei risultati non sempre correlate alla percezione uditiva (Spagnolo, R., Cingolani, E. 2008).

1.3.3.3 Tempo Baricentrico

Nella ricerca di ottenere risultati sempre più vicini alla percezione uditiva, vennero introdotti descrittori che ponderano l'energia in funzione del tempo. Tra questi, il più semplice è il tempo baricentrico dell'energia (Schwerpunktzeit o tempo centrale), proposto da Kurer nel 1969.

$$t_S = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad [ms]$$

Occorre puntualizzare che questi, essendo rapporti energetici, questi parametri risultano, nell'ambiente mutualmente correlati fornendo informazioni che, salvo errori grossolani sono paragonabili nelle quantità. (Spagnolo, R., Cingolani, E. 2008).

Bibliografia

Ente Nazionale Italiano di Unificazione (2020). Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati – Metodi di progettazione e tecniche di valutazione. UNI 11532. UNI

Fausti, P., Santoni, a., Bonfiglio, P., Pompoli, F., Gandolfi, R. (2021) Acustica in edilizia. Rockwool Italia S.p.A.

Howard, D. M., Angus, J. A. S. (1996). Acoustics and psychoacoustics. Elsevier. ISBN: 978-0-240-52175-6

Ninni, E. (2019) Misura del coefficiente di scattering acustico in camera riverberante full scale secondo la norma ISO 17497-1 (Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino)

Özis F., Vergili, S. (2008). Human-Space Relationship With A Perspective Of Music LISTENING: EVAluation Of The Relations Of Acoustical Parameters In Critical Listening Rooms. The Journal Of International Social Research Volume 1/3

Song, B., Peng, L., Fu, F., Liu, M., & Zhang, H. (2016). Sound absorption properties of perforated wooden panels with tiny holes. *Materials*, 9(11), 942. <https://doi.org/10.3390/ma9110942>

Spagnolo, R., Cingolani, S. (2008). Acustica musicale e architettonica. CittàStudi edizioni

Tsay, Y., Lin, J., & Ma, F. (2021). Development of a Panel Membrane Resonant Absorber. *Applied Sciences*, 11(4), 1893. <https://doi.org/10.3390/app11041893>

Sitografia

<https://www.sosyalarastirmalar.com/articles/human--space-relationship-with-a-perspective-of-music-listening-evaluation-of-the-relations-of-acoustical-parameters-in-.pdf>

https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Tubo-ad-impedenza-per-la-misura-del-coefficiente-di-assorbimento-ad-incidenza_fig1_261399548

<https://www.ets-lindgren.com/datasheet/chambers/acoustic-test-chambers/5003/500303>

<https://www.alvine.com/portfolio-posts/lewis-central-high-school-performing-arts-center/>

https://www.researchgate.net/figure/A-C-The-three-main-types-of-porous-absorbing-materials-and-D-Resonance-absorbers-of_fig2_349867328

https://www.istitutomontani.edu.it/museovirtuale/risonatori_di180/
http://www.angelofarina.it/Public/Fisica-Tecnica-Ambientale-2015/Lez-10/Cap.2_AcusticaInEdilizia.pdf

Misurazioni e Simulazioni 2

2.0 Introduzione

W.C. Sabine, all'inizio del XX secolo, definì in modo rigoroso i requisiti fondamentali per garantire una buona acustica in un auditorium, riportando nel 1922 quanto segue:

«È necessario che:

1. Il suono sia sufficientemente forte;
2. Le componenti contemporanee di un suono complesso mantengano un rapporto appropriato tra le loro intensità;
3. Suoni successivi, nella loro rapida articolazione, sia nel parlato che nella musica, risultino chiari e distinti, privi di sovrapposizioni reciproche e di interferenze da rumori estranei.

Queste sono le condizioni necessarie e del tutto sufficienti per una buona acustica».

Questi requisiti, definiti con una certa chiarezza, trovano oggi una traduzione concreta in una serie di parametri acustici misurabili, che derivano principalmente dalle caratteristiche fisiche di un teatro.

Tali caratteristiche possono essere descritte attraverso il modello di un sistema lineare tempo-invariante, il cui comportamento è determinato dalla risposta all'impulso del sistema (Spagnolo, R., Cingolani, E., 2008).

2.1 Risposta all'impulso

Se si vuole analizzare il comportamento di un sistema acustico occorre determinarne sperimentalmente la cosiddetta "Risposta all'Impulso", definita come il segnale di output del sistema dopo che esso ha processato un segnale di input.

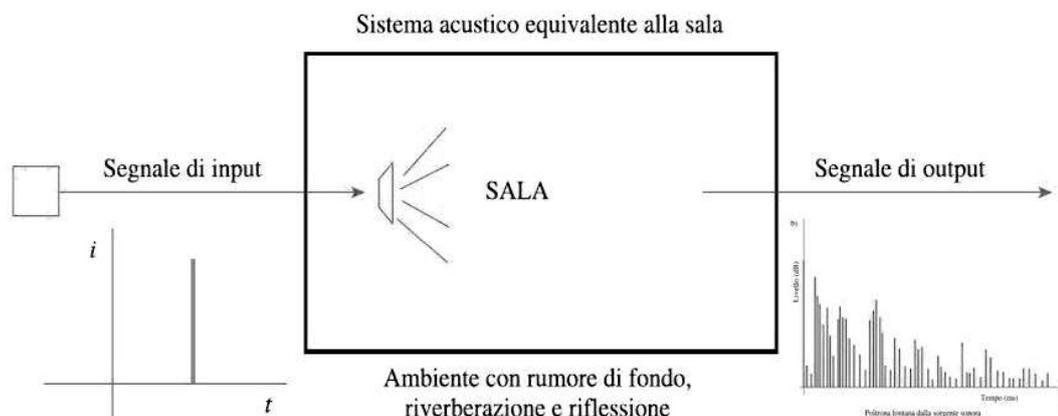


Fig. 2.1.1
Schematizzazione della meccanica della risposta all'impulso con le sue componenti

Tradizionalmente il segnale d'input impulsivo definito matematicamente "funzione Delta di Dirac" presenta numerosi problemi: cattivo rapporto segnale-rumore, rischio di eccitare fenomeni non lineari causa l'utilizzo di un segnale con elevatissimo "slew rate", presenza nel segnale di test di frequenze molto basse e molto alte che possono danneggiare i trasduttori.

Di conseguenza, sono state sviluppate tecniche "indirette" di misura della Risposta all'Impulso, basate sull'utilizzo di segnali di test diversi dal segnale Delta di Dirac.

In ordine di tempo, si è visto affermarsi per primo il cosiddetto segnale di rumore bianco pseudo-causale "MLS", seguito dal segnale "sweep sinusoidale lineare", a cui si è recentemente iniziato a preferire il segnale "sweep sinusoidale esponenziale" (Farina, A. et al, 2008).

2.2 Tecniche di misurazione

La norma ISO 3382 fornisce una guida standard per la misurazione dei parametri acustici delle sale, consentendo una valutazione oggettiva delle prestazioni acustiche degli ambienti.

Si divide in tre parti principali:

1. ISO 3382-1:2009 – Spazi per spettacoli e performance musicali.
Questa parte si concentra sulla misurazione del tempo di riverberazione (RT60), la chiarezza del suono (C50, C80), la definizione (D50), e altri parametri utilizzati principalmente per teatri, auditorium e sale da concerto. La norma specifica come acquisire e analizzare le risposte all'impulso utilizzando una sorgente sonora omnidirezionale e strumenti di registrazione accurati.
2. ISO 3382-2:2008 – Uffici e spazi di lavoro.
Fornisce metodi per misurare il tempo di riverberazione e valutare l'intelligibilità del parlato (STI). Questi parametri sono fondamentali per garantire un'adeguata comunicazione verbale in ambienti come uffici, aule e sale riunioni.
3. ISO 3382-3:2012 – Spazi aperti per uffici.
Si concentra sugli spazi di lavoro aperti, introducendo parametri come la privacy acustica e il decadimento spaziale del livello sonoro, utili per valutare l'efficacia del controllo del rumore e la comprensibilità del parlato in ambienti condivisi.

La norma definisce inoltre i parametri fondamentali per valutare l'acustica degli ambienti chiusi, concentrandosi su diverse tipologie di spazi: performance musicali, parlato e spazi aperti. Ecco i principali parametri inclusi nella norma:

- Tempo di riverberazione (RT60).

- Early Decay Time (EDT). Calcolato sui primi 10 dB del decadimento.
- Chiarezza del suono (C50 e C80)
- Definizione (D50)
- Speech Transmission Index (STI)

Definisce inoltre parametri che definiscono la distribuzione temporale delle riflessioni iniziali:

- IACC (Interaural Cross-Correlation Coefficient): Valuta l'immagine stereofonica percepita. È importante per la qualità spaziale del suono.
- G (Strength): Misura il livello di energia sonora ricevuta rispetto alla sorgente diretta.

È inoltre riportata la strumentazione standard:

- Microfoni omnidirezionali: la norma richiede l'uso di microfoni omnidirezionali calibrati e certificati (di classe 1, secondo la norma IEC 61672), per garantire uniformità nella captazione del suono da tutte le direzioni.
- Sorgenti sonore omnidirezionali: devono essere utilizzati altoparlanti dodecaedrici che soddisfano i requisiti di uniformità nell'emissione sonora su tutte le frequenze e direzioni, sono spesso impiegate sorgenti conformi alle specifiche di standard come ISO 3382 o IEC 60268-16.
- Software e registratori: Strumenti per l'elaborazione dei dati, come MATLAB o software specifici come EASE e ODEON, sono utilizzati per analizzare le risposte all'impulso.
- Segnali di test: la sorgente sonora deve emettere segnali standardizzati, come: Sweep sinusoidale (logaritmico o lineare), rumore rosa o segnali impulsivi come colpi di pistola.

Le posizioni di misurazione nelle analisi acustiche seguono criteri specifici per garantire che i dati raccolti siano rappresentativi e coerenti con le caratteristiche dell'ambiente. La norma ISO 3382 stabilisce un numero minimo di posizioni per coprire adeguatamente lo spazio, ma suggerisce di incrementarle in caso di geometrie complesse. L'obiettivo è prevedere le principali influenze che potrebbero causare variazioni nel tempo di riverberazione o in altri parametri acustici.

	Survey	Engineering ^a	Precision
Source-microphone combinations	2	6	12
Source-positions ^b	≥ 1	≥ 2	≥ 2
Microphone-positions ^c	≥ 2	≥ 2	≥ 3
No. decays in each position (interrupted noise method)	1	2	3

^a When the result is used for a correction term to other engineering-level measurements, only one source-position and three microphone-positions are required.

^b For the interrupted noise method uncorrelated sources may be used simultaneously.

^c For the interrupted noise method and when the result is used for a correction term a rotating microphone boom may be used instead of multiple microphone-positions.

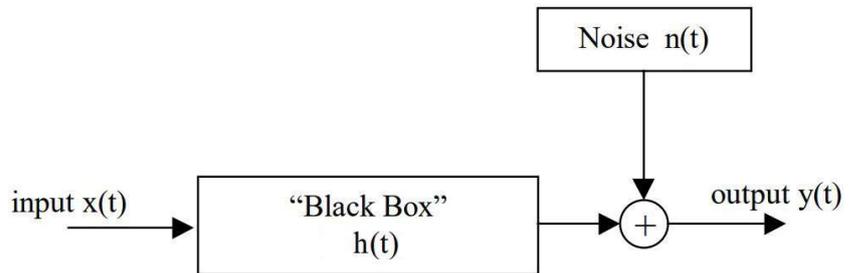
La distribuzione delle posizioni dei microfoni deve essere uniforme, evitando configurazioni simmetriche, che potrebbero portare a risultati poco affidabili. È essenziale che i microfoni siano distanziati almeno della metà di una lunghezza d'onda, corrispondente a circa 2 metri per le frequenze comunemente utilizzate.

Inoltre, ogni microfono deve essere collocato ad almeno un quarto di lunghezza d'onda dalle superfici riflettenti più vicine, come pareti o pavimenti, generalmente a una distanza di circa 1 metro (ISO, 2009).

2.2.1 Metodo impulsivo

Un modo classico per misurare un sistema è quello di applicare un impulso unitario all'ingresso ed osservare l'uscita del sistema. Se il segnale applicato all'ingresso è molto simile ad un impulso ideale, l'uscita sarà la risposta all'impulso del sistema.

Fig. 2.2.1.1
Sistema lineare con disturbo
da rumore
<http://pcfarina.eng.unipr.it/>



In generale, per un qualsiasi segnale $x(\tau)$, si può ottenere un segnale percepito dal ricevitore in una particolare posizione attraverso l'integrale di convoluzione:

$$y(\tau) = x(\tau) \cdot h(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) h(\tau - t) dt$$

La risposta in frequenza $H(f)$, conosciuta più propriamente anche come funzione di trasferimento, rappresenta la trasformata di Fourier della funzione $h(t)$. Nel dominio delle frequenze, l'operazione di convoluzione nel dominio del tempo, descritta dalla relazione $y(\tau) = x(\tau) \cdot h(\tau)$, si traduce in un semplice prodotto algebrico tra gli

$$Y(f) = X(f) \cdot H(f)$$

Dove $X(f)$ è lo spettro del segnale in ingresso, $H(f)$ la risposta in frequenza del sistema, e $Y(f)$ lo spettro del segnale in uscita (Spagnolo, R., Cingolani, E., 2008).

Sfortunatamente, un impulso reale che si avvicini a quello ideale è di durata così corta che, per qualsiasi ampiezza che non sovraccarichi l'apparecchio, contiene troppo poca energia.

Se nella misura non c'è rumore, questo problema risulta irrilevante; tale metodo, infatti, funziona ottimamente in laboratorio ed in uffici silenziosi

Nel caso di misure acustiche nelle sale, il sistema in prova comprende inevitabilmente anche le distorsioni dei trasduttori impiegati, in particolare dell'altoparlante.

In queste condizioni può divenire necessario effettuare una media sincrona su numerose ripetizioni del segnale di test, onde ottenere un ragionevole rapporto segnale/rumore, senza essere costretti a spingere l'altoparlante a potenze insostenibili (Farina, A. et al, 2008).

2.2.2 Metodo MLS (Maximum Length Sequence)

Un segnale MLS (Sequenza di Massima Lunghezza) è un segnale pseudocasuale, molto simile al rumore bianco, che si distingue per la sua capacità di fornire un alto contenuto energetico rispetto al tradizionale impulso di prova. Questo risultato è dovuto alla struttura del segnale, che consiste in una sequenza ripetitiva di impulsi positivi e negativi di uguale ampiezza, distribuiti in modo apparentemente casuale. Ogni sequenza è composta da migliaia di impulsi, il che garantisce una maggiore densità di energia rispetto a un singolo impulso per intervallo di misura.

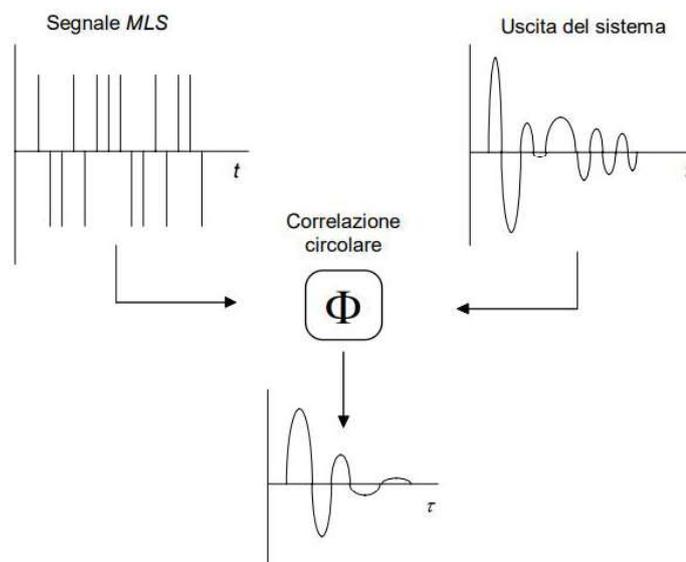
L'MLS è spesso impiegato per misurare la risposta di un sistema, sfruttando due metodi principali: la FFT (Fast Fourier Transform) o la correlazione. Quest'ultimo metodo è particolarmente adatto per i segnali MLS grazie alle loro caratteristiche. La correlazione consiste nel confrontare due segnali introducendo un ritardo temporale (τ), e raggiunge il suo massimo (pari a 1) quando i due segnali sono perfettamente allineati ($\tau=0$).

In alternativa alla FFT, è possibile utilizzare la correlazione circolare, calcolabile tramite la FHT (Fast Hadamard Transform), che è spesso più veloce ed efficiente.

La correlazione circolare di un segnale MLS con se stesso produce un impulso, rendendolo particolarmente utile per ottenere la risposta all'impulso di un sistema. Questo processo avviene applicando il segnale MLS all'ingresso del sistema e correlando il segnale di uscita con quello di ingresso. In questo modo, si può derivare la risposta all'impulso del sistema

Affinché le misurazioni siano accurate, il segnale MLS deve essere sufficientemente lungo da coprire almeno il tempo di riverbero dell'ambiente da analizzare. Questo requisito garantisce che l'intero comportamento del sistema venga catturato senza perdere informazioni essenziali.

Fig. 2.2.2.1
 Risposta all'impulso del sistema, assimilabile ad un filtro.
<http://pcfarina.eng.unipr.it/>



La correlazione circolare tra l'uscita di un sistema e il segnale MLS applicato al suo ingresso permette di ricavare la risposta all'impulso del sistema. Una volta ottenuta questa risposta, è possibile calcolare la risposta in frequenza in modo semplice applicando la FFT (Fast Fourier Transform).

Tuttavia, studi condotti negli ultimi anni hanno evidenziato diverse limitazioni del metodo MLS. È stato osservato che le risposte all'impulso ottenute con questa tecnica possono essere affette da distorsioni di varia natura, influenzando negativamente le misurazioni, in particolare quelle legate al tempo di riverberazione negli studi di acustica degli ambienti chiusi.

I problemi principali includono:

- Segnale irregolare alle basse frequenze, che compromette la misura precisa del decadimento sonoro.
- Distorsioni in banda larga, che interferiscono con l'accuratezza delle rilevazioni.
- Non linearità del sistema come distorsioni trasversali, variazioni di guadagno, effetti di clipping e limitazioni nella velocità di risposta (slew rate), che introducono errori significativi.

A causa di queste limitazioni, il metodo MLS è oggi considerato superato e inadatto per misurazioni affidabili in campo acustico. Continuare a utilizzarlo comporta un rischio concreto di ottenere risultati distorti o non rappresentativi del comportamento acustico reale dell'ambiente analizzato (Farina, A. et al, 2008).

2.2.3 Metodo TDS (Sweep lineare)

La spettrometria a ritardo di tempo (TDS) utilizza un segnale di eccitazione basato su uno sweep di frequenza e un ricevitore che si sintonizza in modo sincrono con lo sweep. Il terzo elemento essenziale del metodo è l'offset temporale, che consente di introdurre un ritardo tra il segnale di eccitazione e la risposta registrata dal ricevitore. Questo ritardo è fondamentale per analizzare in modo dettagliato le proprietà temporali e spettrali del sistema o del mezzo sottoposto a misura.

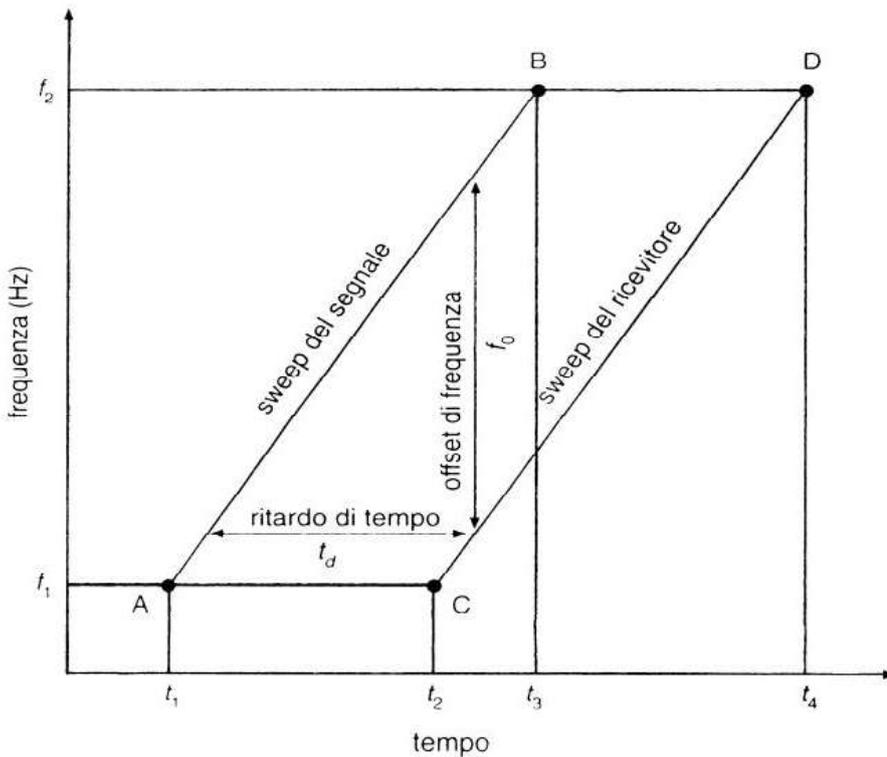


Fig. 2.2.3.1
Principio di funzionamento
della spettrometria a ritardo
di tempo.
<http://pcfarina.eng.unipr.it/>

Il segnale sweepato inizia nel punto A (t_1, f_1) e si sviluppa linearmente fino al punto B (t_3, f_2). Dopo un ritardo temporale t_d , il ricevitore avvia il proprio sweep nel punto C (t_2, f_1) e segue il segnale iniziale con la stessa velocità fino al punto D (t_4, f_2). Grazie a questo ritardo t_d , il ricevitore si sincronizza perfettamente con il segnale sinusoidale sweepato, dopo che quest'ultimo ha viaggiato nell'aria per un tempo pari a t_d . Durante tutto il processo, il ricevitore mantiene un offset costante di f_o hertz rispetto al segnale di eccitazione.

Si hanno dunque 3 fondamentali vantaggi:

- Se il segnale impiega un certo tempo per raggiungere una superficie riflettente e un ulteriore intervallo per tornare al microfono, l'offset temporale del ricevitore può essere impostato per analizzare esclusivamente la componente riflessa desiderata.
- L'offset, che si manifesta come una differenza di frequenza, garantisce che il ricevitore sia sintonizzato solo sulla riflessione

target.

- Rumori, riverberazioni e riflessioni indesiderate, che arrivano in momenti diversi, non vengono rilevati, poiché il ricevitore è sintonizzato su frequenze differenti da queste componenti.

Questo metodo consente di isolare e misurare la riflessione desiderata con elevata precisione, eliminando interferenze e segnali non pertinenti.

Il sistema TDS tradizionale è ormai superato grazie a una tecnica più semplice per ottenere la risposta all'impulso, basata sull'uso di uno sweep sinusoidale lineare come segnale di test. Questo approccio prevede la deconvoluzione della risposta all'impulso del sistema mediante un filtraggio inverso applicato al segnale registrato dal microfono.

Nel dominio della frequenza, il procedimento si esprime come:

$$Y = X \cdot H,$$

da cui si ricava:

$$H = Y / X,$$

Dove:

Y è lo spettro del segnale misurato dal microfono,

X è lo spettro del segnale di test,

H rappresenta la funzione di trasferimento del sistema.

L'operazione consiste nel calcolare, per ogni frequenza, il rapporto tra lo spettro del segnale misurato e quello del segnale di test. Questo processo prende il nome di deconvoluzione circolare, poiché i calcoli vengono effettuati utilizzando l'operatore FFT (Fast Fourier Transform), che è di natura "circolare".

Per garantire un risultato accurato, è fondamentale che la lunghezza del segnale analizzato (e quindi dello sweep) sia significativamente maggiore del tempo di riverbero dell'ambiente. Se questa condizione non viene rispettata, si rischia di incorrere nel problema del time aliasing, un'errata sovrapposizione temporale delle componenti del segnale, analogamente a quanto accade con il metodo MLS. (Farina, A. et al, 2008)

2.2.4 Metodo ESS (Exponential Sine Sweep)

Il metodo ESS rappresenta un'evoluzione avanzata nelle tecniche di misurazione acustica, risolvendo le limitazioni tipiche dello sweep lineare. In uno sweep lineare, la frequenza del segnale di test aumenta in modo uniforme nel tempo. Tuttavia, questa variazione non è necessariamente lineare. Esistono infatti diverse modalità in cui la frequenza "istantanea" può variare arbitrariamente nel tempo. Una delle soluzioni più promettenti è la sweepata esponenziale, in cui la frequenza del segnale di test cresce esponenzialmente, mantenendo la forma sinusoidale.

Un altro aspetto cruciale di questa tecnica è che il processo di deconvoluzione avviene nel dominio del tempo, piuttosto che nel dominio della frequenza. Questo implica che l'effetto del sistema sul segnale di test x può essere descritto come una convoluzione, rappresentata dalla relazione:

$$y = x \otimes h$$

Dove \otimes è l'operatore di convoluzione.

Definiamo ora $x'(t)$ come il filtro inverso di $x(t)$, ovvero il segnale che, convoluto con x restituisce la funzione delta di Dirac.

Convogliando entrambi i membri con il filtro inverso, otteniamo:

$$y \otimes x' = x \otimes h \otimes x'$$

Da cui si ricava:

$$h = y \otimes x'$$

Per ottenere il filtro inverso $x'(t)$, si può utilizzare lo stesso segnale di test, ma invertito nel tempo (cioè, il primo campione diventa l'ultimo). Tuttavia, se la "sweepata" non è lineare, il contenuto spettrale del segnale non sarà uniforme, quindi sarà necessaria un'equalizzazione per correggere la risposta in frequenza della risposta all'impulso deconvoluta.

Un vantaggio significativo nell'utilizzare una sweepata non lineare, o logaritmica, rispetto a quella lineare, è la distribuzione energetica. Infatti, una sweepata logaritmica concentra più energia alle basse frequenze rispetto alle alte, dato che la variazione della frequenza è più lenta nelle basse e più rapida nelle alte. Questo porta alla generazione di uno spettro rosa invece di uno bianco. Inoltre, quando un sistema lineare distorce, la risposta del sistema non si limita alla frequenza di ingresso, ma si estende anche alle frequenze armoniche (come 2 kHz, 3 kHz, ecc.), generando distorsioni armoniche.

Nel caso di un sistema lineare che distorce, la risposta ai segnali viene alterata, e tale effetto è visibile nelle risposte all'impulso (IR) nel piano delle frequenze e del tempo. La risposta all'impulso lineare viene preceduta da risposte dovute alla distorsione armonica del sistema, che corrispondono a frequenze multiple di quella originale. Con uno sweep lineare, queste risposte distorte non sono distribuite in modo ordinato lungo l'asse del tempo, poiché la distanza tra le curve relative a ciascuna armonica varia nel tempo. Se invece la sweepata è esponenziale, la natura logaritmica dell'asse delle frequenze implica che l'intervallo di tempo tra ciascuna frequenza e la sua armonica sia costante. Questo permette di separare chiaramente le singole risposte all'impulso per ogni armonica, mantenendo l'IR lineare separata da quelle distorte. Tale separazione consente di analizzare separatamente le distorsioni armoniche, sommarle e ottenere una valutazione complessiva della

distorsione armonica del sistema. Pertanto, il principale vantaggio della sweepata esponenziale è che, in presenza di un sistema distortente, permette un'analisi dettagliata e separata della distorsione armonica del sistema.

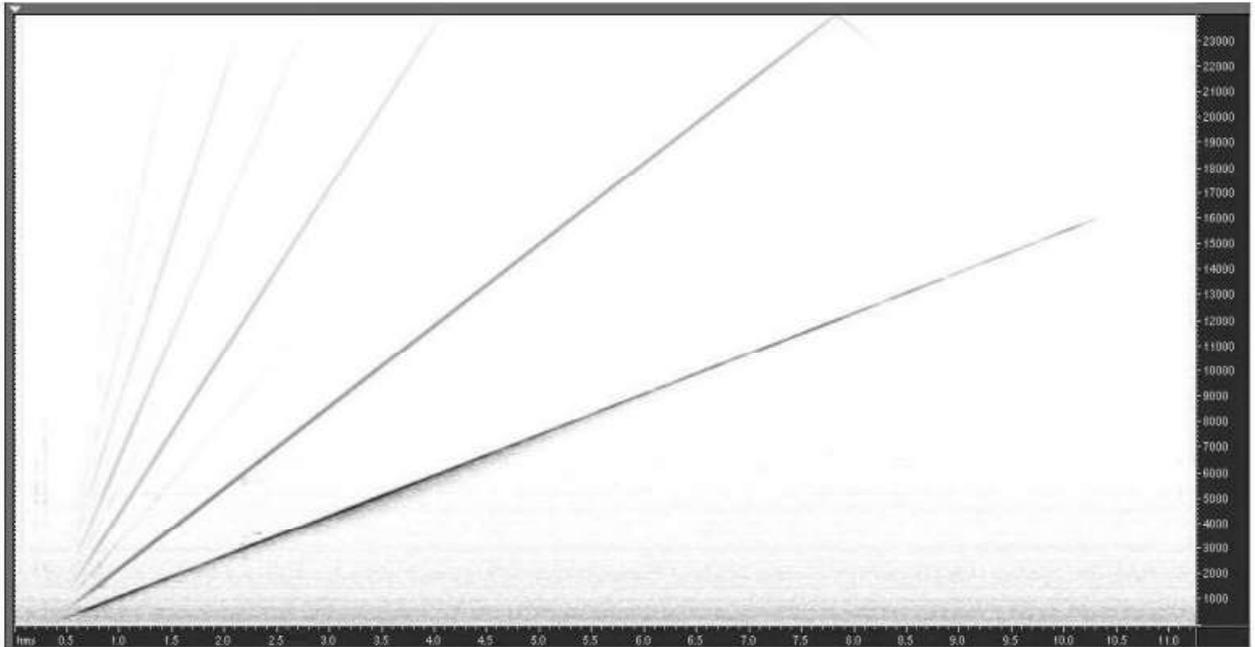


Fig. 2.2.4.1
Spettrogramma nel caso di segnale lineare: Il sistema distortente risponde in modo lineare anche a frequenze multiple di quella del segnale emesso. raddoppia. <http://pcjarina.eng.unipr.it>

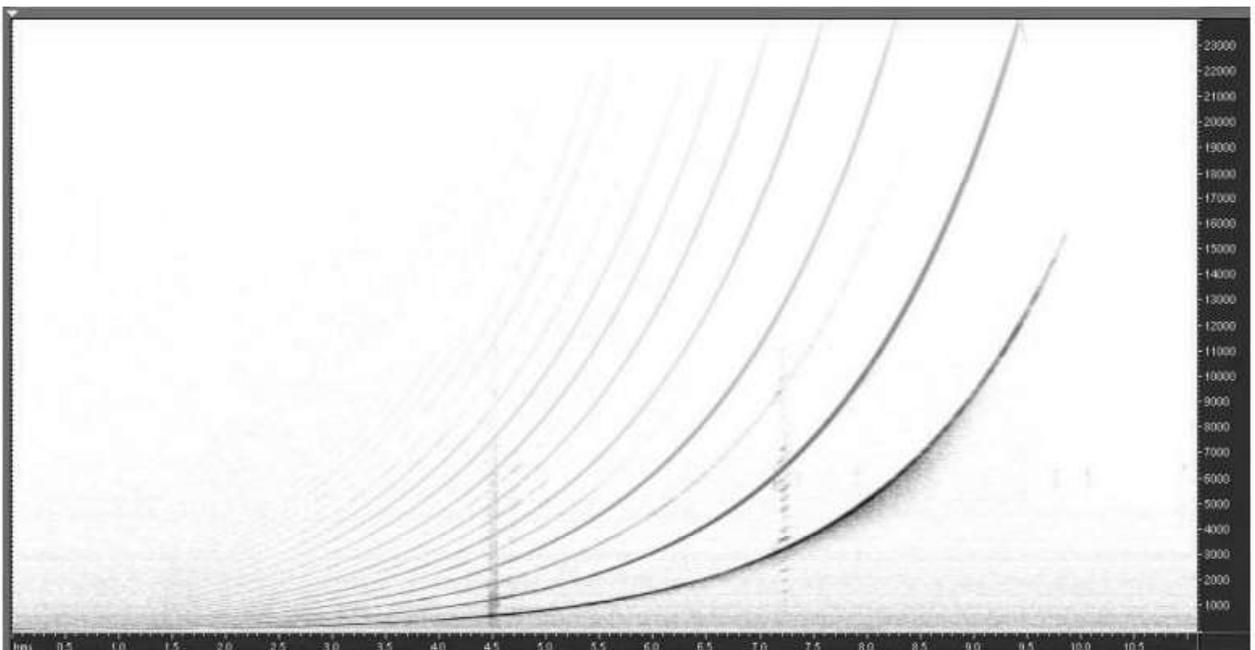


Fig. 2.2.4.2
Spettrogramma nel caso di segnale logaritmico: in questo caso è costante l'intervallo di tempo tra ciascuna frequenza e quando questa raddoppia. <http://pcjarina.eng.unipr.it>

Una delle principali caratteristiche di ESS è la sua capacità di operare anche al di fuori delle tradizionali ipotesi di sistemi LTI (Lineari e Tempo-Invarianti). Infatti, la tecnica è altamente efficace anche per caratterizzare sistemi non lineari e tempo-varianti, con la possibilità di ripetere le misurazioni per ottenere risultati più precisi.

Un esempio notevole è rappresentato dalla ricerca descritta in “Recording concert hall acoustics for posterity” da A. Farina e R. Ayalon, che documenta una vasta campagna di misurazioni della risposta all’impulso dei migliori teatri del mondo.

Le risposte all’impulso ottenute sono di qualità così elevata da poter essere impiegate come filtri digitali per la simulazione della riverberazione nelle registrazioni “asciutte” o anecoiche effettuate in studio (Farina, A. et al, 2008).

2.3 Metodi e software di Simulazione

Di seguito, l’esamina dei principali metodi di simulazione acustica, con riferimento ai software che utilizzano ciascun approccio.

I metodi possono essere suddivisi in geometrici, basati sulle onde, ibridi e statistici:

2.3.1 Metodi Geometrici

Basati sull’acustica geometrica, l’onda sonora è spesso rappresentata tramite raggi o fasci. Sono particolarmente adatti per simulazioni dove le basse frequenze non sono preponderanti.

Principali Tecniche:

- Ray Tracing (Tracciamento dei Raggi). Simula i percorsi del suono come raggi che si propagano, rimbalzano sulle superfici e interagiscono con l’ambiente.
Software: ODEON, EASE, Treble.
- Beam Tracing (Tracciamento a Fasci). Variante del ray tracing che utilizza fasci per migliorare l’efficienza nei calcoli.
Software: Treble, CATT-Acoustic.
- Image Source Method (ISM). Genera sorgenti immagine virtuali per calcolare le riflessioni speculari.
Software: ODEON, EASE

2.3.2 Metodi Basati sulle Onde

Questi metodi risolvono equazioni che descrivono il comportamento ondulatorio del suono, come le equazioni di Helmholtz o di Navier-Stokes. Sono ideali per basse frequenze e situazioni complesse, ma richiedono un maggiore sforzo computazionale.

Principali Tecniche:

- Finite Element Method (FEM). Consente di suddividere un dominio complesso in piccoli elementi finiti (mesh) in cui si risolvono le equazioni acustiche, come l'equazione delle onde, per ottenere una descrizione dettagliata del campo sonoro.
Software: COMSOL Multiphysics, Actran, Ansys Sound
- Boundary Element Method (BEM). Risolve le equazioni solo sulle superfici, riducendo il carico computazionale.
Software: COMSOL Multiphysics, Bempp
- Finite Difference Time Domain (FDTD). Modella la propagazione delle onde nel dominio temporale, si basa sulla discretizzazione delle equazioni d'onda (come l'equazione di Helmholtz o di Navier-Stokes) in uno spazio tridimensionale e in intervalli temporali. Lo spazio viene suddiviso in una griglia regolare, detta mesh, dove le variabili fisiche (pressione sonora, velocità particellare, ecc.) vengono calcolate a ogni nodo della griglia per ogni intervallo temporale.
Software: k-Wave, utilizzato per acustica medica e simulazioni di onde complesse

2.3.3 Metodi Ibridi

Combinano tecniche geometriche e basate sulle onde per sfruttare i vantaggi di entrambi gli approcci. Sono utili per coprire sia alte che basse frequenze

Principali Tecniche:

- Ray-Radiosity Method. Combina il ray tracing per le riflessioni iniziali con metodi basati sull'energia per quelle tardive.
Software: ODEON, Treble
- Scattering Models. Integrano fenomeni come diffusione e diffrazione nelle simulazioni geometriche.
Software: CATT-Acoustic, EASE, Treble

2.3.4 Metodi Statistici

Metodi che semplificano il comportamento del suono, calcolando parametri acustici medi senza rappresentare dettagliatamente le riflessioni individuali, possono essere eseguiti anche manualmente e si dimostrano particolarmente rapidi e quindi efficaci per uno studio di massima. Sono adatti per ambienti grandi e semplici.

Principali Tecniche:

- Sabine e Eyring. Modelli basati sull'assorbimento medio delle superfici per stimare il tempo di riverberazione (RT60).
Software: SoundPLAN, SONarchitect
- Energy Decay Models. Analizzano la distribuzione dell'energia sonora nel tempo per parametri come STI e SPL.
Software: EASE, COMSOL Multiphysics

2.3.5 Simulazioni Specifiche

Alcuni software offrono approcci unici per applicazioni specializzate.

- Simulazioni in Realtà Virtuale (VR).
Software: Treble, che permette simulazioni immersive per esplorare acusticamente spazi in 3D
- Simulazioni Vibro-Acustiche.
Software: Actran, Altair Acoustics, per applicazioni industriali e aerospaziali

Metodo	Software Principali
Ray Tracing	ODEON, EASE, Treble, CATT-Acoustic
FEM	COMSOL Multiphysics, Ansys Sound, Actran
BEM	COMSOL Multiphysics, Bempp
FDTD	k-Wave
Modelli Statistici	SoundPLAN, SONarchitect
Metodi Ibridi	ODEON, Treble, CATT-Acoustic
Realtà Virtuale	Treble

*Fig. 2.3.1
Tabella riassuntiva
dei vari software di
simulazione acustica con
relativi metodi di calcolo*

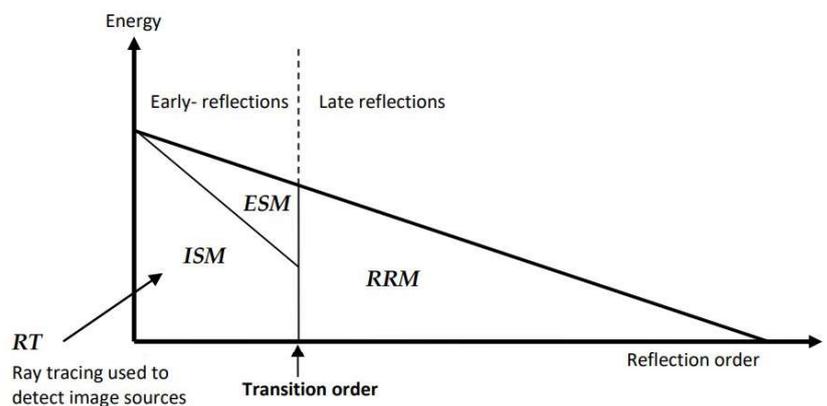
2.4 Metodo di Simulazione in ODEON

Come si analizzerà in dettaglio nei capitoli seguenti, la presente si avvarrà del software Odeon per le simulazioni acustiche che verteranno alla correzione della sala conferenze del Museo Egizio di Torino.

ODEON utilizza un metodo ibrido, dove diversi metodi di simulazione vengono utilizzati in combinazione:

- Metodo della Sorgente Immagine (Image Source Method, ISM): Utilizzato per calcolare le riflessioni precoci, creando “immagini” della sorgente in posizioni virtuali rispetto alle superfici riflettenti.
- Early Scattering Method (ESM): Gestisce le riflessioni che avvengono quasi immediatamente dopo l’emissione del suono, come le riflessioni dalle superfici vicine.
- Ray-Tracing (RT): Si concentra sulle riflessioni che avvengono successivamente, tracciando i percorsi dei raggi sonori nell’ambiente.
- Metodo Ray-Radiosity (RRM): Essenzialmente utilizzato per le riflessioni tardive, calcolando le interazioni di luce e suono più lontane dalla sorgente.

Fig. 2.4.1
Schema dei metodi di calcolo
adottati da Odeon in riferimento
al singolo raggio
[https://odeon.dk/download/
Version18/OdeonManual.pdf](https://odeon.dk/download/Version18/OdeonManual.pdf)



Dato un valore al Transition Order, TO, che viene utilizzato per determinare dove finisce la parte delle riflessioni iniziali e inizia quella delle riflessioni tardive (il valore predefinito è 2, il che significa che tutte le riflessioni che coinvolgono fino a 2 pareti vengono calcolate come parte delle riflessioni iniziali, le riflessioni di ordine superiore a 2, che coinvolgono più di 2 pareti, vengono calcolate come parte delle riflessioni tardive), le riflessioni iniziali al di sotto di esso vengono calcolate utilizzando una combinazione del Metodo della Sorgente Immagine (ISM) e dell’ ESM.

Oltre il TO, le riflessioni vengono calcolate utilizzando il metodo di ray-radiosity (RRM).

Nel caso speciale in cui il TO è impostato a zero, il metodo diventa un modello di ray-tracing.

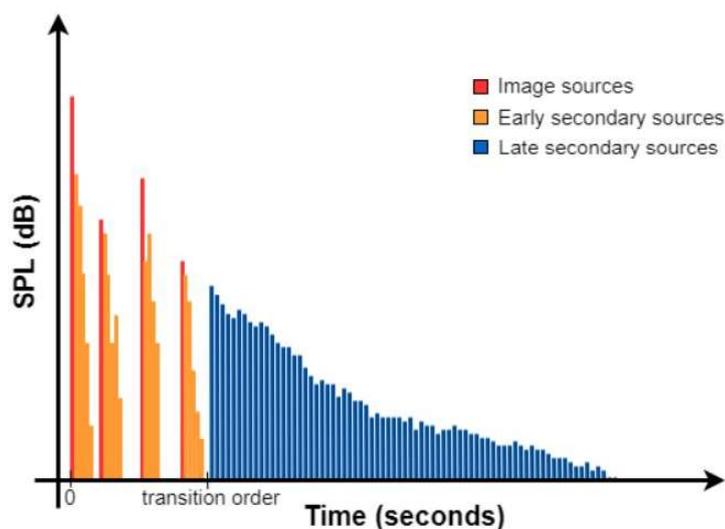


Fig. 2.4.2.
Rappresentazione dei contributi aggiunti al riflettogramma.
<https://odeon.dk/download/Version18/OdeonManual.pdf>

Tutti e tre i metodi si sovrappongono nel tempo, poiché il criterio di transizione, basato sull'ordine di transizione, non è strettamente legato al tempo. Questo garantisce una transizione graduale tra i metodi, evitando brusche variazioni nel decadimento del suono.

2.4.1 Image Source Method (ISM)

Una sorgente immagine si ottiene specchiando la sorgente dietro una parete. Nell'implementazione classica, le sorgenti immagine vengono individuate combinando tutte le possibili superfici fino a un dato ordine di riflessione (ad esempio, Sorgente-Parete1-Parete2, Parete1-Parete3, e così via). Successivamente, viene eseguito un controllo di visibilità per stabilire quali sorgenti immagine sono effettivamente visibili dal ricevitore; quelle non visibili vengono eliminate. Per stanze semplici con poche superfici, costruire l'albero delle combinazioni e controllare la visibilità è relativamente semplice. Tuttavia, in ambienti con migliaia di superfici, il numero di sorgenti immagine cresce enormemente, e molte risultano non visibili, richiedendo quindi un'eliminazione successiva.

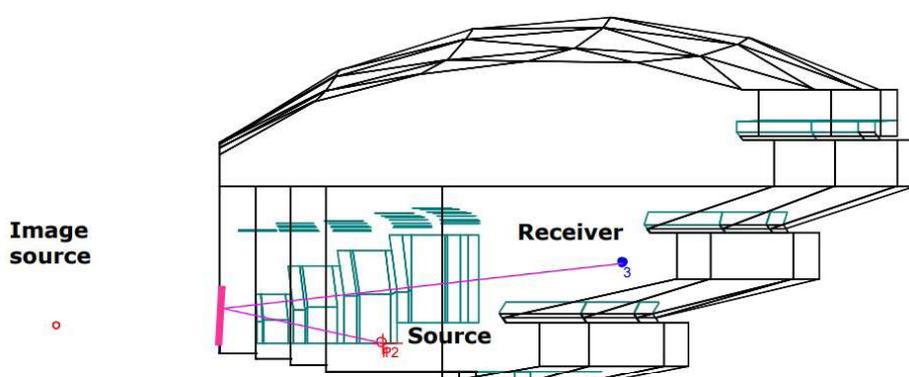
ODEON adotta un metodo più efficiente, basato su un algoritmo di ray tracing rapido per rilevare soltanto le sorgenti immagine visibili. Questo processo si articola nei seguenti passi:

1. Generazione dei raggi: Un numero di raggi precoci viene generato dalla sorgente. ODEON calcola questo numero considerando le dimensioni della stanza, l'ordine di transizione e le dimensioni delle superfici.
2. Riflessioni speculari: I raggi vengono riflessi in modo speculare fino a raggiungere l'ordine di transizione.
3. Creazione dell'albero delle sorgenti immagine: Per ogni superficie

riflettente, viene aggiunta una nuova sorgente immagine a un albero. Il numero di sorgenti generate è molto inferiore rispetto alle combinazioni possibili di superfici, ma tutte risultano valide, poiché superfici nascoste o molto piccole sono escluse. Questo calcolo è indipendente dal ricevitore.

4. Controllo di visibilità: Per ogni sorgente immagine, ODEON verifica la visibilità seguendo il percorso di riflessione inverso fino alla sorgente. Se il percorso non è ostruito, la sorgente immagine è considerata visibile e contribuisce alla risposta all'impulso. In caso contrario (ad esempio, se il percorso è bloccato da altre superfici o le superfici sono troppo piccole), la sorgente immagine viene considerata nascosta e ignorata.

Fig. 2.4.1.1
Generazione della sorgente immagine.
<https://odeon.dk/download/Version18/OdeonManual.pdf>



2.4.2 Early Scattering Method (ESM)

Per ogni sorgente immagine visibile generata, viene creata una serie di sorgenti secondarie (early secondary sources) sulla superficie corrispondente alla sorgente immagine, che tengono conto dello scattering emettendo raggi di scattering definiti dal parametro “Number of early scatter rays”.

Questi raggi di scattering vengono tracciati a partire dall'ordine di riflessione corrente fino all'ordine di transizione. Ad ogni punto di riflessione di questi raggi, incluso il punto di origine, viene creata una nuova “early” sorgente secondaria.

Ognuna di queste sorgenti secondarie visibile dal ricevitore aggiunge una riflessione alla risposta all'impulso.

L'attenuazione di una sorgente immagine o di una sorgente secondaria viene calcolata considerando i seguenti fattori:

- Il fattore di direttività della sorgente primaria nella direzione rilevante della radiazione.
- I coefficienti di assorbimento delle superfici coinvolte nella

generazione della sorgente immagine (che possono dipendere dall'angolo se è abilitato l'assorbimento angolare nella configurazione della stanza).

- L'assorbimento dell'aria dovuto alla lunghezza del percorso di riflessione. Il calcolo si basa sulla norma ISO 9613 (ISO 9613-1, 1993) e considera solo la frequenza centrale di ogni banda di ottava.
- La perdita dovuta allo scattering (dipendente dalla frequenza), causata dall'energia diffusa che viene gestita tramite uno "scattering tree", il quale consente che in base allo scattering della superficie, l'energia sonora venga distribuita tra sorgenti immagine (contributo speculare) e sorgenti secondarie (sorgenti di Lambert) provenienti dalla stessa superficie. Se vengono generate nuove sorgenti immagine sulla base di quella corrente (nel caso in cui non sia stato ancora raggiunto l'ordine di transizione), il contenuto energetico sarà infatti ripartito secondo uno schema gerarchico ramificato detto scattering tree, rispettando i principi di conservazione dell'energia.

In breve, ogni volta che ODEON rileva una sorgente immagine, viene avviato un ciclo interno di raggi di scattering che si occupa del suono diffuso riflesso dalla sorgente immagine o superficie corrispondente.

Se tutti i coefficienti di scattering in una stanza sono pari a 0,5, l'energia speculare di una sorgente immagine di primo ordine viene moltiplicata per $(1-0,5)$. Per una sorgente immagine di secondo ordine, l'energia speculare viene moltiplicata per $(1-0,5) \times (1-0,5)$. L'energia restante viene gestita dai raggi di scattering.

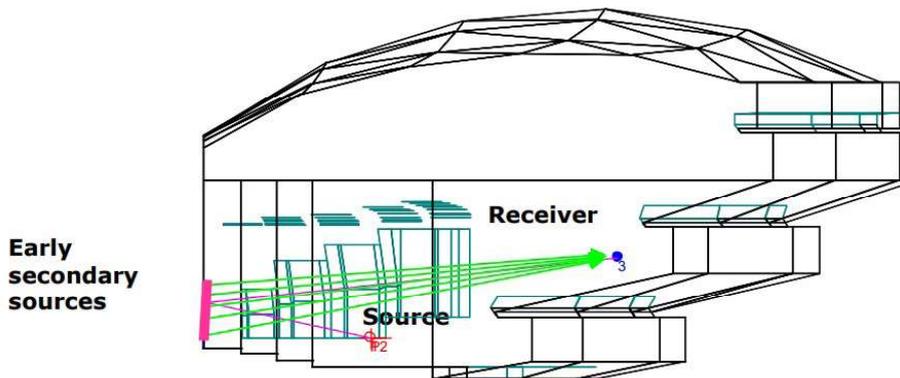


Fig. 2.4.2.1
Generazione delle sorgenti
secondarie iniziali.
[https://odeon.dk/download/
Version18/OdeonManual.pdf](https://odeon.dk/download/Version18/OdeonManual.pdf)

2.4.3 Ray Radiosity Method (RRM)

La parte delle riflessioni tardive utilizza un metodo di ray-tracing modificato da ODEON, chiamato metodo Ray-radiosity, che si dimostra molto efficiente e dipendente dal ricevitore. Nell'implementazione classica del ray-tracing, i raggi vengono emessi dalla sorgente, riflessi

e tracciati dall'algoritmo. Intorno al ricevitore viene definita una sfera di rilevamento, e ogni volta che un raggio la interseca, la riflessione corrispondente viene aggiunta alla risposta all'impulso.

Tuttavia, questo approccio presenta due principali svantaggi:

- La dimensione della sfera di rilevamento è arbitraria, nonostante i vari metodi utilizzati per definirla.
- Il ray-tracing deve essere eseguito nuovamente per ogni nuovo ricevitore.

Il metodo Ray-radiosity ovvia a questi svantaggi dividendo il processo in due fasi distinte definite Rendering e Gathering. Rendering.

Rendering (RRM)

L'obiettivo di questo processo è individuare sorgenti virtuali che emettano energia nella stanza. Invece di concentrarsi sulle riflessioni, si immagina di sostituire l'ambiente con un insieme di sorgenti collocate in varie posizioni nello spazio, ciascuna con il ritardo appropriato. Il processo è suddiviso in due fasi: una iniziale (valida solo per le sorgenti puntuali) e una finale (applicabile a tutti i tipi di sorgente).

Fase 1:

- Viene emesso un numero di raggi tardivi, specificato nella configurazione della stanza, dalla sorgente.
- I raggi colpiscono le superfici della stanza, vengono riflessi e successivamente colpiscono altre superfici, continuando il ciclo fino a raggiungere l'ordine massimo di riflessione stabilito nella configurazione della stanza. Le riflessioni seguono il metodo dello scattering vettoriale, tenendo conto della dimensione e della rugosità delle superfici.
- Ogni volta che un raggio viene riflesso, il suo ordine di riflessione aumenta di uno. Le riflessioni di ordine basso sono già state considerate nella parte delle riflessioni iniziali; pertanto, nessuna azione viene intrapresa fino al raggiungimento dell'ordine di transizione definito.

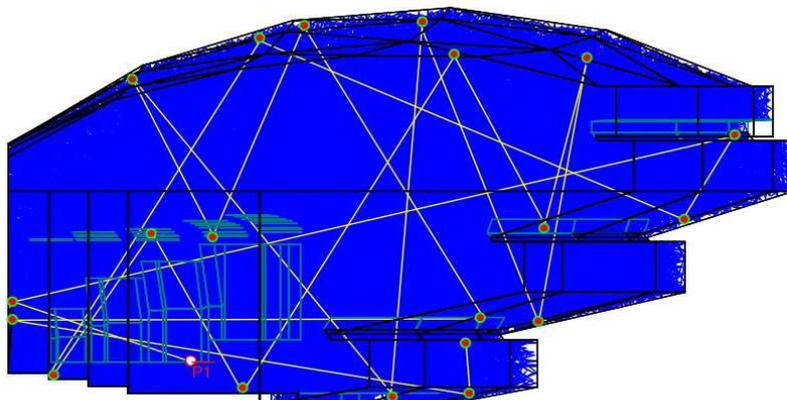


Fig. 2.4.2.1
Generazione delle sorgenti
secondarie tardive.
[https://odeon.dk/download/
Version18/OdeonManual.pdf](https://odeon.dk/download/Version18/OdeonManual.pdf)

Fase 2:

- Se l'ordine di riflessione supera l'ordine di transizione, ogni volta che il raggio colpisce una superficie viene generata una sorgente secondaria tardiva, che tiene conto del fattore di direttività della sorgente primaria e dell'assorbimento delle superfici e dell'aria lungo il percorso di riflessione, calcolato in base alla norma ISO 9613 (ISO 9613-1, 1993). Questo processo crea una mappa di sorgenti secondarie tardive in tutta la stanza, definito come rendering.
- Le sorgenti secondarie tardive possono avere una direttività Lambertiana, Lambertiana Obliqua o Uniforme, a seconda delle impostazioni di calcolo.

A differenza del metodo delle sorgenti immagine, il processo delle riflessioni tardive non genera un numero di riflessioni esponenzialmente crescente nel tempo. Mantiene invece una densità costante di riflessioni durante tutto il calcolo, permettendo tempi di elaborazione ragionevoli.

Gathering (RRM)

In questa fase, tutte le informazioni provenienti dalle sorgenti secondarie tardive generate vengono raccolte (gathered) per il punto ricevente desiderato. ODEON verifica ogni sorgente secondaria per determinare se è visibile dal ricevitore. Se lo è, il suo contributo viene aggiunto alla risposta all'impulso. A questo punto, i contributi del suono diretto e riflesso vengono sommati nel punto di ricezione, consentendo il calcolo dei risultati noti come Single Point Response, Multi Point Response, Grid Response e 3D Matrix.

Se sono coinvolti più ricevitori, questa fase dipendente dal ricevitore viene semplicemente ripetuta per ciascun ricevitore. Analogamente, se ci sono più sorgenti, la risposta in un determinato ricevitore sarà la sovrapposizione dei contributi delle singole sorgenti, ognuna delle quali può essere opportunamente ritardata se è stato applicato un ritardo alla sorgente stessa (Odeon A/S, 2024).

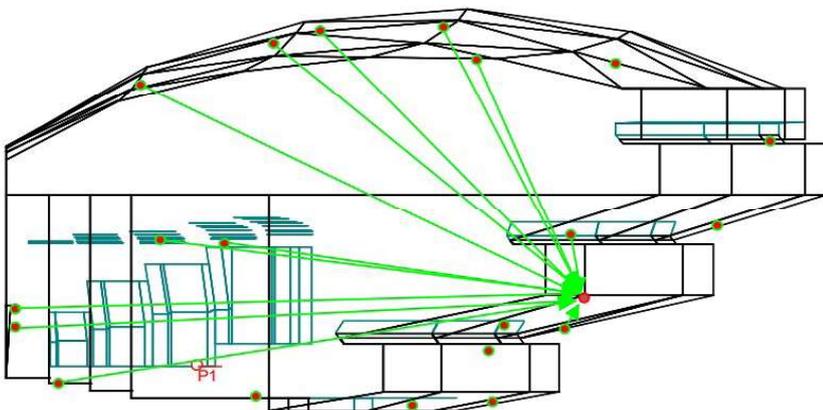


Fig. 2.4.2.1
Apporto energetico delle sorgenti
secondarie tardive visibili al
ricevitore.
[https://odeon.dk/download/
Version18/OdeonManual.pdf](https://odeon.dk/download/Version18/OdeonManual.pdf)

Bibliografia

Farina, A., Capra, A., Campanini, S. (2008). La Misura Della Risposta All'Impulso Per La Caratterizzazione Di Sistemi Acustici e Vibrazionali. Università degli Studi di Parma, Dip. Ing. Industriale, Parma

International Organization for Standardization. (2009). Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 1: Performance spaces (ISO 3382-1:2009). Geneva: ISO

ODEON Room Acoustics Software, Version 18. (2022). Odeon A/S. Retrieved from www.odeon.dk

Spagnolo, R., Cingolani, S. (2008). Acustica musicale e architettonica. CittàStudi edizioni

Sitografia

<https://odeon.dk/download/Version18/OdeonManual.pdf>

<http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/Papers/244-Ancona-2008.pdf>

www.angelofarina.it

<https://www.spectra.it/prodotti/fonometri-vibrometri-copy/ramsete/>

<https://www.afmg.eu/en/ease#software>

<https://www.treble.tech/acoustics-suite>

<https://www.catt.se/>

<https://www.comsol.com/acoustics-module>

<https://www.ansys.com/products/acoustics-analysis/ansys-sound#tab1-2>

<https://hexagon.com/products/product-groups/computer-aided-engineering-software/actran>

<https://bempp.com/>

<http://www.k-wave.org/documentation.php>

<https://www.soundplan.eu/en/software/soundplannoise/product-description/>

<https://www.soundofnumbers.net/index.php/sonarchitect-iso/howworksiso>

Correzione acustica in edifici esistenti **3**

3.0 Introduzione: l'acustica delle sale conferenza

Le sale conferenze sono progettate tenendo conto di vari fattori acustici per garantire una buona intelligibilità del parlato e il comfort dei partecipanti. Un'acustica ben progettata è fondamentale per ottimizzare l'esperienza di ascolto in un ambiente dove la comunicazione verbale è l'elemento chiave.

Michael Ermann fornisce linee guida generali per varie tipologie di ambiente e destinazioni d'uso tra cui le sale conferenza (lecture halls):

- Progettare sale a ventaglio per avvicinare il pubblico al palco, mantenendo un angolo inferiore a 125 gradi, o sale rettilinee per favorire riflessioni laterali e garantire una visione chiara dello schermo posizionato davanti.
- Inclinare le superfici vicine all'area di emissione (come soffitto e almeno una parete) per evitare lati paralleli che potrebbero creare eco a sbalzo.
- Posizionare materiali fonoassorbenti sulla parete posteriore e sulle sezioni alte delle pareti laterali per ottimizzare il tempo di riverberazione, riducendo riflessioni indesiderate ma lasciando riflettenti le superfici che favoriscono riflessioni iniziali.
- Inclinare il pubblico di almeno 7 gradi e posizionare la sorgente sonora su un palco rialzato per migliorare le linee di vista e la chiarezza sonora diretta.
- Mantenere il soffitto riflettente e basso per ottenere un volume di sala compreso tra 2,3 e 4,2 metri cubi per posto. Sapere che il parlato non è chiaramente udibile oltre 10,6 metri dalla sorgente senza un'accurata progettazione acustica o amplificazione.
- Sale con più di 100 posti richiedono un sistema di amplificazione sonora.
- Usare porte con chiusura automatica senza serrature per ridurre le interruzioni causate dai ritardatari.

Questi requisiti possono essere ottenuti con molteplici soluzioni architettoniche.

Soluzioni che non sempre sono possibili intervenendo sull'esistente e talvolta, quasi sempre per quello che riguarda edifici di interesse storico, con interventi che devono necessariamente essere reversibili e

permettere, certamente non in ultima analisi, la fruizione dell'ambiente architettonico nelle sue declinazioni di testimonianza storica, architettonica, geometrica, materica (Ermann, M., 2015).

3.1 Casi studio

Qui di seguito l'analisi di quattro casi che per conformazione geometrica, mezzi di analisi e simulazione, tipo d'intervento e scopo funzionale sono stati selezionati come interventi di correzione acustica in edifici storici.

3.1.1 Correzione acustica di una sala Rinascimentale

Le sale storiche, in particolare quelle medievali e rinascimentali, sono spesso utilizzate per ospitare eventi musicali e conferenze, ma le loro caratteristiche acustiche, influenzate da soffitti a volta e materiali riflettenti come intonaco e marmo, non sono ideali per tali scopi. Lo studio ha analizzato una sala rinascimentale dedicata a eventi culturali, rivelando un tempo di riverberazione eccessivo, pari a 4,5 secondi alle frequenze medie.



*Fig. 3.1.1.1
Veduta interna
della sala*

Per analizzare le caratteristiche acustiche della sala, sono state effettuate misurazioni utilizzando piccole esplosioni di petardi come sorgente sonora impulsiva, in conformità alla norma ISO 3382-1.

Le misurazioni si sono svolte in condizioni ottimali: assenza di vento e precipitazioni, temperatura media di 20°C, umidità relativa del 50% e rumore di fondo inferiore a 30 dBA.

Un microfono BRAHMA, posizionato a 1,50 metri dal pavimento, ha registrato le risposte impulsive in 13 punti di ricezione equamente distribuiti nella sala. La sorgente sonora era collocata alla stessa altezza e posizione del relatore durante una conferenza. Le risposte acustiche registrate sono state analizzate con il software Dirac 4.0, calcolando parametri quali il tempo di riverberazione (T30), il tempo di decadimento iniziale (EDT), la chiarezza (C50), la definizione (D50) e l'indice di trasmissione del parlato (STI).

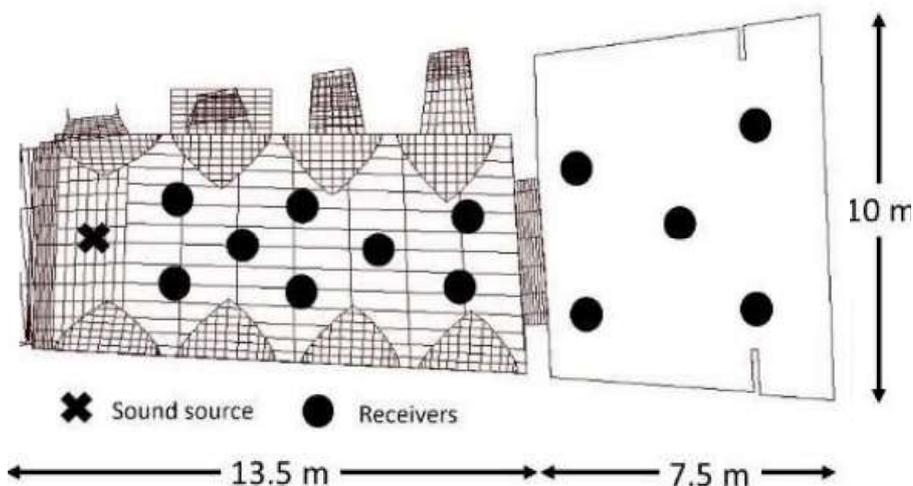
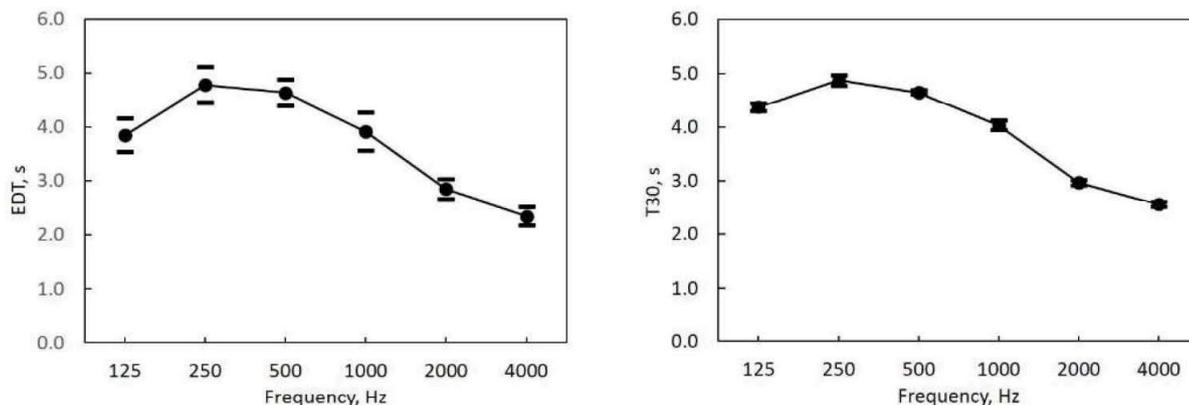


Fig. 3.1.1.2
Pianta con posizione di
sorgente e ricevitori

L'analisi dei dati raccolti ha evidenziato un tempo di riverberazione eccessivo. Nelle frequenze comprese tra 250 Hz e 500 Hz, il tempo di riverberazione era di circa 5,0 secondi, mentre a 1 kHz sia il EDT che il T30 si attestavano su 4,0 secondi. Il profilo del tempo di riverberazione mostrava un andamento a campana, causato dalla geometria a volta della sala che focalizzava il suono al centro.

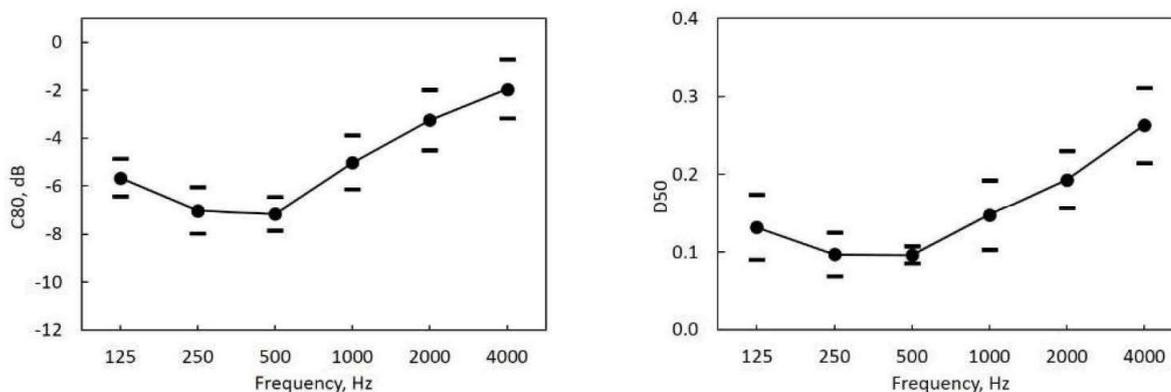
Fig. 3.1.1A e B
Valori di EDT e T_{30}
misurati



Alle basse frequenze (125 Hz), il tempo di riverberazione risultava ridotto rispetto alle bande successive (250 Hz e 500 Hz), grazie alla presenza di ampie superfici vetrate laterali e di una parete in cartongesso sul fondo, utilizzata per le proiezioni.

Questi elementi agivano come assorbitori estesi per le basse frequenze. Il valore medio della chiarezza C80 era di circa -5,0 dB, mentre la definizione D50 non superava 0,3. Confrontando questi valori con quelli ottimali riportati in letteratura, è emerso che la sala non era adatta all'ascolto di musica o parlato.

Lo STI (Speech Transmission Index), utilizzato per valutare la comprensione del parlato, era pari a 0,30 ($\pm 0,01$), un valore che indica una condizione di scarsa intelligibilità. Questa inadeguatezza acustica rendeva difficile la comprensione del parlato nella sala.



Non essendo disponibile il valore del coefficiente di assorbimento acustico del materiale scelto per la correzione acustica, sono state effettuate misurazioni per determinarlo. Il materiale, un poliestere dello spessore di 4 cm, è stato rivestito con un tessuto colorato acusticamente trasparente per ragioni estetiche.

Per ottenere i dati, è stato utilizzato un tubo di impedenza conforme alla norma EN ISO 10534-2, dato che non era disponibile una camera riverberante. Le misurazioni sono state effettuate a incidenza normale nel range di frequenza compreso tra 125 Hz e 4 kHz, utilizzando campioni in quattro configurazioni diverse. I valori misurati a 4 kHz sono stati estrapolati basandosi su quelli a 2 kHz, in quanto per i materiali porosi i coefficienti a queste frequenze sono generalmente equivalenti.

Fig. 3.1.1 D
Coefficients di assorbimento
dei materiali presenti
nell'ambiente

Frequency, Hz	125	250	500	1 k	2 k	4 k
walls / ceiling	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04
plasterboard	0.25	0.15	0.10	0.09	0.08	0.07
glass	0.20	0.15	0.10	0.10	0.05	0.05

Per progettare la correzione acustica della sala, è stato utilizzato il software di simulazione acustica ODEON.

Il modello tridimensionale della sala è stato realizzato utilizzando superfici piane che simulano gli elementi strutturali della stanza. Dopo l'importazione in Odeon, sono stati inseriti una sorgente sonora omnidirezionale e 13 punti di ricezione. Ai materiali delle superfici sono stati assegnati valori di coefficiente di assorbimento acustico, mentre i parametri di calcolo sono stati impostati come segue:

- Ordine di transizione (TO): 2,
- Lunghezza della risposta all'impulso: 5,0 secondi,
- Numero di raggi tardivi: 50.000,
- Risoluzione della risposta all'impulso: 3,0 ms,
- Ordine massimo di riflessione: 2.000.

Per simulare l'area occupata dal pubblico, sono stati utilizzati parallelepipedi con dimensioni di 0,8 m (altezza), 5,0 m (larghezza) e 10 m (lunghezza), coprendo una superficie di 50 m². È stato assegnato un coefficiente di assorbimento specifico e un coefficiente di diffusione geometrico di 0,5.

La prima fase della simulazione è stata la calibrazione del modello acustico virtuale, in cui i valori dei coefficienti di assorbimento e diffusione sono stati regolati per avvicinare i risultati simulati a quelli misurati. Il tempo di riverberazione (T30) è stato scelto come parametro di riferimento. La calibrazione è stata considerata completata quando le differenze tra i tempi simulati e misurati in tutte le bande di ottava (125 Hz - 4,0 kHz) erano inferiori al 5%. Le simulazioni sono state calibrate ed eseguite per la parte progettuale considerando la sala vuota, I valori del coefficiente di assorbimento acustico del pubblico sono riportati nella tabella che mostra i valori del coefficiente di assorbimento del pubblico utilizzato nel modello virtuale.

Frequency, Hz	125	250	500	1 k	2 k	4 k
absorption coefficient	0.60	0.70	0.80	0.83	0.84	0.85

*Fig. 3.1.1.3
valori del coefficiente
di assorbimento del
pubblico utilizzato nel
modello virtuale*

Nella proposta progettuale, i pannelli sono stati collocati lungo la parete priva di finestre e sotto la volta, per ridurre gli effetti di focalizzazione acustica. Nel modello virtuale, è stata simulata una superficie di 34 m² di pannelli fonoassorbenti, con i coefficienti di assorbimento riportati in letteratura e nel modello numerico. I risultati teorici mostrano una riduzione del tempo di riverberazione e un miglioramento dei parametri acustici come C50 e STI.

Successivamente, è stato valutato l'effetto del pubblico sulla risposta acustica. Nel modello virtuale, il coefficiente di assorbimento del

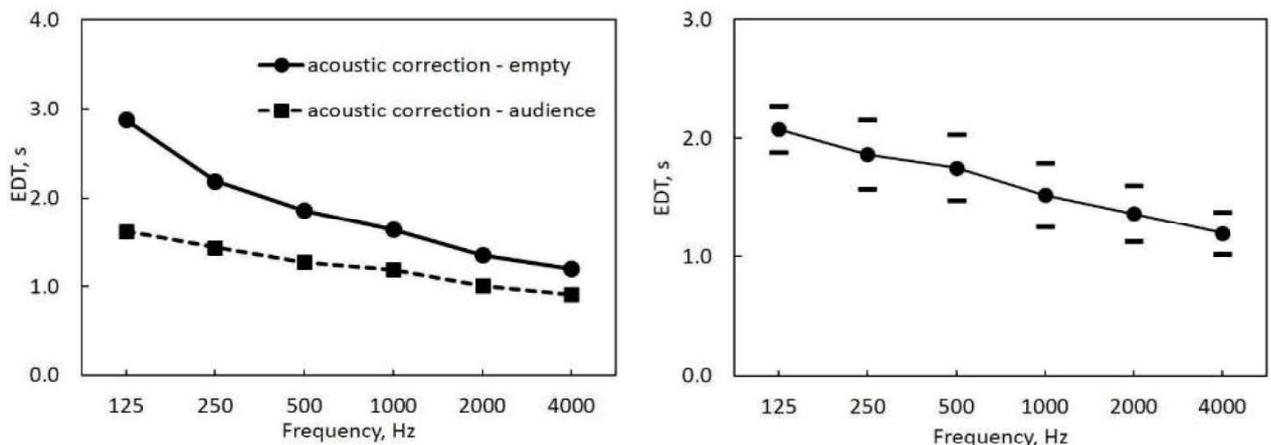
pubblico è stato assegnato alle superfici delle sedute vuote, utilizzando valori riportati nella letteratura corrente. Questa fase ha permesso di analizzare l'acustica sia in condizioni di sala vuota che occupata.



Fig. 3.1.1.4
Veduta interna della sala dopo l'intervento di correzione acustica

Le misurazioni acustiche dopo la messa in opera sono state effettuate in una stanza vuota, senza pubblico. L'inserimento di pannelli fonoassorbenti ha migliorato le prestazioni acustiche della sala. I valori del tempo di riverberazione T30 a 500 Hz e 1 kHz, misurati dopo l'intervento acustico, sono di circa 2,5 secondi, corrispondenti alle previsioni del software di acustica architettonica. Allo stesso modo, i valori EDT a 500 Hz e 10 kHz, dopo l'intervento, sono circa 1,5 secondi e coincidono con le previsioni del software. L'analisi dei dati mostra una riduzione di questi parametri, specialmente tra 250 Hz e 500 Hz, dove prima dell'intervento i valori erano rispettivamente di circa 5,0 secondi (EDT) e 4,5 secondi (T30). I pannelli fonoassorbenti sotto la volta hanno ridotto gli effetti di focalizzazione acustica, migliorando ulteriormente le caratteristiche acustiche.

Fig. 3.1.1.A2 e A3
Valori di EDT simulati, considerando la sala vuota ed in presenza di pubblico. Valori di EDT misurati post intervento



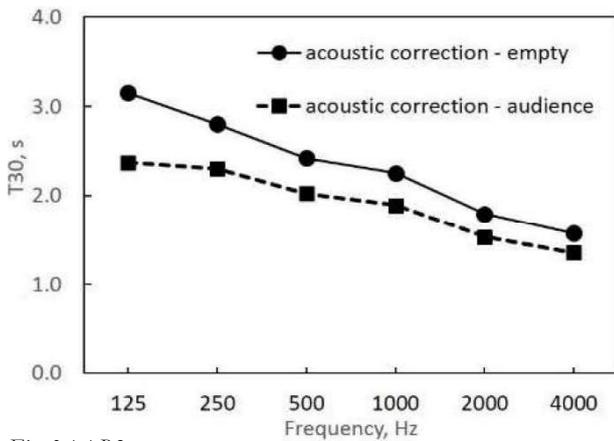


Fig. 3.1.1.B2
Valori di T30 simulati, con e senza pubblico.

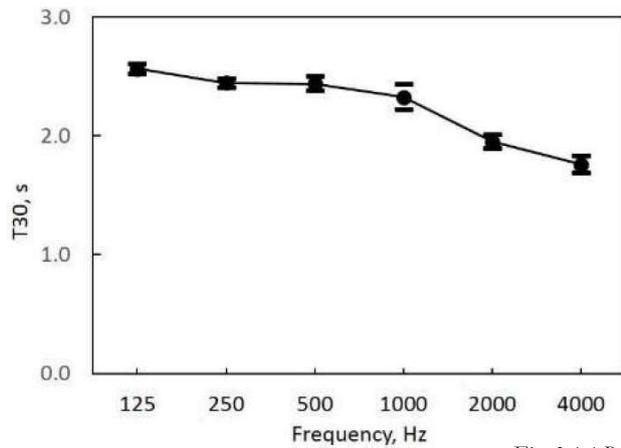


Fig. 3.1.1.B3
Valori di T30 misurati post intervento

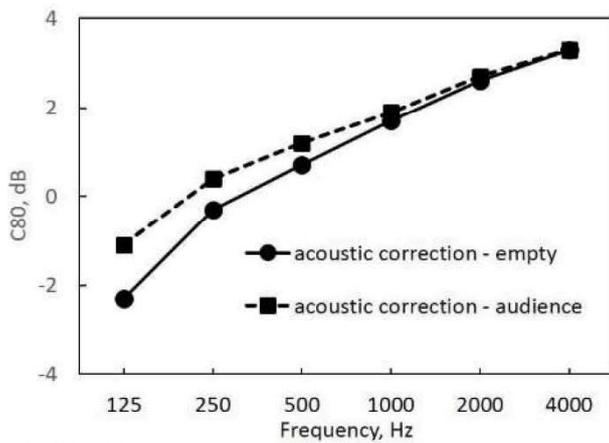


Fig. 3.1.1.C2
Valori di C80 simulati, con e senza pubblico.

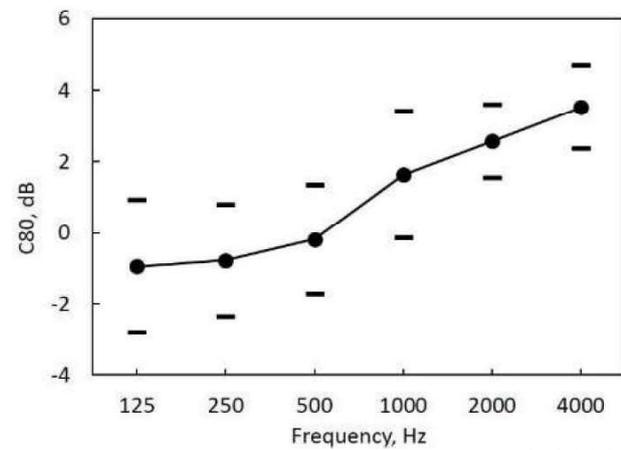


Fig. 3.1.1.C3
Valori di C80 misurati post intervento

Il parametro D50, che esprime la quantità di fonemi effettivamente compresi, è aumentato a valori vicini a 0,5, confermando anche le previsioni del software (Iannace, G. et al., 2019).

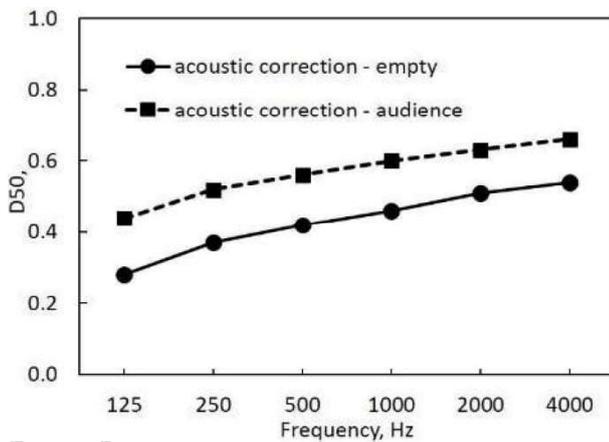


Fig. 3.1.1.D2
Valori di D50 simulati, con e senza pubblico.

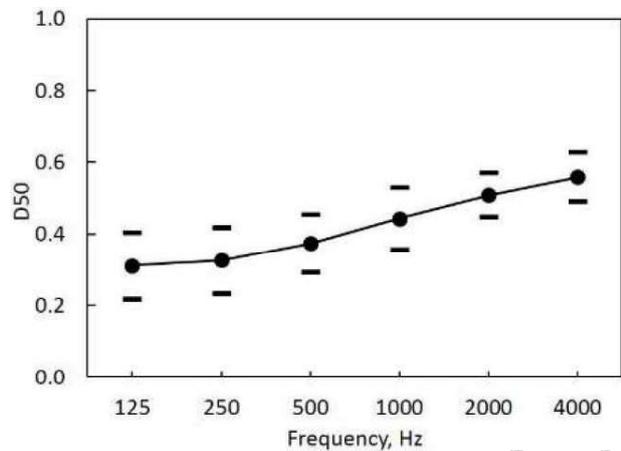


Fig. 3.1.1.D3
Valori di D50 misurati post intervento

2.1.2 Legambiente Auditorium a Rispescia

Fig. 2.1.2.1
Veduta interna della
Chiesa di Rispescia



Lo studio e il progetto riguardano l'Auditorium di Legambiente, situato nella Chiesa di Rispescia all'interno del Centro Nazionale per lo Sviluppo Sostenibile "Il Girasole" nella Toscana occidentale.

La chiesa ha una pianta rettangolare di circa 8x19 metri e un'altezza variabile tra 8,86 e 9,92 metri, con un tetto a doppio strato sostenuto da capriate in legno.

Lo spazio comprende un'area dell'altare, utilizzata come zona per i relatori durante le conferenze o come palco per concerti e rappresentazioni teatrali.

Le pareti in muratura intonacate sono dotate di finestre (1x2,82 m), mentre la parete di fondo ha un grande ingresso con una porta in legno (1,90x3,5 m) e due finestre più piccole (0,78x1,5 m). Il volume complessivo della sala è di circa 1300 m³ e le finiture, come il pavimento in marmo, le pareti intonacate, le piastrelle in laterizio del soffitto e gli arredi riflettenti (porte in legno, vetrate singole, panche in metallo forato), contribuiscono a condizioni acustiche sfavorevoli.

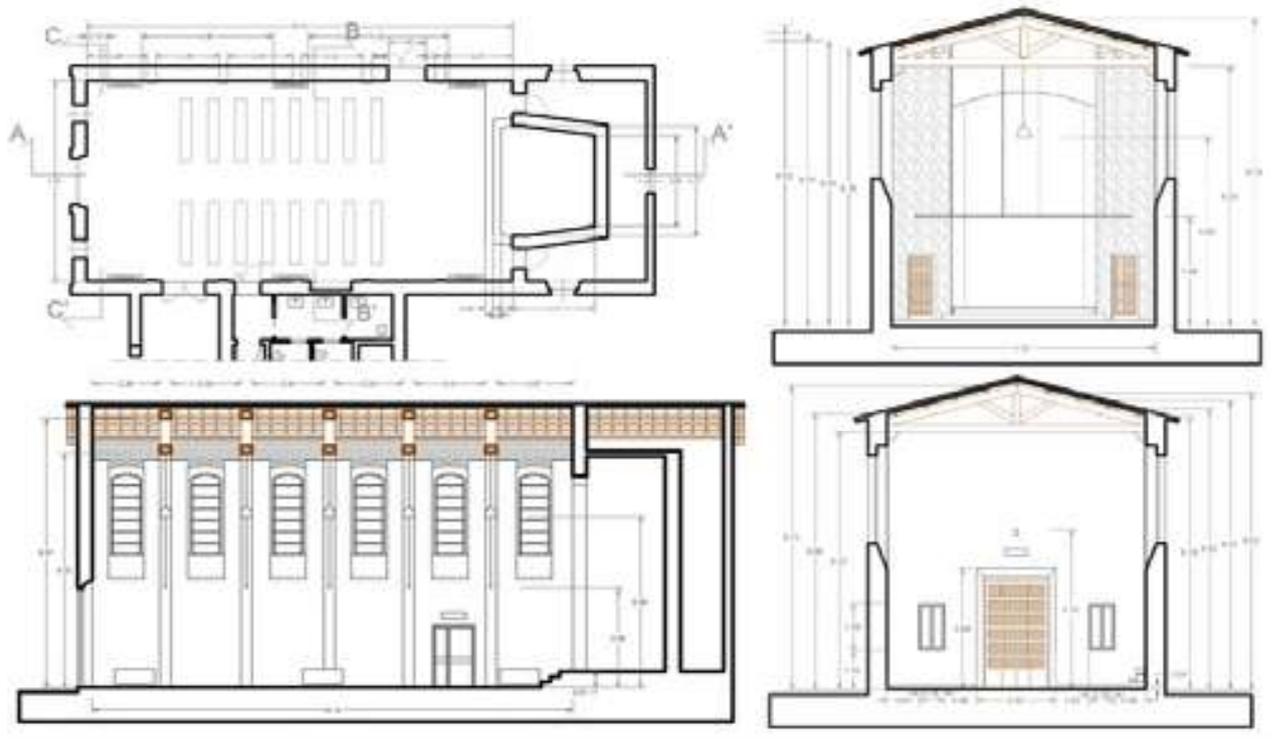


Fig. 2.1.2.2
Pianta e sezioni della chiesa

L'obiettivo principale del progetto di correzione acustica era creare un ambiente sonoro confortevole e versatile, capace di adattarsi alle diverse funzioni previste.

Obiettivo raggiunto attraverso soluzioni variabili, in grado di garantire prestazioni acustiche adeguate per ogni utilizzo, rispettando al contempo i criteri di sostenibilità dei materiali scelti. Questi materiali, tutti naturali, riciclati e/o riciclabili, includono piante, legno, gomma riciclata da pneumatici usati e poliestere da bottiglie PET riciclate.

Per migliorare le prestazioni acustiche dello spazio e adattarlo alle sue diverse destinazioni, sono stati selezionati i parametri tempo di riverberazione (TR), chiarezza (C50) e indice di trasmissione del parlato (STI). I valori ottimali di riferimento per questi parametri sono stati ricavati dall'Appendice C della norma italiana UNI 11367.

Il TR dell'Auditorium è stato misurato conformemente alla norma ISO 3382, mentre il tempo di riverberazione ottimale nel dominio delle frequenze è stato calcolato seguendo i criteri della UNI 11367. Tuttavia, dato che uno degli obiettivi era creare un ambiente multifunzionale, è stato definito un intervallo di prestazioni specifico per il TR.

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Measured TR [s]	3.54	3.53	3.47	3.52	2.75	1.89
Optimal TR [s] UNI 11367	1.23	1.23	1.03	1.03	1.23	1.23
Optimal TR [s] more general reference	1.3÷1.8		1.0÷1.2	1.0÷1.2	1.0÷1.2	

Fig. 2.1.2.3
Intervallo di TR secondo le prestazioni di progetto

Il modello tridimensionale della sala è stato sviluppato e validato confrontando i tempi di riverberazione misurati in punti strategici dell'ambiente con quelli simulati nelle stesse posizioni. Le simulazioni acustiche sono state effettuate utilizzando il software Ramsete versione 2.5, consentendo una verifica accurata delle prestazioni acustiche previste.

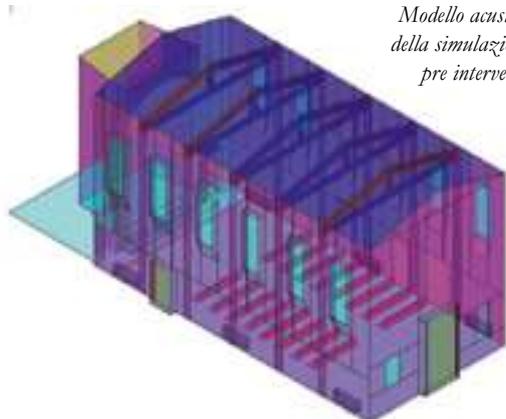


Fig. 2.1.2.4
Modello acustico della simulazione pre intervento

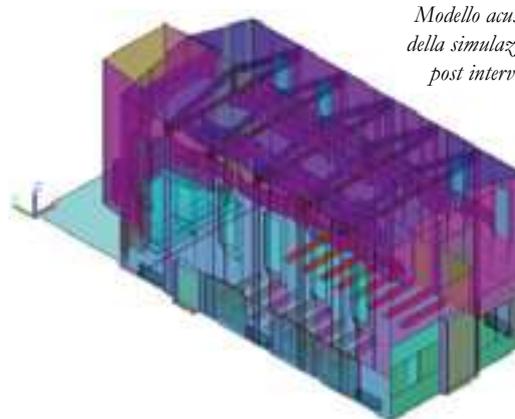


Fig. 2.1.2.5
Modello acustico della simulazione post intervento

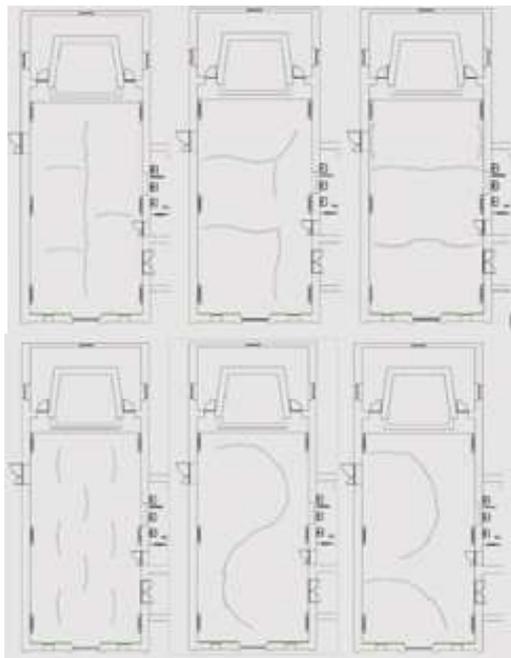
Il progetto di correzione acustica della chiesa ha previsto tre interventi principali, sintetizzati come segue:

1. Rivestimento fonoassorbente della parete d'ingresso.
La parete è stata trattata con una composizione di piante sempreverdi, scelte per le loro proprietà estetiche e acustiche.
2. Installazione di pannelli fonoassorbenti sospesi.
Sono stati posizionati 36 baffles curvi appesi al soffitto, disposti in file parallele per migliorare il controllo della riverberazione e ridurre le riflessioni indesiderate.
3. Pannelli mobili double-face.
Otto pannelli curvi verticali, progettati per essere mobili, sono stati inseriti per offrire flessibilità acustica. I pannelli, utilizzabili come rivestimenti delle pareti laterali o come divisori tra sottoaree, hanno un raggio di curvatura di 3,5 m, un'altezza di 2 m e uno spessore di 106 mm.

Struttura dei pannelli mobili:

- Strato di gomma riciclata da pneumatici usati (spessore 10 mm, densità 750 kg/m^3) per aggiungere massa.
- Doppio pannello in legno multistrato (spessore 8+8 mm) per garantire la curvatura.
- Doppio pannello in fibra di poliestere (spessore 40+40 mm, densità 40 kg/m^2) per il fonoassorbimento.
- Rivestimento in tessuto di poliestere leggero (peso 150 g/m^2) su entrambi i lati per rifinire esteticamente.

*Fig. 2.1.2.6 e 7
Schema con possibili
configurazioni delle pareti
acustiche mobili.
Veduta interna
dell'ambiente con le pareti
mobili*



Il posizionamento flessibile dei pannelli mobili consente di modificare la resa acustica dell'auditorium, adattandolo alle diverse esigenze funzionali.

Nel post-operam sono state condotte misurazioni del tempo di riverberazione in tre configurazioni:

- Solo pannelli fonoassorbenti sospesi.
- Massimo assorbimento acustico.
- Minimo assorbimento acustico.

Il confronto tra le condizioni ante-operam e le tre configurazioni mostra, come illustrato in fig. il pieno rispetto degli obiettivi progettuali per il tempo di riverberazione, rientrando nel range ottimale per il parlato.

Successivamente, sono state effettuate misurazioni dei livelli di pressione sonora con una sorgente omnidirezionale posizionata al centro dell'altare. I risultati, riportati in figura 9, evidenziano una distribuzione omogenea del suono, con livelli variabili da 92,4 dB(A) (punto più vicino alla sorgente) a 88,7 dB(A) (punto più distante), con una differenza massima di 3,7 dB(A), in linea con le previsioni del progetto.

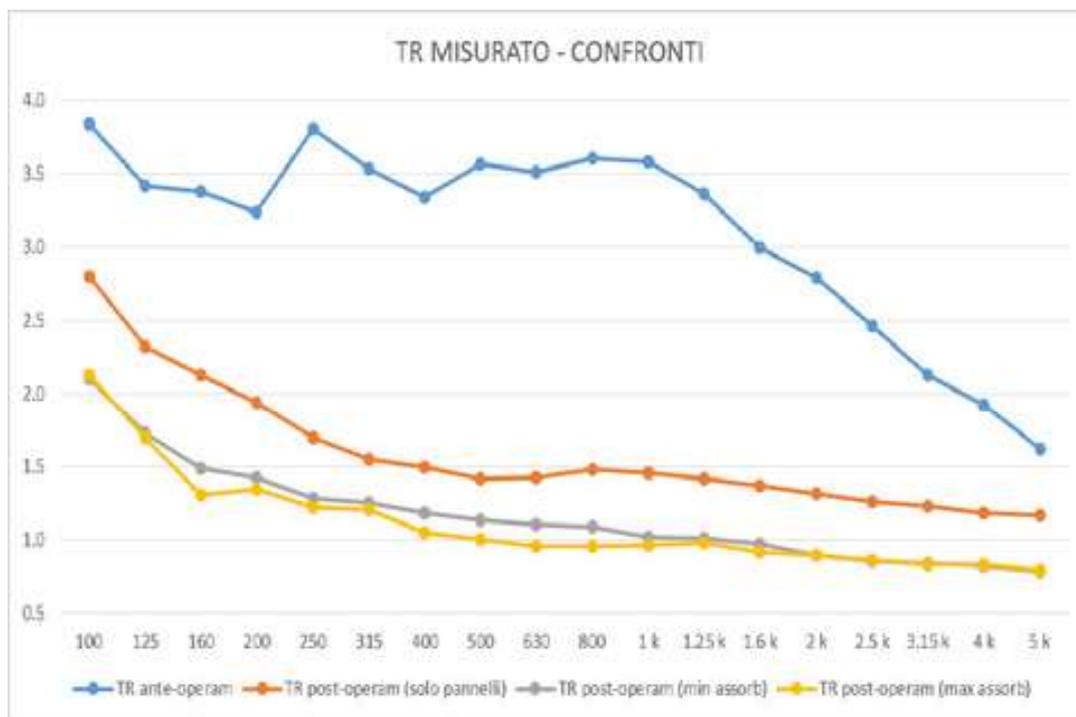


Fig. 2.1.2.A
Confronto dei
valori di TR

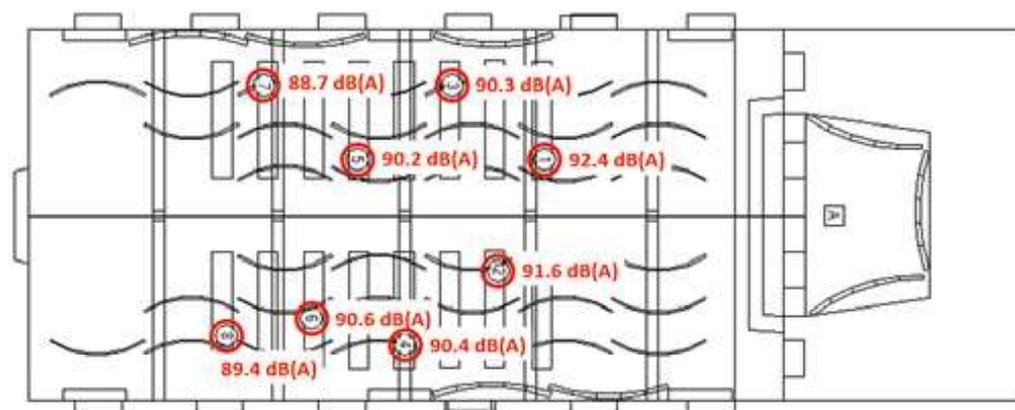


Fig. 2.1.2.8
SPL misurata nei
vari punti dopo
l'intervento

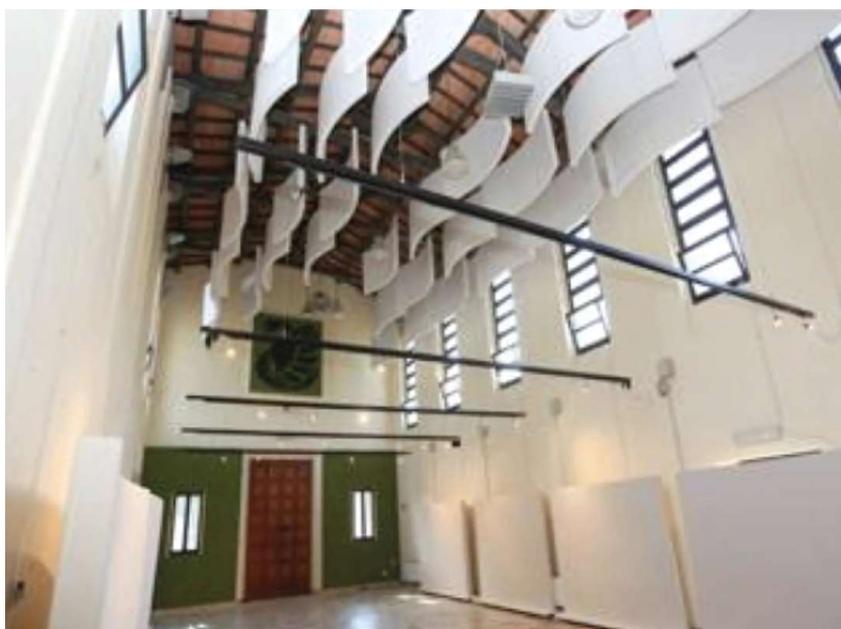
L'inserimento dei pannelli mobili riflettenti/fonoassorbenti ha permesso di diversificare la risposta acustica della sala, adattandola a usi specifici. Questi pannelli possono essere utilizzati anche come divisori per creare sub-aree, ad esempio per workshop simultanei, con attenuazioni fino a 10 dB(A).

Infine, l'auditorium configurato come sala conferenze, evidenziando le tre soluzioni acustiche sostenibili adottate (Bartalucci, C. et al., 2018).

*Fig. 2.1.2.9
Veduta interna della
chiesa post intervento*



*Fig. 2.1.2.10
Veduta interna della
chiesa post intervento*



2.1.3 Correzione acustica della Cattedrale di Benevento con materiali ceramici

La Cattedrale di Benevento, di origini longobarde (VII secolo), ha subito numerosi ampliamenti e trasformazioni nel corso dei secoli, riflettendo vari stili storici e artistici. Distrutta durante la Seconda Guerra Mondiale e successivamente ricostruita, conserva oggi una pianta a cinque navate con pavimenti in marmo e pareti intonacate.

Il grande volume interno (50.000 m^3) e i materiali riflettenti determinano un tempo di riverberazione superiore a 10 secondi, rendendo l'acustica inadatta per parlato ed esecuzioni musicali.

Le misurazioni acustiche della Cattedrale di Benevento sono state eseguite utilizzando una sorgente sonora sferica omnidirezionale posizionata nel presbiterio, vicino all'altare, e 12 punti di misura per i microfoni dislocati nell'area del pubblico, secondo la norma ISO 3382. La sorgente sonora, alimentata con un segnale MLS (Maximum Length Sequence), e le risposte impulsive sono state elaborate con il software Dirac 4.0.

Durante le misurazioni, la chiesa era vuota, con rumore di fondo inferiore a 35 dBA e sedute costituite da sedie rigide. La sorgente sonora era collocata a 1,6 m dal pavimento e i microfoni a 1,3 m. I parametri acustici monaurali analizzati includevano T30, EDT, D50, C80, Ts e C50, con valori medi per bande di ottava da 125 Hz a 4,0 kHz.

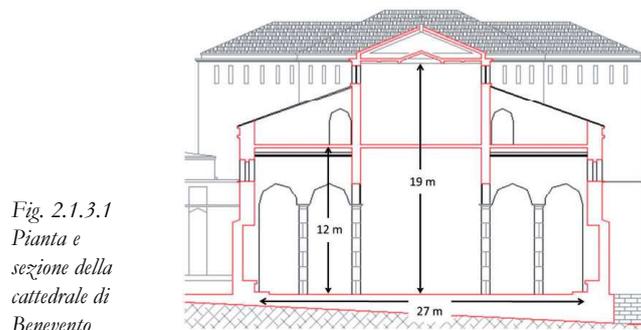


Fig. 2.1.3.1
Pianta e
sezione della
cattedrale di
Benevento

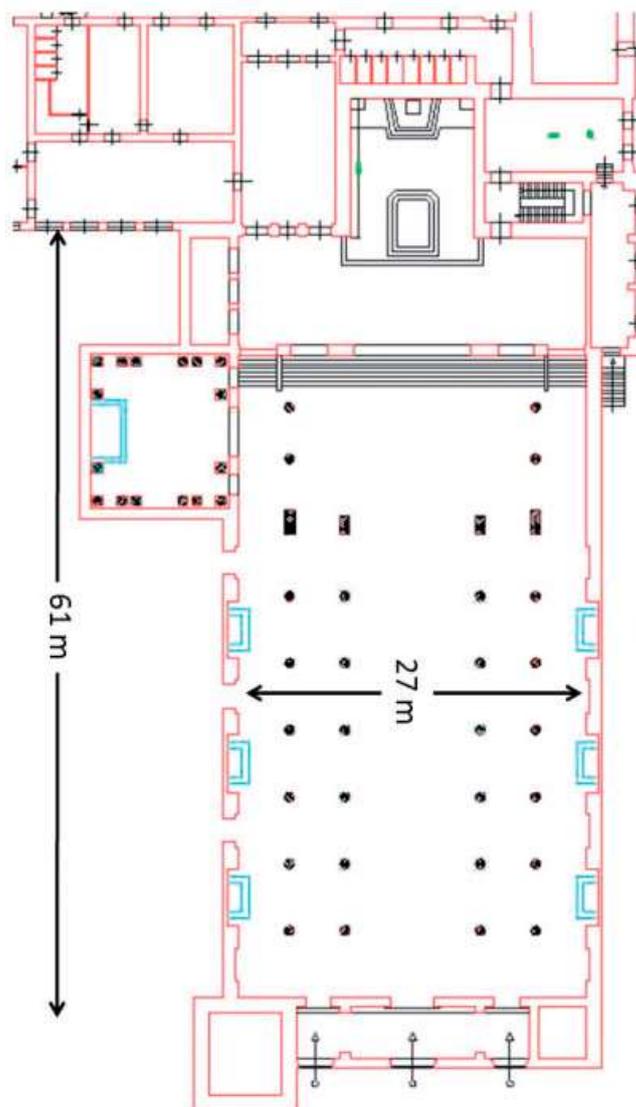
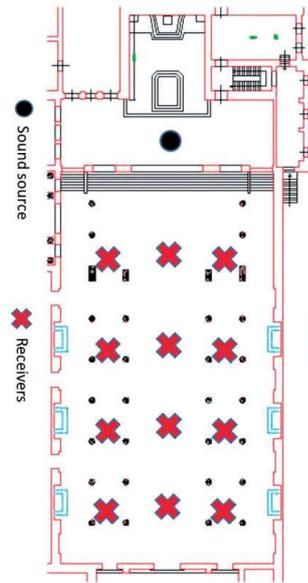


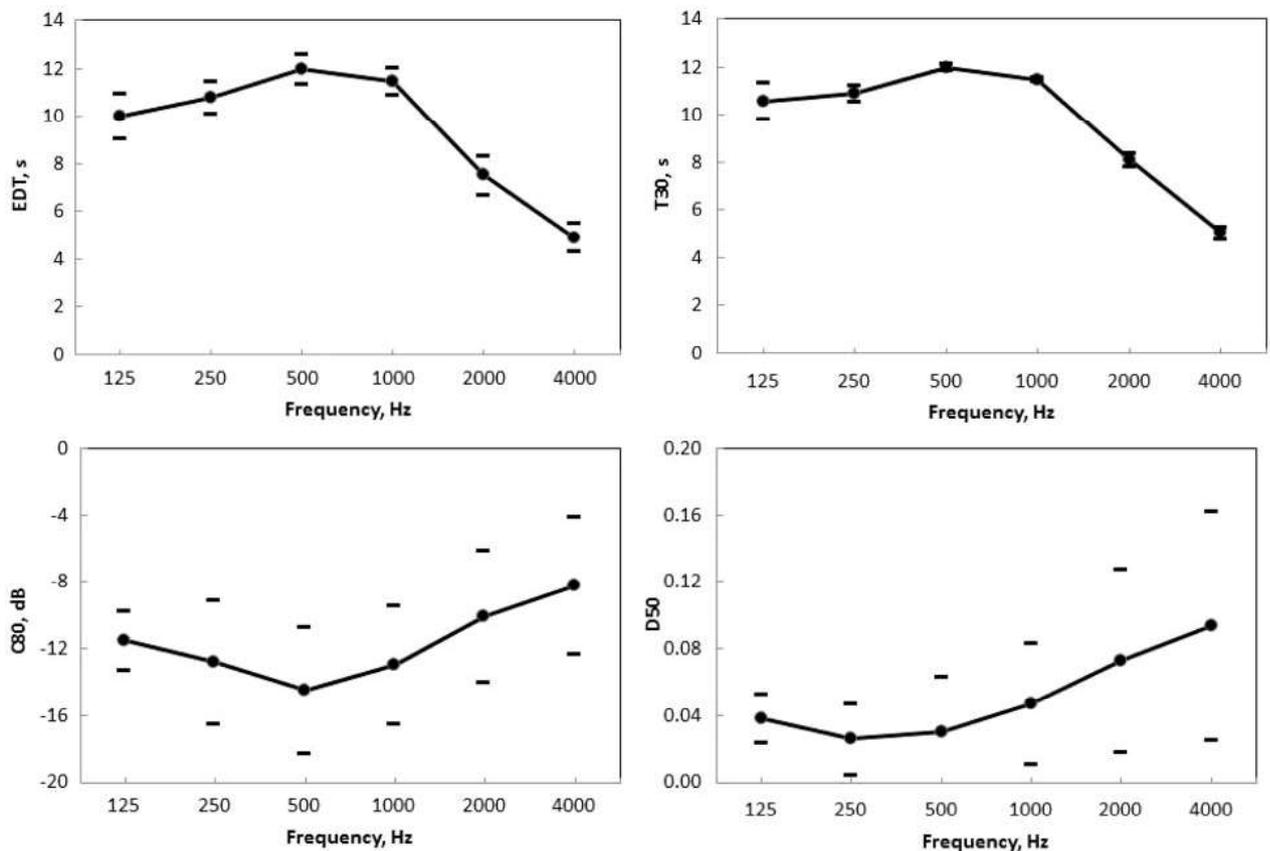
Fig. 2.1.3.2
Pianta della
cattedrale con
posizionamento
di sorgente e
ricevitori



I risultati hanno mostrato un tempo di riverberazione (T_{30}) e un tempo di decadimento iniziale (EDT) superiori a 10 secondi, una chiarezza sonora media (C80) di -10 dB, un D50 medio di 0,06 e un indice di trasmissione del parlato (STI) di 0,21.

Il parametro T_{30} ha mostrato variazioni trascurabili rispetto alla posizione del ricevitore, mentre D50 ha evidenziato un aumento della deviazione standard alle alte frequenze, risultati in linea con quelli riscontrati in altre chiese monumentali.

Fig. 2.1.3.A
Valori medi dei
parametri acustici
misurati



La correzione acustica di grandi spazi storici, come chiese e palazzi, presenta difficoltà nel ridurre componenti sonore a basse e medie frequenze con materiali porosi tradizionali. Per motivi estetici e storici, non è possibile coprire le pareti con pannelli fonoassorbenti convenzionali. La soluzione proposta prevede l'uso di pannelli in ceramica perforata per le basse frequenze e fogli microforati trasparenti per frequenze medie e alte, mantenendo l'aspetto estetico originale.

I pannelli in ceramica, basati sul principio dei risonatori di Helmholtz, assorbono il suono grazie a fori che agiscono come "colli" d'aria, con la massima efficacia a determinate frequenze di risonanza. L'assorbimento dipende dal diametro dei fori, dallo spessore del pannello e dalla distanza dalla parete rigida. Per frequenze superiori a 1 kHz, l'efficacia dei pannelli ceramici diminuisce, rendendo i fogli microforati trasparenti più adatti.

Le misurazioni sono state eseguite secondo la norma EN ISO 10534-2, utilizzando un tubo d'impedenza con un diametro interno di 100 mm, una lunghezza di 560 mm e una distanza di 100 mm tra i microfoni. I risultati mostrano che i pannelli ceramici, con una cavità di 20 cm (spessore di 6 mm, fori di diametro 6 mm e una percentuale di foratura del 32%), offrono un buon assorbimento fino a 1 kHz. Per le frequenze medie e alte, i fogli microforati presentano un coefficiente di assorbimento misurato tra 100 Hz e 2 kHz, come evidenziato dalle curve di assorbimento.

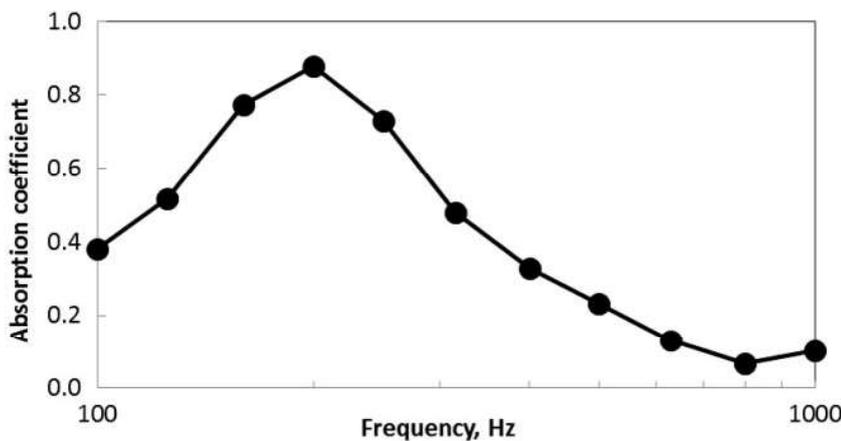


Fig. 2.1.3.B
Coefficiente di assorbimento del campione ceramico con una profondità della cavità di 20 cm (spessore del campione 6 mm, diametro dei fori 6 mm, percentuale di perforazione 32%).

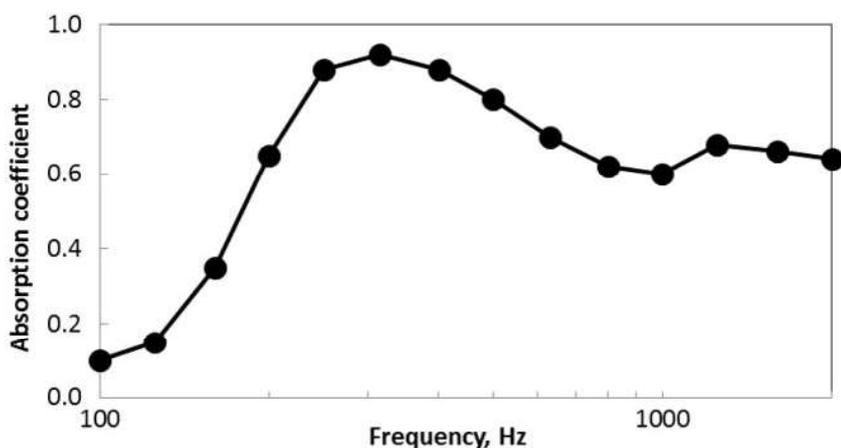


Fig. 2.1.3.C
Valori del coefficiente di assorbimento delle lastre trasparenti micro-perforate misurate a incidenza normale in un intervallo di frequenza da 100 Hz a 2,0 kHz.

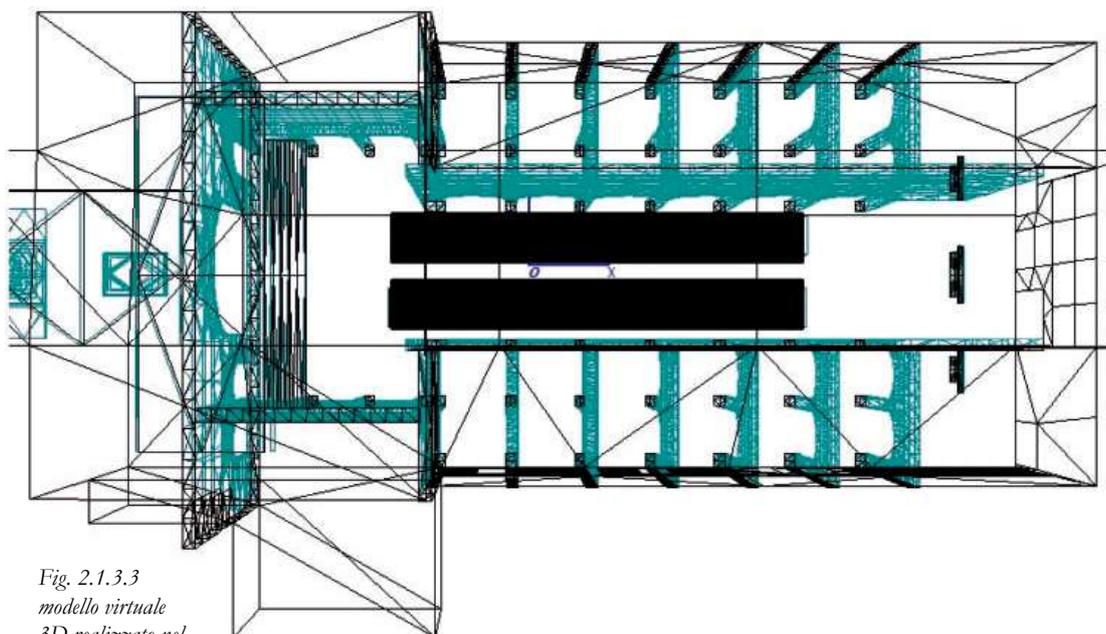


Fig. 2.1.3.3
*modello virtuale
 3D realizzato nel
 software ODEON
 con l'area del pubblico
 corrispondente alla
 zona effettiva coperta
 dalle panche*

Il modello virtuale creato con un software CAD 3D è stato importato nel software Odeon per l'acustica architettonica. La sorgente sonora è stata posizionata sull'altare, mentre i ricevitori sono stati collocati tra i posti a sedere del pubblico. La prima fase del processo è stata la calibrazione del modello acustico, che ha coinvolto l'impostazione dei coefficienti di assorbimento e di diffusione per tutte le superfici del modello virtuale.

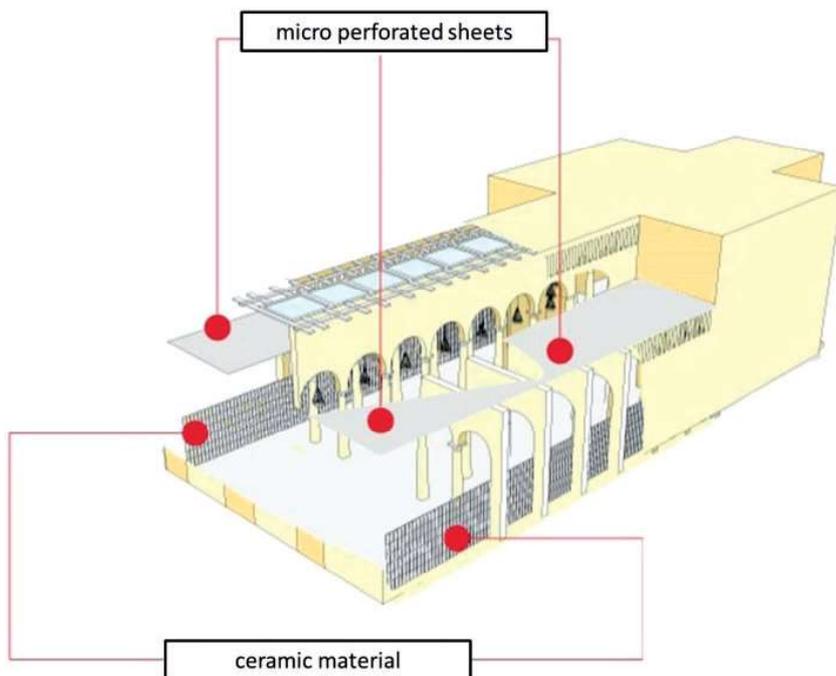
Nel software Odeon, il coefficiente di diffusione (s) non dipende dalla frequenza, ma dalle proprietà geometriche delle superfici. Le sedute vuote sono state simulate come due parallelepipedi, con dimensioni di 0,8 m di altezza, 3,0 m di larghezza e 30 m di lunghezza, a cui sono stati assegnati i coefficienti di assorbimento secondo le fonti di Alvarez-Morales, Martellotta e Cirillo, con un coefficiente di diffusione $s = 0,5$.

Fig. 2.1.3.4
*Valori dei
 coefficienti di
 assorbimento dei
 materiali presenti
 nel modello*

Frequency (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Audience	0.62	0.72	0.80	0.83	0.84	0.85
Walls/ceiling	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03
Floor	0.04	0.03	0.01	0.01	0.01	0.05

La procedura di calibrazione è stata completata quando il tempo di riverberazione (T_{30}) calcolato per ogni banda di frequenza (125 Hz - 4 kHz) corrispondeva a quello misurato. La prima fase di calibrazione ha comportato l'inclusione della presenza del pubblico: ai coefficienti di assorbimento delle superfici delle sedute vuote sono stati aggiunti quelli relativi al pubblico. L'area occupata dal pubblico è di 575 m², corrispondente all'area effettivamente coperta dalle panche.

Per migliorare le caratteristiche acustiche della sala, è stata realizzata una correzione acustica che prevedeva l'uso di materiali diversi per le frequenze basse, medie e alte. Per le basse frequenze, sono stati utilizzati pannelli ceramici perforati, mentre per le frequenze medie e alte sono stati installati pannelli microforati sotto il soffitto delle navate.



*Fig. 2.1.3.5
Disposizione
dei materiali
assorbenti*

Attraverso il software Odeon, sono stati valutati gli effetti dell'uso delle piastrelle ceramiche perforate per l'assorbimento del suono nelle basse frequenze e delle lastre microforate trasparenti per l'assorbimento nelle frequenze medie.

Le caratteristiche storiche e monumentali della chiesa sono state rispettate, mantenendo le pareti laterali lisce e il soffitto, coperto da lastre trasparenti, nell'aspetto originale.

Le misurazioni acustiche della Cattedrale nello stato attuale mostrano un tempo di riverberazione medio di 10 s, con un EDT di 10 s, un valore medio di C80 pari a -12 dB e D50 di 0,04, che indicano una scarsa comprensione del parlato e una non soddisfacente qualità dell'ascolto musicale.

Dopo il Concilio Vaticano II, che ha introdotto una liturgia basata sul messaggio vocale anziché sui canti, gli spazi ecclesiastici hanno dovuto adattarsi a questa nuova esigenza, richiedendo una buona comprensione del parlato. La simulazione numerica mostra che la presenza del pubblico riduce la durata del suono residuo. L'inclusione dei sistemi fonoassorbenti ceramici e l'installazione di lastre microforate migliorano l'acustica per le frequenze basse, medie e alte (125 Hz - 4 kHz).

Nonostante la correzione acustica, il tempo di riverberazione rimane intorno ai 6 secondi, mentre il valore di C80 è compatibile con buone condizioni di ascolto musicale. Tuttavia, l'acustica dello spazio non è ideale per tutti i tipi di musica, ma adatta a determinati stili musicali e strumenti (Iannace, G., 2016).

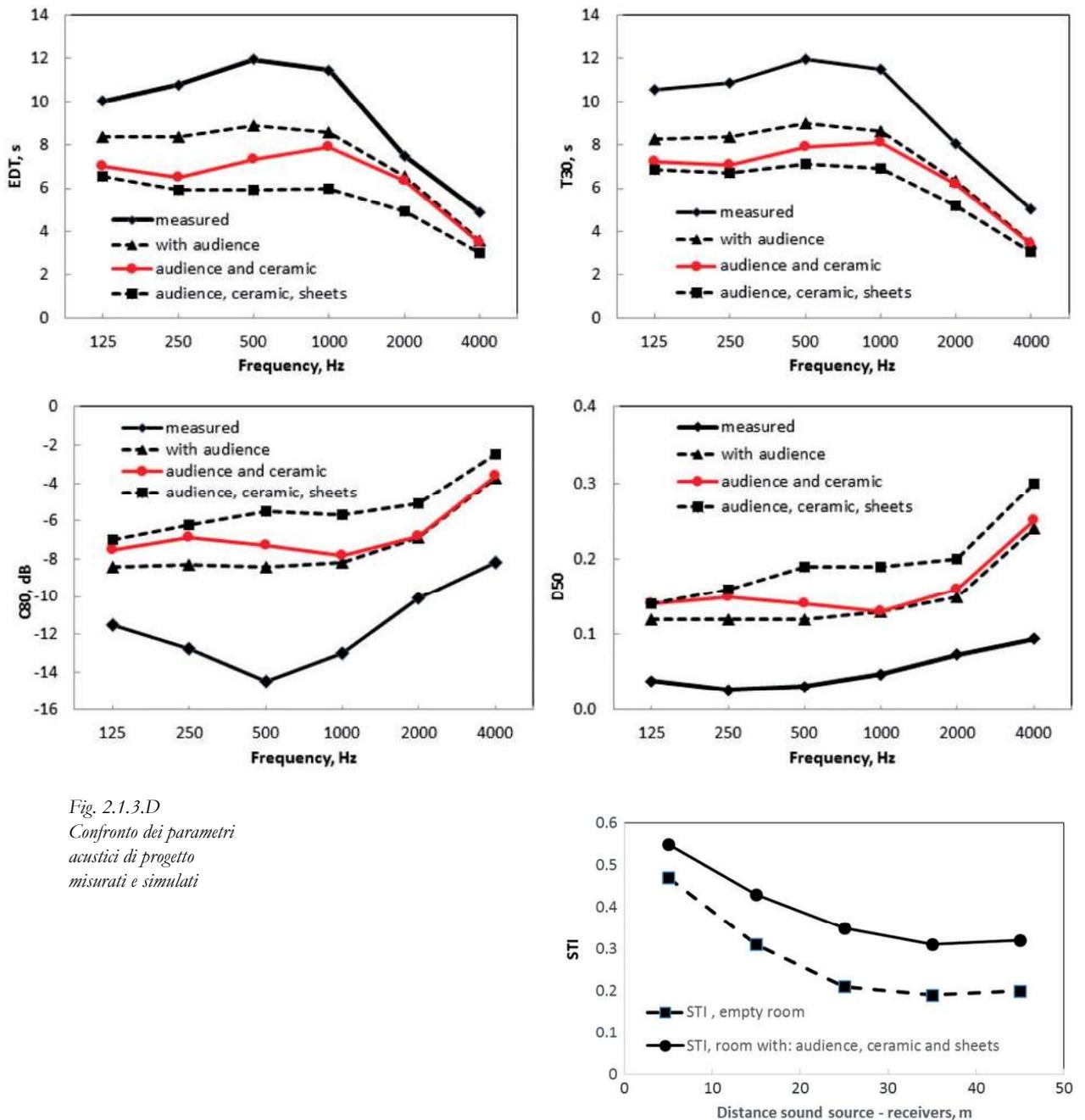


Fig. 2.1.3.D
 Confronto dei parametri
 acustici di progetto
 misurati e simulati

Bibliografia

Bartalucci, C., Borchi, F., Carfagni, M. (2018) The Acoustic Design And Requalification Of An Auditorium In A Church And Of A Historical Theater. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering

Ermann, M. (2015). Architectural Acoustic Illustrated. John Wiley & Sons, Inc.

Iannace, G. (2016). Acoustic correction of monumental churches with ceramic material: The case of the Cathedral of Benevento (Italy). Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, Vol. 35(3) 230–239

Iannace, G., Ciaburro, G., Trematerra, A., Foglia, C. (2019). Acoustic Correction Of A Reinassance Hall. Canadian Acoustics, Vol 47 (2) 57-66

Caso Studio 4

4.1 Il Palazzo Collegio dei Nobili: storia e contesto.

4.1.1 Storia dell'Accademia delle Scienze e del Museo Egizio

La Reale Accademia delle Scienze di Torino, fondata nel 1783 per volontà di Vittorio Amedeo III, ha avuto un ruolo centrale nello sviluppo della scienza e della cultura in Piemonte e in Italia. La sua istituzione rispondeva alla volontà del monarca di promuovere il progresso scientifico e di orientarlo a beneficio della società, come recitava il motto scelto dai suoi Soci, “Veritas et utilitas.” La sua sede storica, il Palazzo dell'Accademia delle Scienze, si trova in un edificio settecentesco che inizialmente ospitava il Collegio dei Nobili, una scuola per giovani membri della nobiltà sabauda. La costruzione del palazzo ebbe inizio nel 1679 sotto la direzione dell'architetto Michelangelo Garove, e fu completata nel 1687.

A partire dal 1787, il Palazzo ospitò la sede dell'Accademia, che fino ad allora aveva operato senza un luogo fisico definito.

Nel corso del XIX secolo, l'Accademia si adattò ai cambiamenti politici e sociali. Nel 1815, con la riforma francese, fu trasformata dalla Classe di Lettres et Beaux Arts alla Classe di Scienze morali, storiche e filologiche, ampliando il suo raggio d'azione. Dopo la restaurazione sabauda e l'Unità d'Italia, l'Accademia mantenne il suo legame con lo Stato, svolgendo un ruolo di consulenza scientifica e istituzionale, come nel caso della supervisione, a partire dal 1823, del Museo Egizio di Torino.

Il Museo, che aveva aperto al pubblico nel 1832, condivise gli spazi con l'Accademia, e nel corso del tempo fu ampliato e arricchito da scavi archeologici condotti in Egitto da Ernesto Schiaparelli e Giulio Farina, che tra il 1903 e il 1937 portarono a Torino circa 30.000 reperti.



Fig 4.1.1.1
Primo allestimento della
Collezione Drovetti
disegno a penna e
acquerello di Marco
Nicolosno, 1832
www.museoegizio.it



Fig 4.1.1.2
Emblema storico
dell'Accademia delle Scienze
di Torino
www.accademiadelle scienze.it

Il periodo fascista, che iniziò nel 1922, segnò un cambiamento radicale per l'Accademia, imponendo modifiche al suo statuto e limitando la sua autonomia. L'Accademia dovette adeguarsi alle leggi del regime, e nel 1934 i suoi membri furono obbligati a giurare fedeltà al fascismo, con conseguenti espulsioni di coloro che si opposero, come gli storici Gaetano De Sanctis e Lionello Venturi. Dopo la fine del regime, nel 1948, l'Accademia adottò un nuovo statuto che ripristinò la propria indipendenza e autonomia.

Nel corso del XX secolo, l'Accademia continuò ad evolversi, diventando sempre più un punto di riferimento per la cultura scientifica internazionale.

Nel 1983, iniziarono lavori di restauro sul Palazzo che continuarono nei decenni successivi, con un significativo intervento nel 2000, quando l'Accademia acquisì personalità giuridica privata. Nel 2005, venne digitalizzato e reso accessibile online il catalogo dell'Accademia. Grazie anche al sostegno della Fondazione Compagnia di San Paolo, nel 2017 furono completati i lavori di ristrutturazione, che interessarono i sette piani del Palazzo.

Dal 2013, l'Accademia ha intensificato le sue attività di valorizzazione con mostre temporanee, ampliando inoltre il proprio impegno nel settore educativo attraverso laboratori didattici e percorsi formativi per insegnanti e la sua sede, che ospita anche il Museo Egizio e ha visto passare al suo interno importanti istituzioni come la Galleria Sabauda fino al 2012, è un esempio di come tradizione e innovazione possano convivere in un contesto di valorizzazione della cultura e della scienza. (www.museoegizio.it) (www.accademiadelle scienze.it)

4.1.2 Il Palazzo Collegio dei Nobili

Il Palazzo dell'Accademia delle Scienze è un imponente edificio seicentesco di Torino con una superficie di 60.594 m².

La sua facciata campeggia sull'omonima via, mentre un fianco delimita il lato sud-ovest di piazza Carignano.

La sua costruzione venne iniziata il 24 giugno 1679 sotto la direzione di Michelangelo Garove, che terminò i lavori nel 1687, dopo aver approntato un discreto numero di modifiche al progetto originale.

Nel progetto originale del gesuita Carlo Maurizio Vota l'edificio doveva occupare ben tre isolati sino a piazza Castello grazie ad un sistema di passaggi sotterranei che, però, non vennero mai realizzati.

Per lungo tempo l'idea progettuale è stata attribuita a Guarino Guarini, ma recentemente gli storici dell'arte di fronte alla mancanza di disegni dell'architetto teatino, a complesse vicissitudini dei primi anni di costruzione e all'impegno che Guarini ebbe in quegli stessi anni nel cantiere del limitrofo palazzo Carignano, sono portati a ritenere il suo ruolo in merito del tutto marginale.

Il palazzo, destinato ad ospitare il Collegio dei Nobili (un collegio per i giovani rampolli della nobiltà piemontese), nel 1787, per Rescritto sovrano di Vittorio Amedeo III di Savoia, Re di Sardegna, divenne la sede dell'Accademia Reale delle Scienze.



Fig 4.2.1.1
Inquadramento
territoriale del Palazzo
Collegio dei Nobili

La struttura dell'edificio era inizialmente con una pianta a forma di ferro di cavallo, con un avancorpo centrale fiancheggiato da due ali. Il palazzo avrebbe dovuto svilupparsi con tre piani fuori terra e un piano interrato. Per carenze di fondi, però, la costruzione dell'ala rivolta verso Piazza Carignano venne sospesa al primo piano e tale rimase per tutto il Settecento.

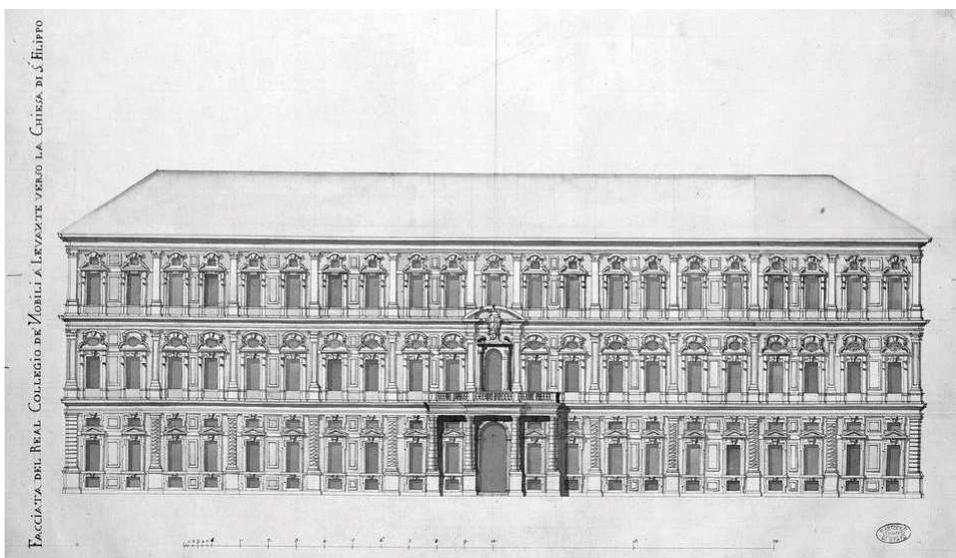


Fig 4.2.1.2 Prospetto di Via
Accademia delle Scienze del
Palazzo Collegio dei Nobili
[https://archiviodistatorino.
beniculturali.it/](https://archiviodistatorino.beniculturali.it/)

A partire dal 1789 venne edificato sull'angolo sud dell'edificio una specola da destinare inizialmente a osservatorio astronomico e in seguito meteorologico. La specola fu abbattuta durante la Seconda Guerra Mondiale e non fu più ricostruita.

Il portale di ingresso venne modificato nell'Ottocento in occasione dell'apertura del Museo Egizio con la creazione di una balconata di stile neoclassico progettata da Giuseppe Maria Talucchi.

Il palazzo, che continua ad essere la sede dell'Accademia delle Scienze di Torino, ospita il Museo Egizio dal 1824..

Sotto la direzione dell'architetto Mino Turvani e dell'ingegnere Fabio Maglione dello STUDIO ICIS di Torino, e grazie al sostegno della Fondazione Compagnia di San Paolo, i sette piani del palazzo, situati tra Via Maria Vittoria e Via Accademia delle Scienze, furono sottoposti a importanti opere di restauro, rifunzionalizzazione e ammodernamento completati nel 2017. (www.accademiadelle scienze.it)

L'oggetto della tesi è situato all'angolo sud del palazzo: l'attuale Sala Conferenze del Museo Egizio di Torino (Dardanello G., Romano G. 1993)

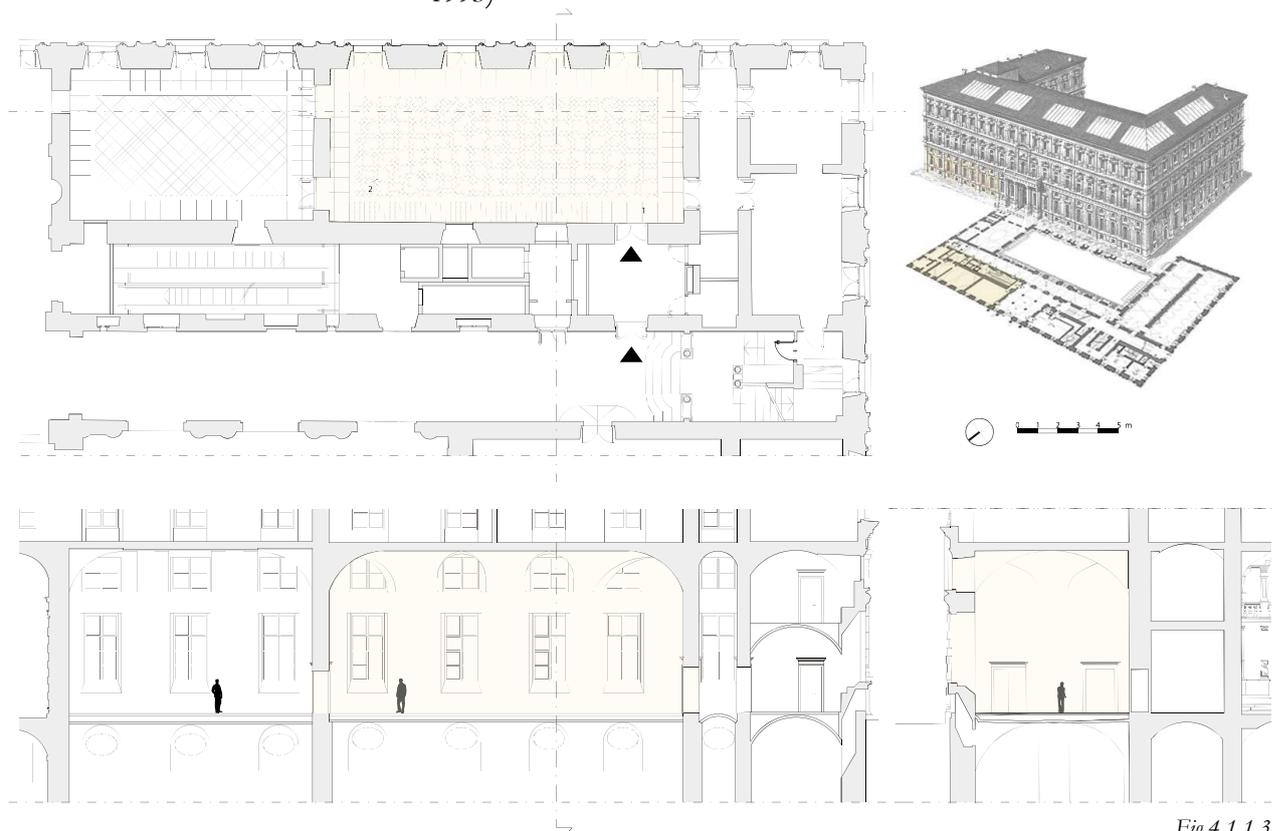
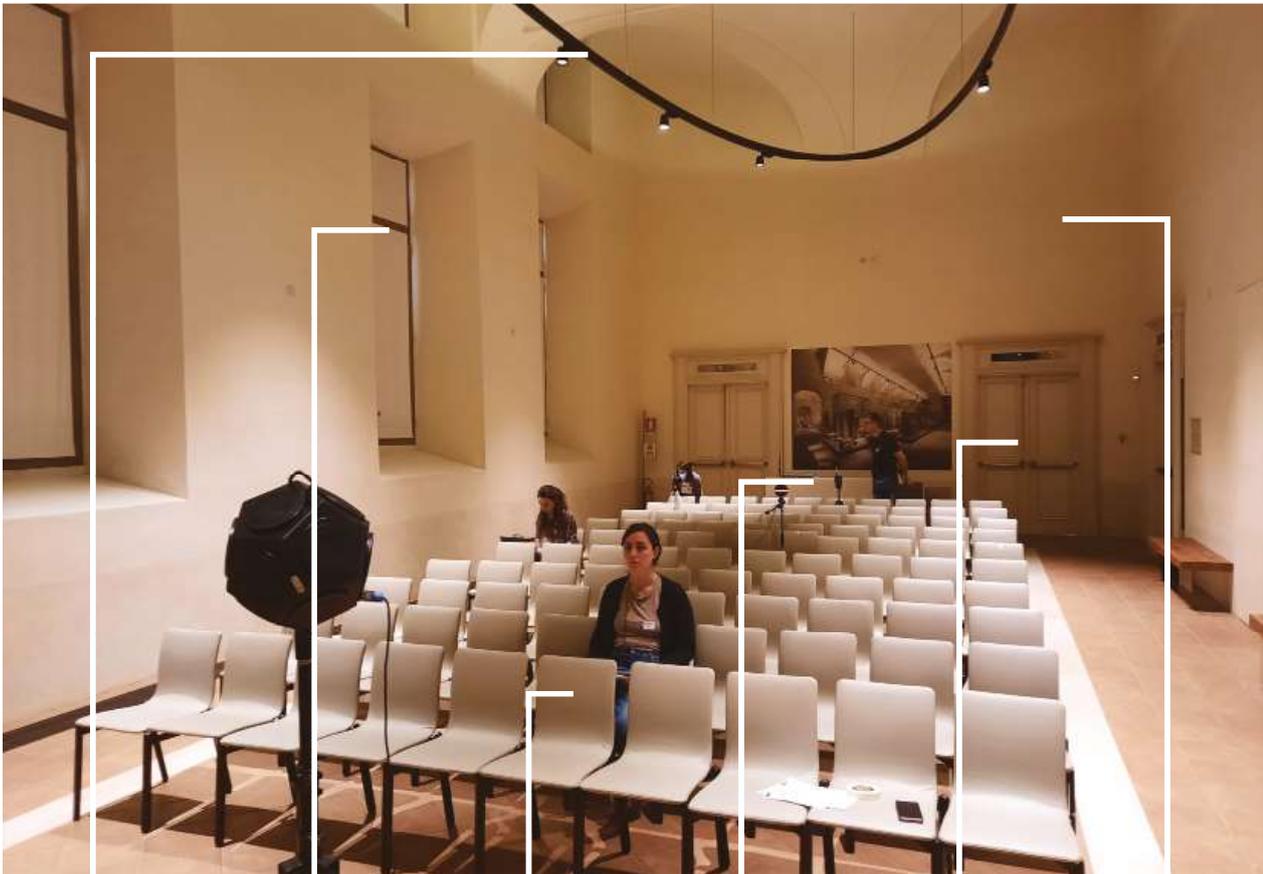


Fig 4.1.1.3
Pianta, sezioni e assonometria
di inquadramento della Sala
Conferenze del Museo Egizio
di Torino

4.2 Stato di fatto: materiali e caratteristiche e criticità geometriche dell'ambiente.

Oggi la sala si presenta restaurata, con un arredamento essenziale alla divulgazione: un palco con scrivania alle cui spalle si trova un telo da proiezione, sedute mobili in platea e due panche laterali, una scrivania sul lato opposto al palco dove troviamo i controlli delle luci montate sulla struttura ellittica sospesa al centro della sala e dell'impianto audio-video. Spicca da subito la forte monocromaticità dell'ambiente, che quasi inganna la percezione dei volumi della sala, data dall'intonaco delle pareti.



Metallo verniciato
struttura luci



Infissi in legno a vetro
singolo



Similpelle e metallo
delle sedute



Legno verniciato
scrivania
controlli



Legno verniciato
su porte e
cornici



Intonaco
sulla volta
e sulle pareti

Si è dunque proceduto alla raccolta delle tipologie dei materiali presenti in sala, al fine di predisporre le simulazioni acustiche e iniziare a definire dei range di caratteristiche fonoassorbenti dei materiali che verranno in seguito definite con precisione sempre maggiore attraverso la calibrazione del modello acustico che verrà trattata nel capitolo seguente.



Intonaco
sulle porte degli
armadi



**Intonaco
acustico**
sulla parete di
fondo



Legno
per palco e
scrivania



Telo
da proiezione



Pavimento
in cotto

4.3 Rilievo architettonico

Il rilievo riveste una funzione determinante in ogni processo conoscitivo, a condizione che vengano definiti quadri metodologici e restitutivi strettamente connessi con gli obiettivi specifici del contesto di applicazione. Il rilievo architettonico, in particolare, è una pratica intrinsecamente soggettiva, poiché dipende dal contesto in cui si svolge, dai metodi impiegati, dalle tempistiche e dagli scopi per cui viene realizzato. Ogni rilievo si configura come un interrogarsi continuo sull'edificio, assumendo di volta in volta un ruolo documentario unico, che non ha mai una conclusione definitiva e "quasi mai completamente esaustivo". (Campanella C., Kirova T., 2000)

Quello che si è eseguito nel caso della Sala Conferenze del Museo Egizio è stato un rilievo metrico 3D ai fini della realizzazione di un modello che offrisse una base geometrica solida per la progettazione parametrica dei baffles, la cui geometria è strettamente dipendente dall'andamento della volta che caratterizza l'ambiente.

Il modello ha inoltre fornito una base altrettanto solida per effettuare la trasposizione a modello acustico facendo emergere tutte le criticità nella ridefinizione del grado di dettaglio ai fini dell'operabilità del software di simulazione acustica, criticità divenute anch'esse oggetto di studio.

4.3.1 Rilievo diretto con metro laser

Inizialmente la sala è stata oggetto di un rilievo metrico diretto al fine di disporre di una documentazione affidabile per la creazione di un sistema di riferimento locale di posizionamento delle strumentazioni per le misure acustiche.

Da queste misure planimetriche ed alcune in elevazione, quali l'altezza delle finestre, le imposte e i colmi delle volte, si è proceduto alla realizzazione di un modello preliminare con cui fare un confronto dei tempi di riverberazione tra quelli misurati, la simulazione preliminare con il software Odeon e i valori ottenuti attraverso il metodo empirico della formula di Sabine.

La necessità di costruire un modello geometricamente accurato al fine di simulare con Odeon gli effetti di riflessione del soffitto voltato ha portato a decidere per la costruzione di un modello con il metodo structure from motion da fotogrammetria.

Le misure dirette si sono rivelate inoltre strumento di confronto nel processo di controllo dei dati raccolti con il metodo fotogrammetrico.

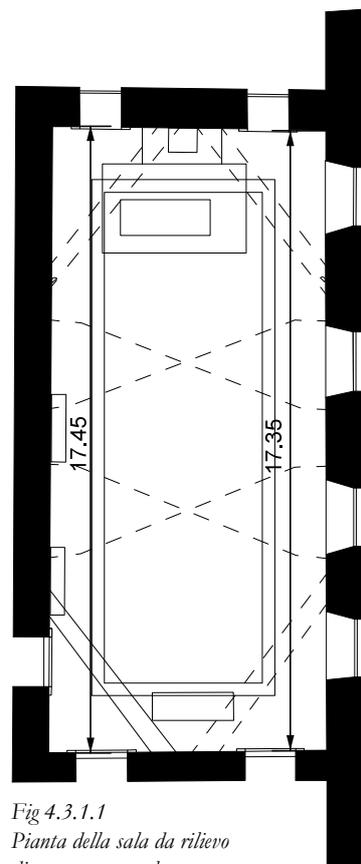


Fig 4.3.1.1
Pianta della sala da rilievo
diretto con metro laser

4.3.2 Rilievo fotogrammetrico: raccolta ed elaborazione dei dati

4.3.2.1 Fotogrammetria e Structure from Motion (SfM) per la modellazione 3D

La fotogrammetria è una tecnica di rilievo tridimensionale che si basa sull'analisi e l'elaborazione di immagini fotografiche di un oggetto o di un'area da rilevare. Può essere applicata in diversi ambiti, tra cui: fotogrammetria terrestre, in cui la fotocamera è posizionata direttamente sul terreno, e fotogrammetria aerea, anche nota come aerofotogrammetria, dove la fotocamera è montata su un aeromobile.

Oggi, la fotogrammetria è ampiamente utilizzata nei rilievi architettonici, avendo progressivamente affiancato ed in parte sostituito il rilievo topografico tradizionale. Quest'ultimo si basava sulla misurazione manuale di punti caratteristici del terreno o dell'edificio, successivamente elaborati tramite metodi analitici per ottenere una rappresentazione accurata. (Hanke K., Grussenmeyer, 2002)

I suoi primi sviluppi risalgono al 1851, quando Aimé Laussedat, considerato il pioniere della disciplina, iniziò a sperimentare la misurazione su immagini fotografiche. Tuttavia, i primi tentativi erano limitati dalle distorsioni ottiche causate dagli obiettivi non ancora perfezionati dell'epoca.

Nel 1865, l'ingegnere Ignazio Porro contribuì significativamente a migliorare la precisione di questa tecnica, introducendo il fotogoniometro, un dispositivo in grado di misurare gli angoli tra il centro dell'obiettivo e i punti dell'oggetto fotografato. Questo strumento rappresentò un importante passo avanti nella riduzione degli errori nelle misurazioni fotogrammetriche.

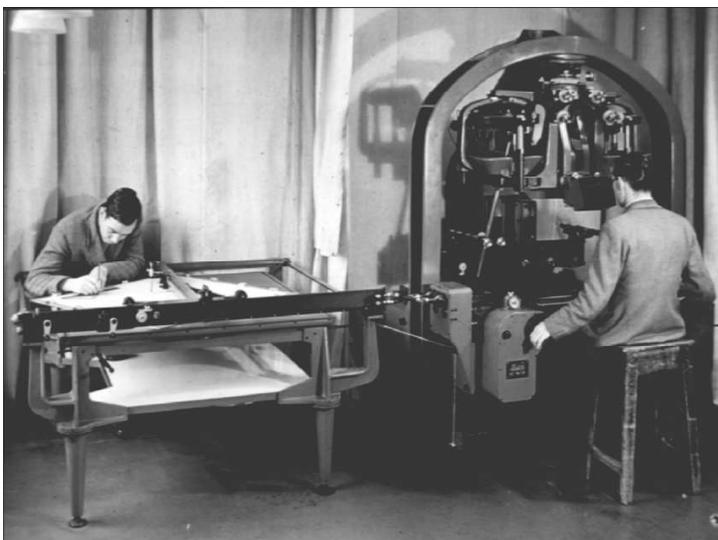
Grazie a queste innovazioni, Eduard Von Orel fu in grado di progettare lo stereoautografo, il primo dispositivo per la restituzione analogica dei dati fotogrammetrici.

Questo strumento rappresentò un passo fondamentale nella storia della fotogrammetria, permettendo una traduzione diretta e accurata delle immagini fotografiche in disegni tridimensionali: con esso era possibile eseguire misurazioni direttamente sui fotogrammi e trasmettere meccanicamente le istruzioni a un pantografo, che replicava automaticamente le misurazioni. Questo processo permetteva di evitare la fase analitica per ogni rilevamento, semplificando notevolmente il lavoro e migliorando l'efficienza della restituzione tridimensionale. (Scovazzo, 2020)

Fig 4.3.2.1.1
Fotogoniometro
<https://www.lombardiabeniculturali.it/scienza-tecnologia/schede/ST060-00145/>



Fig 4.3.2.1.2
Stereoautografo
https://www.researchgate.net/figure/The-Wild-A5-autograph_fig2_229038771



Il procedimento alla base della Sfm è proprio la **Stereografia**.

Se la geometria di un oggetto è completamente sconosciuta, la restituzione tridimensionale a partire da un'unica immagine risulta impossibile. In tal caso, è necessario utilizzare almeno due immagini. Secondo il principio stereografico, una coppia di "immagini stereo" può essere visualizzata insieme, creando un'impressione spaziale (stereoscopica) dell'oggetto. Questo effetto può essere utilizzato per ottenere una restituzione 3D, ad esempio, delle facciate.

Utilizzando coppie stereo di immagini, è possibile ricostruire forme arbitrarie di una geometria tridimensionale, a condizione che l'area di interesse sia visibile in entrambe le immagini.



Fig 4.3.2.1.4
Stereoscopio modello H60,
www.raig.it



Fig 4.3.2.1.4
Stereografia di un uomo che raffredda una cassaforte tra le rovine dopo l'incendio di Chicago del 1871, <https://www.meisterdrucke.it/>

La Structure-from-Motion (SfM) si basa sugli stessi concetti fondamentali della fotogrammetria stereoscopica, in quanto permette di ricostruire una struttura tridimensionale da una serie di immagini sovrapposte e disallineate. Tuttavia, si distingue dalla fotogrammetria tradizionale in quanto la geometria della scena, la posizione e l'orientamento della fotocamera vengono determinati automaticamente, senza la stretta necessità di utilizzare una rete di target con coordinate 3D già note, se si hanno misure di controllo dirette. Questi parametri vengono infatti stimati simultaneamente attraverso un processo iterativo di "bundle adjustment".

Questo approccio risulta particolarmente adatto per l'elaborazione di serie di immagini con una forte sovrapposizione, che consentono di catturare la struttura tridimensionale di una scena da diverse angolazioni, o per immagini derivate da sensori in movimento. Sebbene sviluppata negli anni '90, la tecnica ha le sue radici nel campo della computer vision e nell'evoluzione degli algoritmi per la ricerca automatica della corrispondenza delle immagini.

Il metodo è diventato popolare grazie alla riduzione dei costi delle fotocamere, la possibilità di processare i dati su computer consumer e l'automazione dei processi, con una notevole conseguente semplificazione.

Tuttavia, le n uvole di punti risultanti devono essere trasformati in un sistema di coordinate reali. Per farlo, si utilizzano punti di controllo (GCP) con coordinate note, spesso ottenute tramite tecniche topografiche tradizionali sul campo. In alternativa, è utile collocare obiettivi fisici ad alto contrasto, che facilitano il processo di trasformazione delle coordinate e migliorano la distribuzione della rete di punti di controllo, essenziale per la coerenza spaziale del modello SfM finale. (Westoby M.J. et al., 2012)

4.3.2.2 Acquisizione dei dati

L'acquisizione dei dati fotografici è stata condotta con due fotocamere ed un drone



Fig 4.3.2.2.1
Panasonic Lumix DMC-GH4
www.panasonic.com

Panasonic Lumix DMC-GH4

Fotocamera mirrorless digitale a obiettivo singolo

(www.panasonic.com)

Risoluzione effettiva: 16,05 Mp

Obiettivo utilizzato: Olympus M.Zuiko

Digital 17mm f/1.8

Pixel Pitch: 3,74 μm

Focale Obiettivo: 17 mm

File acquisiti: 307 JPEG



Olympus
M.Zuiko
Digital
17mm
f/1.8



Fig 4.3.2.2.2
Canon EOS 5DS R
www.canon.it

Canon EOS 5DS R

Fotocamera reflex digitale a obiettivo singolo

(www.canon.it)

Risoluzione effettiva: 50,6 Mp

Obiettivo utilizzato:

Pixel Pitch: 4.14 μm

Focale Obiettivo:

File acquisiti: 128 JPEG



Fig 4.3.2.2.3
Parrot Anafi
www.drones.nl

Parrot Anafi

Drone con sensore SONY 1/2 4" CMOS

(www.parrot.com)

Risoluzione: Wide: 21Mp Rectilinear: 16 Mp

Obiettivo utilizzato: integrato

Pixel Pitch: 1.2 μm

Focale Obiettivo: 4.35 mm (35 mm full frame)

File acquisiti: 179 JPEG

Con le due fotocamere si è proceduto alla documentazione dei muri perimetrali, della volta da terra e dell'arredo fisso quale il palco, la scrivania, le panchine sulla parete nord-ovest e la scrivania con i comandi in fondo alla sala.

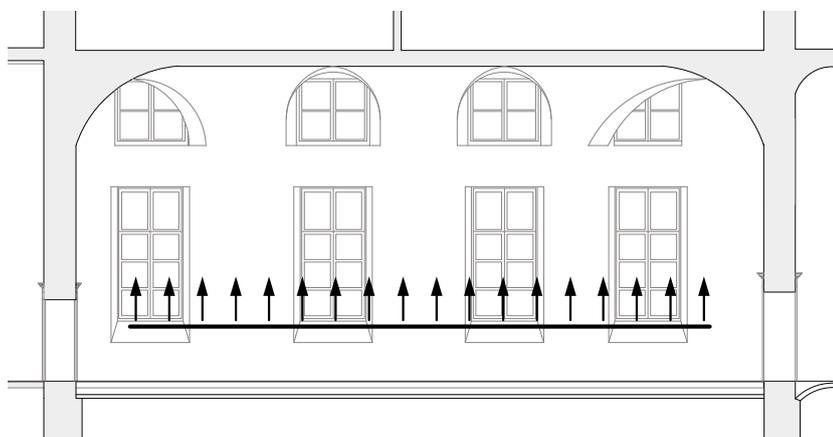


Fig. 4.3.2.2.4
Sezione longitudinale e pianta con schema di posizionamento e direzione della camera per il Set di immagini riguardante i muri perimetrali della sala

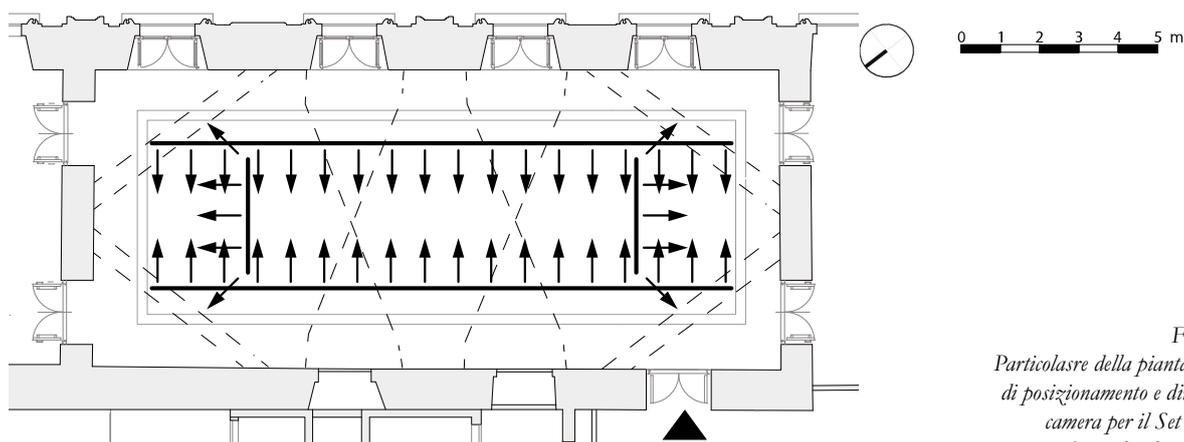
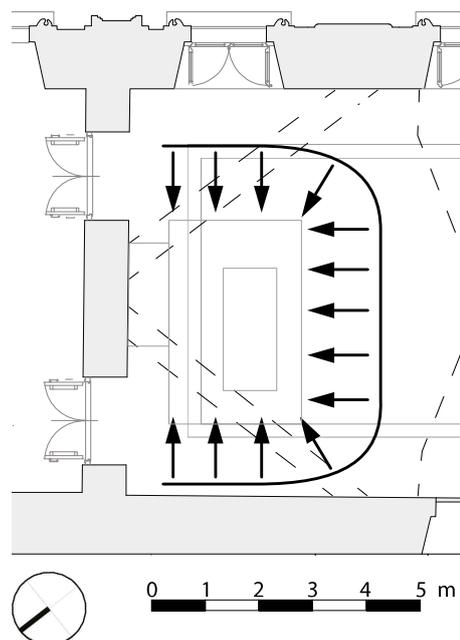


Fig. 4.3.2.2.5
Particolare della pianta con schema di posizionamento e direzione della camera per il Set di immagini riguardante il palco e la scrivania della sala.

Per la scansione di oggetti a distanza ravvicinata, è importante seguire alcune linee guida per garantire la qualità dei dati raccolti. In primo luogo, è preferibile scattare più foto di quante siano strettamente necessarie, piuttosto che rischiare di avere un numero insufficiente. Inoltre, bisogna ridurre al minimo le “zone cieche”, poiché si può ricostruire correttamente la geometria solo se visibile da almeno due fotocamere.

È anche essenziale che ogni fotografia utilizzi al meglio lo spazio del fotogramma, facendo sì che l'oggetto di interesse occupi la maggior parte dell'area. In alcuni casi, può essere utile orientare la fotocamera in modalità ritratto per ottimizzare l'inquadratura.

Non è necessario cercare di includere l'intero oggetto nel fotogramma, a condizione che le parti mancanti siano catturate in altre immagini. (Agisoft LLC., 2023)



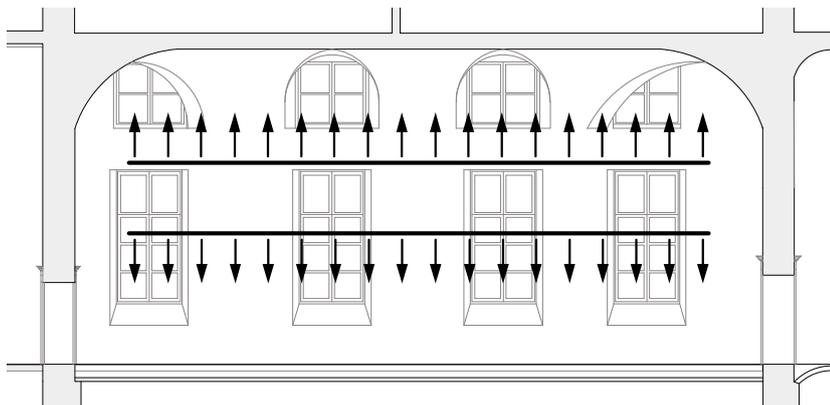
I muri perimetrali sono stati fotografati con una sovrapposizione superiore all'80% dell'immagine al fine di offrire una base di lavoro efficace per il riconoscimento dei punti omologhi da parte del software Metashape, infatti per un progetto di fotogrammetria terrestre applicata a strutture architettoniche, è generalmente raccomandata una sovrapposizione di immagini pari al 70-80% lungo il percorso di acquisizione e al 60-80% lateralmente, in base alla complessità dell'edificio e alla precisione richiesta. (Moyano et al., 2020)

Questo permetterà di acquisire correttamente le immagini sulle quali si applicherà il processo fotogrammetrico.



*Sovrapposizione
di foto della parete
sud-est scattate con la
fotocamera
Canon EOS 5DS R*

La porzione della volta, caratterizzata da una particolare omogeneità cromatica dovuta alla direzionalità dell'illuminazione, così come quella del pavimento sono state rilevate con l'ausilio del drone Anafi, in grado di offrire una procedura operativa più celere mantenendo l'ortogonalità dell'inquadratura ai piani di riferimento e riducendo la distanza drone-oggetto.



*Fig 4.3.2.2.6
Sezione longitudinale con
schema di posizionamento
e direzione della
camera per il Set di im-
magini riguardante i muri
perimetrali della sala*

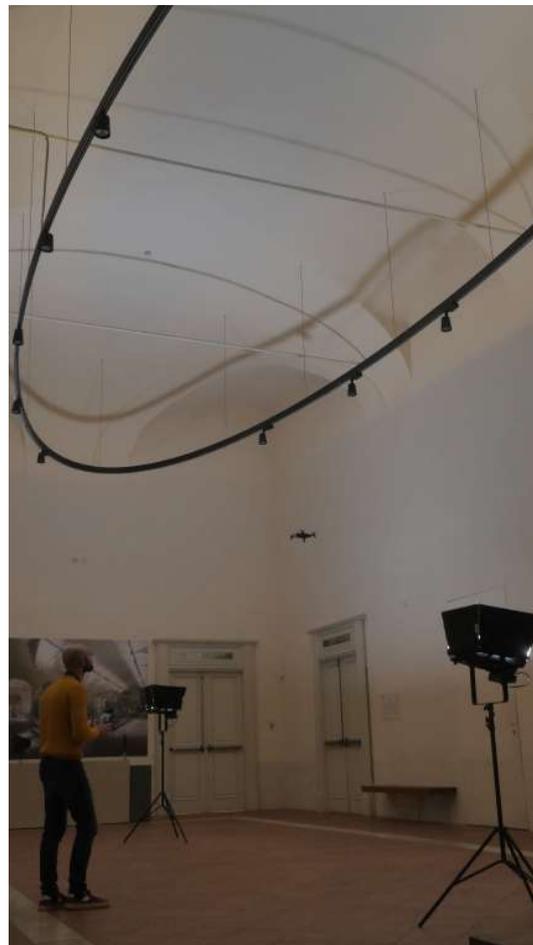
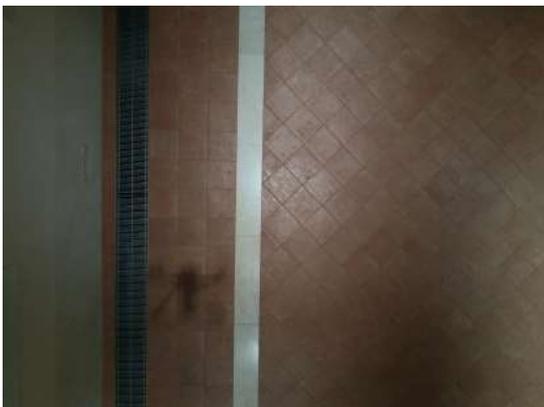
0 1 2 3 4 5 m

A causa della posizione e della struttura che ospita l'illuminazione, e della direzionalità di quest'ultima, si è dovuto procedere con l'apposizione di due fari per illuminarne la superficie.



Fig 4.3.2.2.5 Foto della volta scattata con Parrot Anafi

Fig 4.3.2.2.6 Foto del pavimento scattata con Parrot Anafi

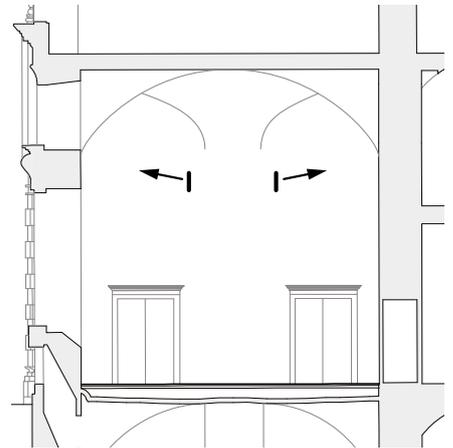


*Fig 4.3.2.2.7
Parrot Anafi
in volo con
l'operatore,
ricercatore
Lorenzo
Teppati Los*

Si è inoltre proceduto nel fotografare anche la porzione delle finestre in corrispondenza delle unghiate della volta e la porzione di quest'ultima all'altezza delle imposte, questa volta con la possibilità di avere un'inquadratura quanto più ortogonale possibile, tenendo conto dell'impedimento dato dalla struttura per l'illuminazione

*Fig 4.3.2.2.8
Sezione trasversale con schema
di posizionamento e direzione
della camera per il Set di
immagini riguardante i muri
perimetrali della sala*

0 1 2 3 4 5 m



*Fig 4.3.2.2.9
Foto della finestra
nell'unghiate della
volta scattata con
Parrot Anafi*



*Fig 4.3.2.2.10
Foto della finestra
nell'unghiate della
volta scattata con
Parrot Anafi*

4.3.2.3 Elaborazione dei dati acquisiti

Si è quindi iniziato con la selezione delle foto, scartando quelle che non costituivano patrimonio informativo, ed il loro caricamento nel software.

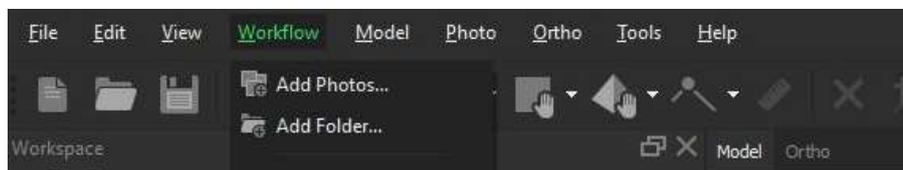


Fig 4.3.2.3.1
Schermata dello spazio di lavoro Metashape, caricamento delle foto con il comando "Workflow/ Add Photos"

Avviato il processo di orientamento e allineamento, il programma riconosce i punti di legame di ogni foto e li ricerca nelle altre.

Quando questi punti vengono individuati in modo omologo il software ne registra la posizione tridimensionale e il colore, componendo con i punti, ora dotati di coordinate, la nuvola sparsa.

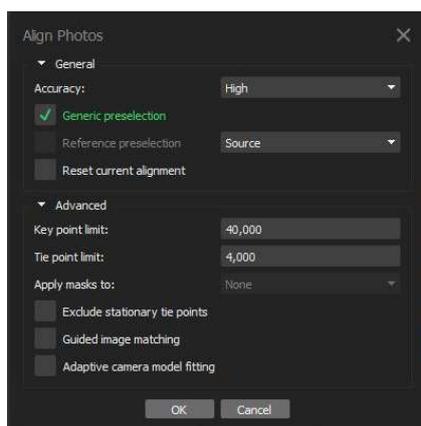
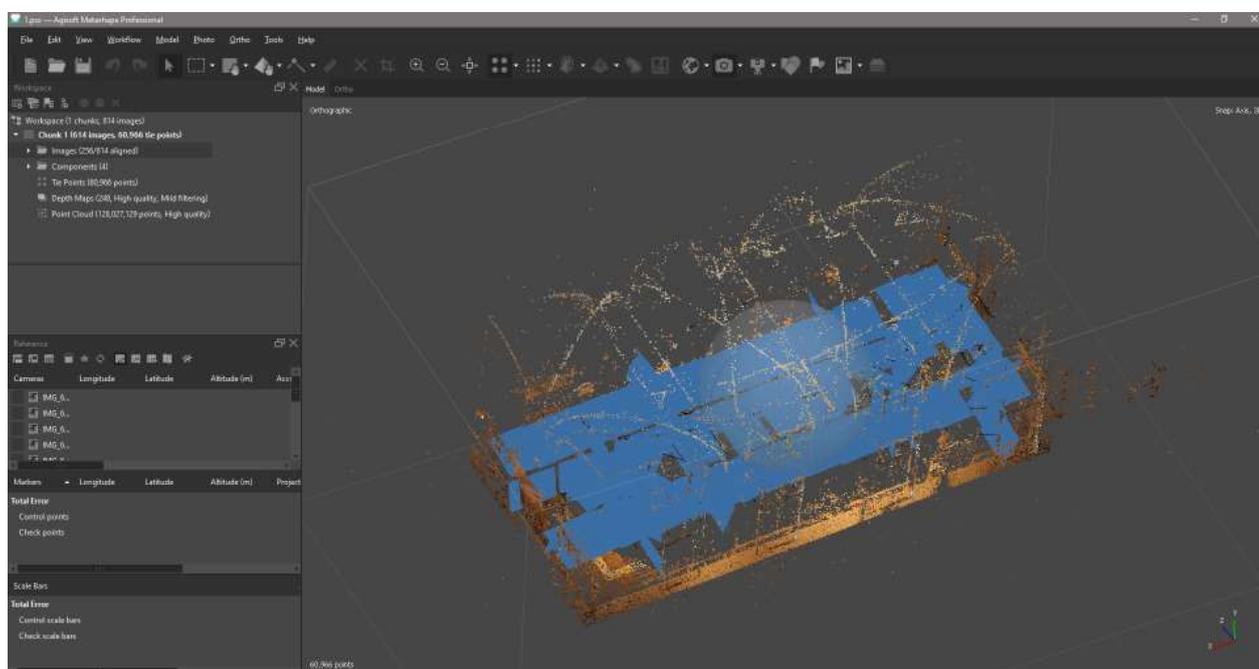


Fig 4.3.2.3.2
Schermata dello spazio di lavoro Metashape, allineamento delle foto con il comando "Align Photos"



Con il comando "Show Cameras" è inoltre possibile vedere l'orientamento delle foto e la posizione da cui esse sono state scattate.

(Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 2.0, 2023)

Fig 4.3.2.3.3
Schermata dello spazio di lavoro Metashape, nuvola di punti sparsa risultante dall'allineamento delle immagini e relativo orientamento mostrato con il comando "Show Cameras"

L'allineamento delle foto, nonostante per un volume di circa 1045 m² siano state selezionate 614 fotografie, non ha dato esiti superiori alle 256/614 foto allineate. Complici l'omogeneità del colore delle superfici e la forte direzionalità di un'illuminazione non ottimale.

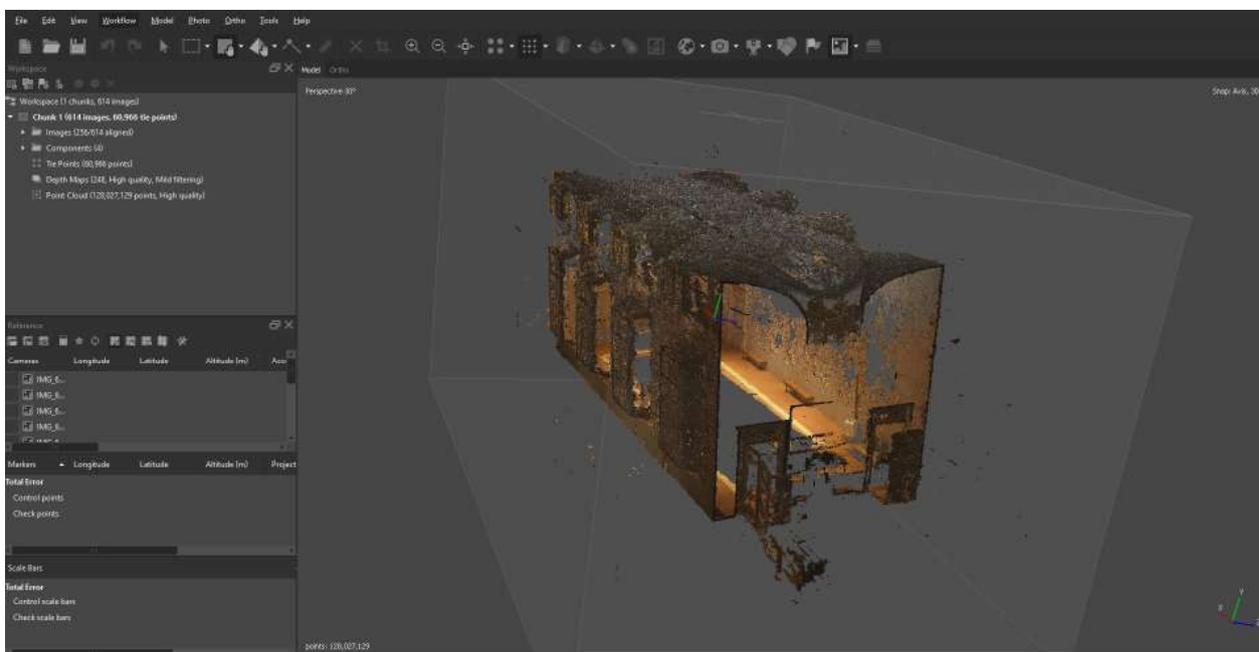


Fig 4.3.2.3.4
Schermata dello spazio di lavoro Metashape, nuvola di punti densa risultante dall'allineamento delle immagini.

Si è quindi proceduto con una semplificazione dell'oggetto suddividendolo in 3 porzioni

- Volta
- Muri perimetrali
- Pavimento

Questa divisione avrebbe conformato la luce dell'ambiente nelle diverse riprese e con le rispettive fotocamere, le cui differenze cromatiche possono essere meglio apprezzate dalle due foto seguenti che ritraggono l'angolo est della sala.

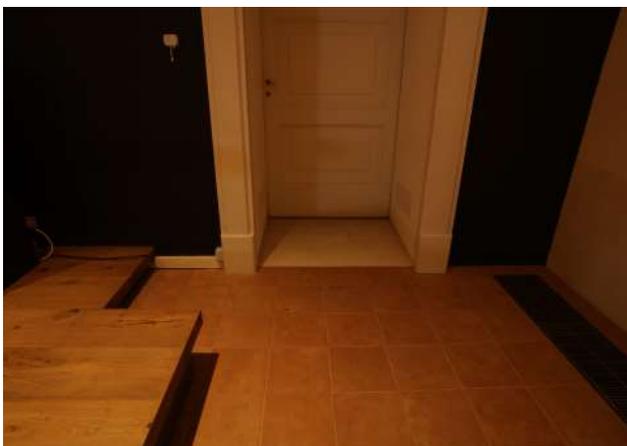


Fig 4.3.2.3.5
Foto dell'angolo est della sala scattata con la fotocamera Canon EOS 5DS R

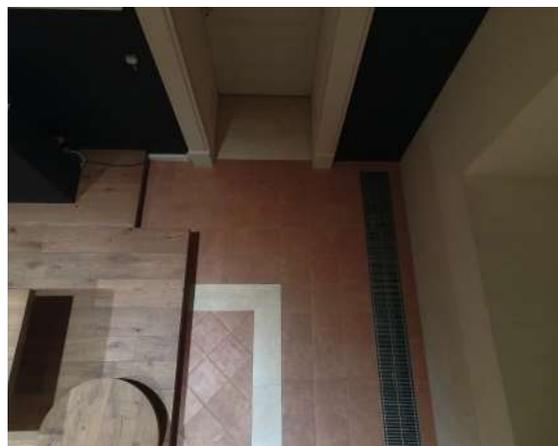


Fig 4.3.2.3.6
Foto dell'angolo est della sala scattata con Parrot Anafi

Questa divisione ha ristretto la selezione delle foto utilizzando per ogni porzione solo quelle che appartenessero allo stesso tipo cromatico per ciò che riguarda l'illuminazione; caricando i seguenti files:

- Volta 40/40 jpeg allineati
- Muri perimetrali 115/188 jpeg allineati
- Pavimento 78/78 jpeg allineati

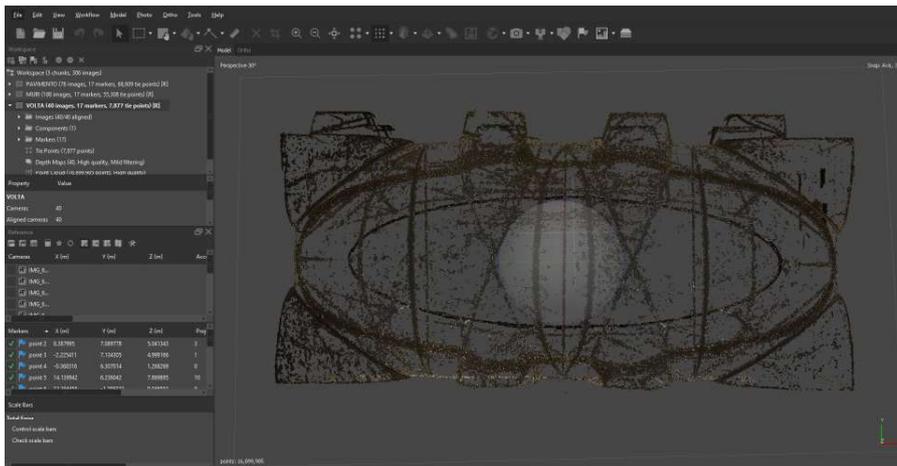


Fig 4.3.2.3.7
Schermata dello spazio di lavoro Metashape, Nuvola sparsa della porzione relativa alla volta

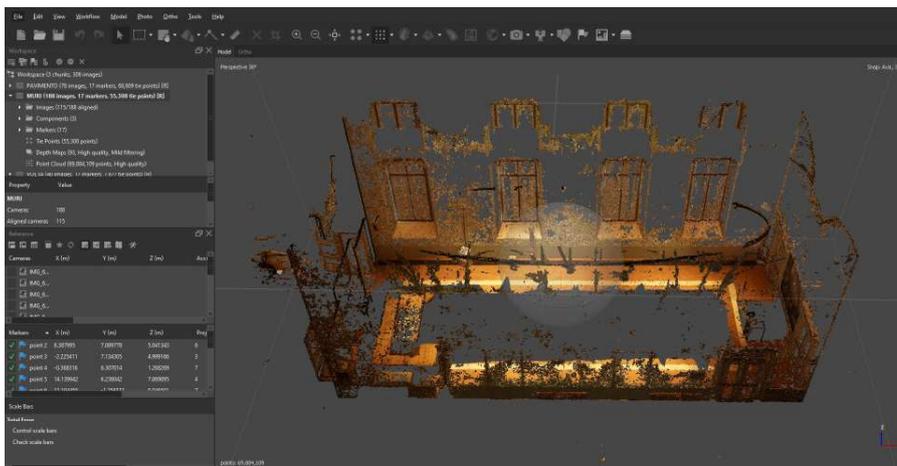


Fig 4.3.2.3.8
Schermata dello spazio di lavoro Metashape, Nuvola sparsa della porzione relativa ai muri perimetrali

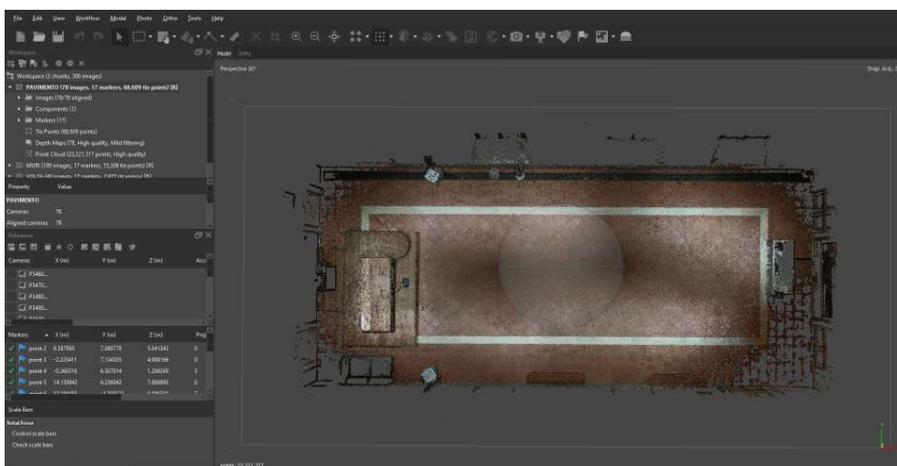


Fig 4.3.2.3.9
Schermata dello spazio di lavoro Metashape, Nuvola sparsa della porzione relativa al pavimento

“I sistemi basati su immagini utilizzano tipicamente un sensore passivo, cioè il dispositivo per acquisire i dati visivi si affida a sorgenti di luce esterne (ad esempio, il sole o un illuminatore artificiale), e un’illuminazione adeguata dell’oggetto è necessaria per ottenere risultati accurati. Questo problema può essere superato eseguendo l’acquisizione delle immagini in un ambiente controllato o in condizioni di luce solare diretta. Tuttavia, tali condizioni ideali sono difficili da ottenere in varie attività di rilievo”

Infatti, nonostante tale divisione e l’illuminazione ulteriore della volta con 2 fari possiamo apprezzare l’incompletezza dell’allineamento in tutte quelle porzioni della superficie nelle quali la monocromaticità dell’intonaco rappresentava una criticità non offrendo all’algoritmo sufficienti tie points per effettuare le triangolazioni.

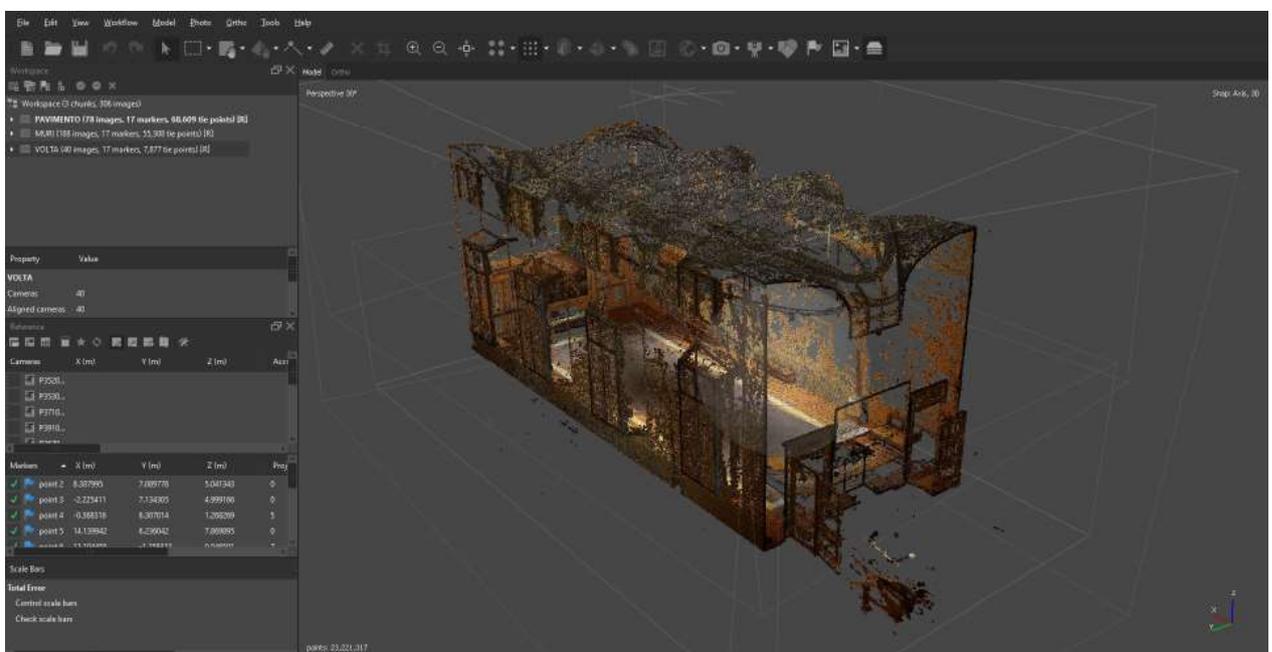


Fig 4.3.2.3.10
Schermata dello spazio di lavoro Metashape, nuvola di punti densa risultante dall’allineamento delle immagini suddividendo le porzioni della sala

Ritenendo insoddisfante il risultato, si è deciso di implementare il rilievo utilizzando un sistema di scansione laser terrestre (TLS)

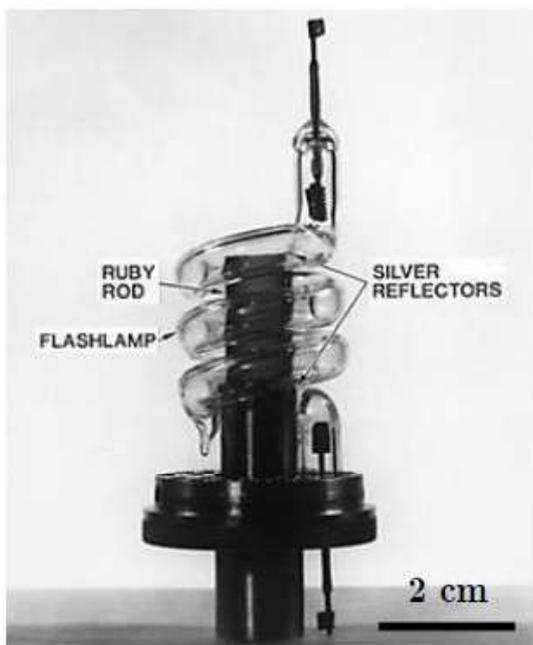
L’uso del laser scanning è preferibile alla fotogrammetria in situazioni che richiedono precisione elevata e copertura completa della struttura in esame. A differenza della fotogrammetria, che dipende dalla qualità delle immagini e dalla visibilità degli elementi fotografati, il laser scanner offre dati tridimensionali con una precisione millimetrica indipendente dalle condizioni di luce o contrasto del materiale rilevato.

Questo è particolarmente utile in aree con geometrie complesse o con ridotti dettagli superficiali, dove il rilievo fotografico può risultare insufficiente. (Nuttens et al., 2011)

4.3.3 Rilievo con Terrestrial Laser Scanning (TLS): raccolta ed elaborazione dei dati

4.3.3.1 Terrestrial Laser Scanner (TLS)

Il primo laser funzionante con tre transizioni di livello energetico fu creato da Theodore Maiman nel 1960. Tuttavia, non è stato fino agli anni '90 che i primi scanner laser commerciali sono apparsi sul mercato.



*Fig 4.3.3.1.1
Prima sorgente laser realizzata da T. Maiman nel 1960
www.researchgate.net*

Successivamente, grazie ai progressi tecnici in ottica, sensori, elettronica e computer, sono stati osservati significativi miglioramenti nelle prestazioni degli scanner, come velocità, precisione e peso, nei tre decenni successivi. Soprattutto negli ultimi dieci anni, la nuova generazione di scanner laser terrestri ha fornito prestazioni migliori e sistemi più avanzati. Ad esempio, la tecnologia di scansione laser è stata integrata nelle stazioni totali. Oggi, la tecnologia TLS è gradualmente maturata attraverso miglioramenti continui e ha una vasta gamma di applicazioni.

Il sistema di misurazione della distanza è la componente principale di un TLS e utilizza un laser per misurare la distanza dallo scanner a un oggetto. Il principio di funzionamento prevede che lo scanner emetta un fascio laser nell'area di scansione prestabilita cambiando l'angolo di deflessione in direzioni verticale e orizzontale. Quando il fascio laser colpisce una superficie riflettente nel suo percorso, torna al ricevitore. Utilizzando diversi metodi di misurazione della distanza, è possibile calcolare la distanza tra lo scanner e l'oggetto. Infine, in base agli angoli azimutale (orizzontale) e di elevazione (verticale) della luce, è possibile determinare la posizione del punto riflettente. (Chao Wu et al., 2021)

Attualmente, ci sono due principali metodi di misurazione della distanza utilizzati negli scanner laser commerciali: time-of-flight (conosciuto anche come “basato su impulsi”) e phase-based.

- **Time-of-flight:** Questo principio si basa sul metodo classico di registrare il tempo di percorrenza di un impulso di energia laser. Poiché la velocità del laser è conosciuta con grande precisione, registrando il tempo di andata e ritorno dell’impulso emesso, è possibile calcolare la distanza utilizzando la seguente formula:
- **Phase-based:** Il laser emette un fascio d’onda continua con diverse lunghezze d’onda armoniche tipicamente realizzate mediante modulazione di ampiezza (AM). La distanza tra uno scanner e un oggetto è determinata dallo spostamento di fase tra l’onda inviata e quella ricevuta.

Distance Measuring Methods	Typical Products	Maximum Range (m)	Scan Speed (pts/s)	Ranging Accuracy
Time-of-flight	Riegl VZ-400i	800	500,000	5 mm @ 100 m
	Topcon GLS-2000	500	120,000	3.5 mm @ 150 m
Phase-based	Faro FocusS 150	150	976,000	1 mm @ 25 m
	Z+F IMAGER 5016	365	1,100,000	1.6 mm @ 100 m

Fig 4.3.3.1.2
Tabella comparativa dei
metodi di misurazione

Ogni tipo di scanner ha applicazioni adatte a diversi scenari a seconda delle esigenze del progetto. Il punto di forza degli scanner a time-of-flight risiede nel loro raggio di misurazione efficace molto più lungo e nella riduzione del rumore di punti spuri, mentre gli scanner basati su impulsi hanno un notevole vantaggio in termini di precisione di misurazione e velocità di acquisizione. (Liang Cheng et al., 2018)



Fig 4.3.3.1.3
scanner laser FARO
Focus S 150
<https://shop.laserscanning-europe.com/>



Fig 4.3.3.1.4
scanner laser
RIEGL VZ-400i
<http://www.riegl.com/>

4.3.3.2 Rilievo TLS: raccolta ed elaborazione dei dati

Vista l'impossibilità della creazione di una nuvola di punti densa sufficientemente tale da creare una mesh del volume con i soli dati fotografici acquisiti, si è proceduto alla scansione dell'ambiente con il laser scanner Focus^{3D} Cam2 X330.

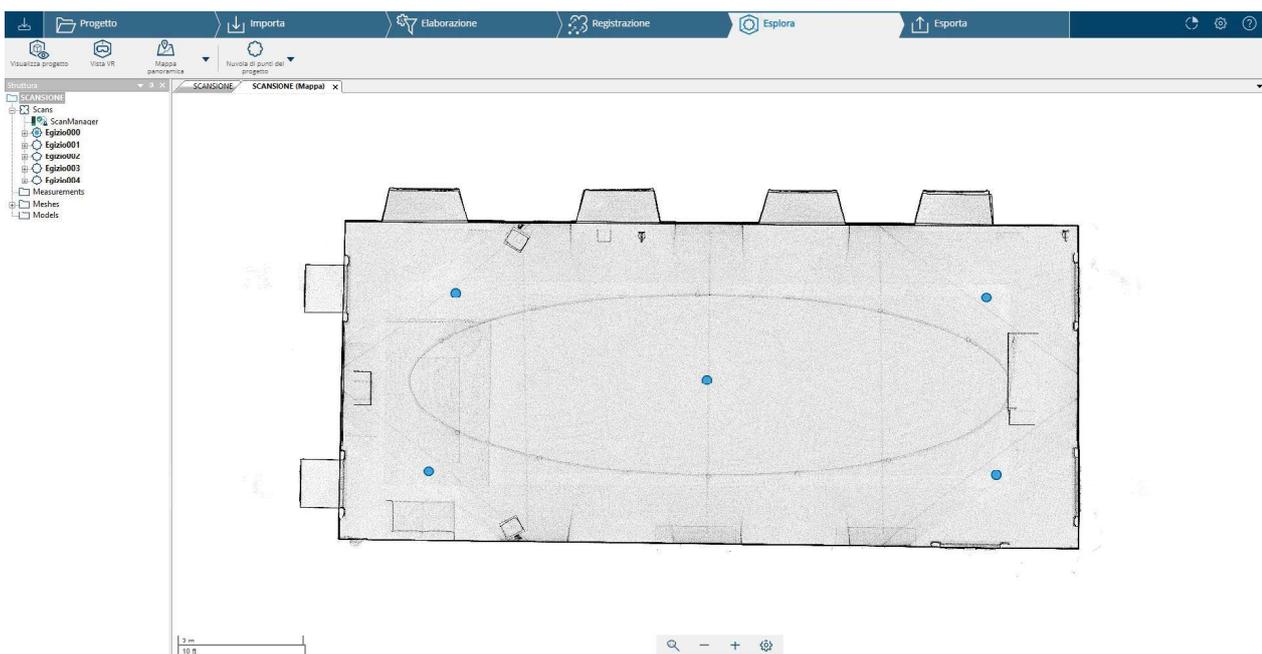
Fig 4.3.3.2.2
Focus3D Cam2
X330
immagine da
scheda tecnica



Fig 4.4.1.1
Focus3D Cam2 X330 nella stazione di rilievo con l'operatore, ricercatore Lorenzo Teppati Losè

Per la registrazione delle nuvole di punti, vista la presenza di angoli concavi e punti ciechi come le nicchie delle finestre e volumi interni come il palco e la scrivania, sono state effettuate 5 scansioni applicando una strategia 'cloud to cloud'.

Fig 4.3.3.2.3
Schermata dello spazio di
lavoro Faro Scene,
Mappa Scansione con
posizionamenti della stazione
laser



Il ‘cloud to cloud’ è un metodo di registrazione e allineamento dei dati provenienti da scansioni laser in cui le nuvole di punti generate da diverse scansioni vengono confrontate e unite direttamente tra loro attraverso le corrispondenze delle nuvole di punti dense anziché fare riferimento a punti di controllo esterni e implementate nel software Scene.

Questo approccio è particolarmente utile quando si lavora con più scansioni dello stesso oggetto o area in cui è fondamentale ottenere una coerenza geometrica tra i diversi set di dati. (Ningli Xu et al., 2023)

Le acquisizioni sono state effettuate con cattura del colore.

Fig 4.3.3.2.4
Schermata dello spazio di lavoro Faro Scene,
Immagine di riferimento a 360° per la colorazione dei punti risultanti della scansione



Si è dunque proceduto con il caricamento delle scansioni nel programma Scene e alla loro successiva elaborazione per la creazione della nuvola di punti.



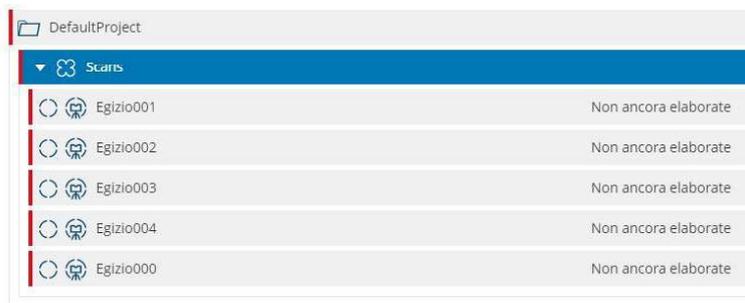
Fig 4.3.3.2.5
Schermata dello spazio di lavoro Faro Scene,
Importazione delle scansioni con il comando “Importa”



Scansioni selezionate

Selezionare una singola scansione, un cluster o un progetto completo per l'elaborazione facendo clic su di esso.

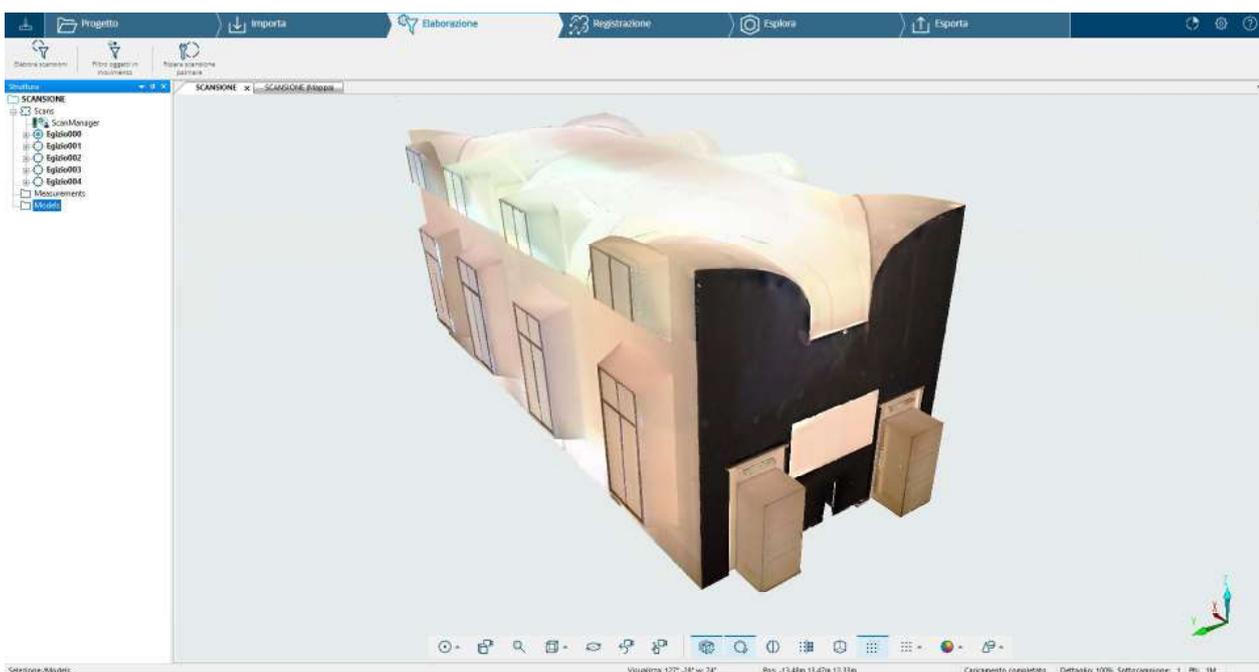
Scansioni selezionate: 5



*Fig 4.3.3.2.6
Schermata dello spazio di lavoro Faro Scene, Elaborazione delle scansioni con il comando "Elaborazione"*

Dopo l'elaborazione delle scansioni si ottiene la nuvola di punti densa colorata.

Sarebbe da qui possibile ottenere una mesh elaborando la nuvola di punti direttamente su scene, la cui quantità di superfici generate, sarebbe però inferiore a quella realizzabile su Agisoft Metashape Pro 2.0, quindi meno affidabile nella descrizione dei dettagli. (Faro Technologies Inc., 2023) (Agisoft LLC., 2023)



*Fig 4.3.3.2.7
Schermata dello spazio di lavoro Faro Scene, Risultato dell'elaborazione*

4.3.4 Combinazione dei dati e costruzione del modello progettuale.

Ottenuta dalla scansione la nuvola di punti necessaria alla costruzione di una mesh, si è deciso di utilizzare per la costruzione di quest'ultima l'ambiente di lavoro Metashape, così da utilizzare tutta la documentazione fotografica per la creazione di una texture dettagliata del modello, attraverso i seguenti passaggi:

- Export delle nuvole di punti TLS da Faro Scene
- Importazione delle nuvole TLS nello spazio di lavoro Metashape (congruenti al modello fotogrammetrico poiché con lo stesso sistema di riferimento)
- Generazione della mesh nello spazio di lavoro Metashape, i cui algoritmi di generazione di superfici hanno performance molto più accurate
- Successiva applicazione della texture a partire dalle immagini fotogrammetriche orientate che avranno una maggior risoluzione e qualità radiometrica

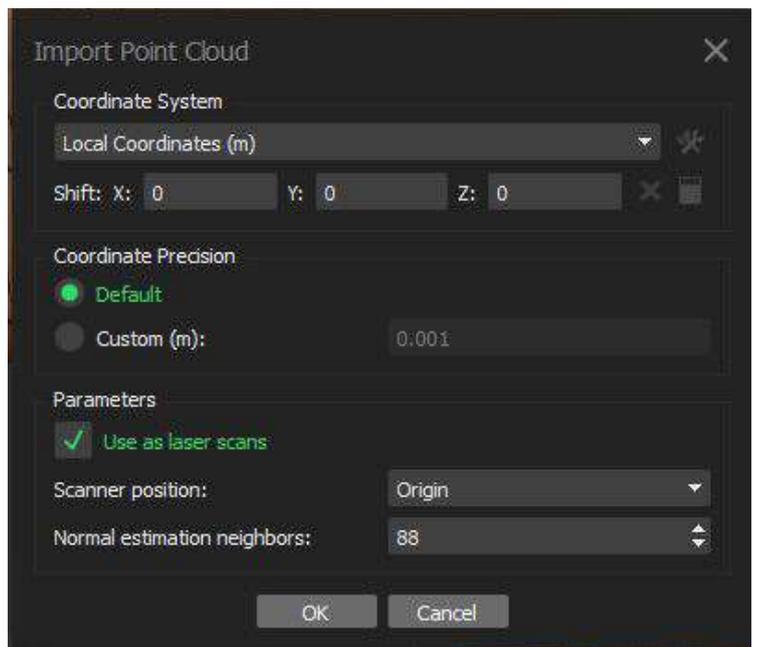
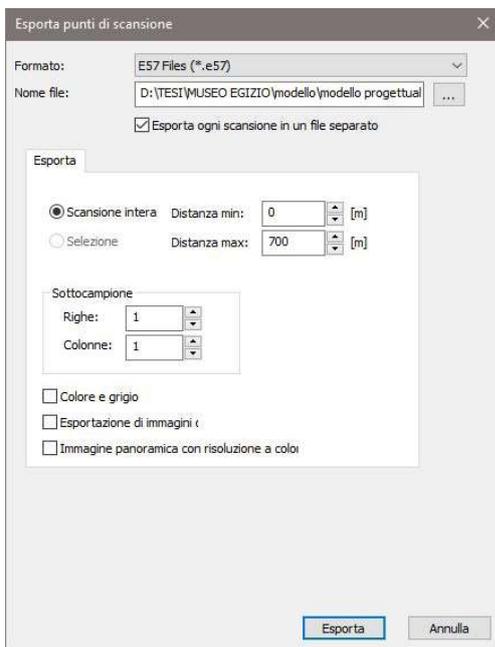


Fig 4.3.4.1 e 4.3.4.2
Schermate dello spazio
di lavoro Faro Scene e
Metashape,
Esportazione e relativa
importazione della nuvola di
punti

L'importazione è stata eseguita con il parametro specifico “as laser scans”, presente nelle funzionalità di Metashape Professional 2.0.



Fig 4.3.4.3
 Schermata dello spazio di lavoro Metashape, Nuvola di punti importata come scansione

In questo caso si ottiene un allineamento delle scansioni nel nuovo ambiente di elaborazione, dal quale si può avviare la generazione della mesh come è possibile fare da una nuvola di punti densa

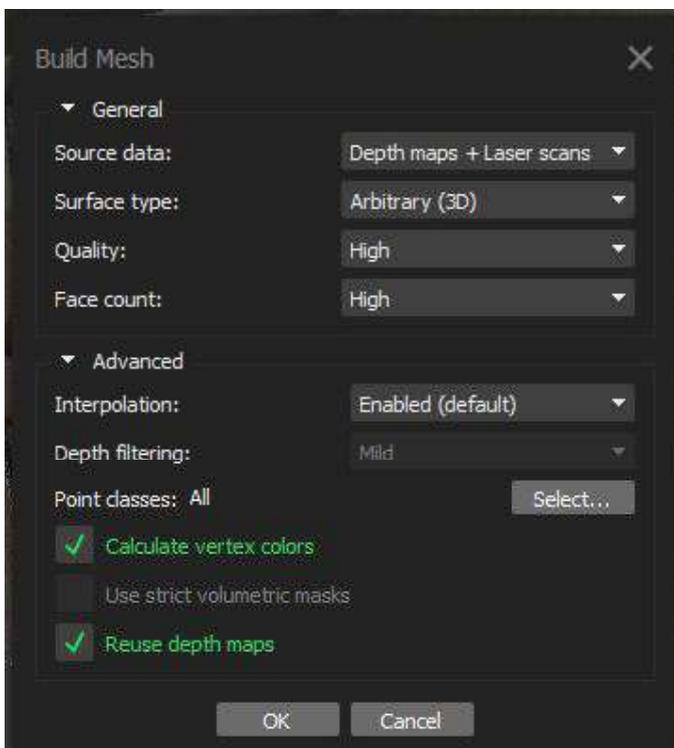
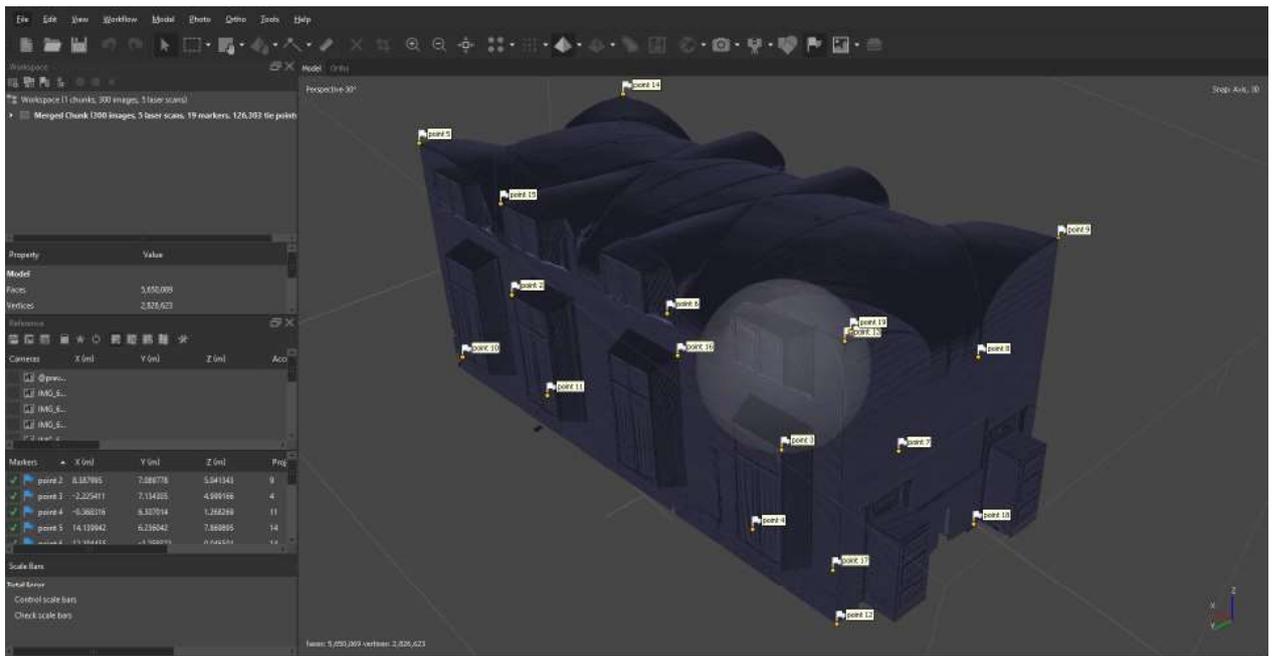


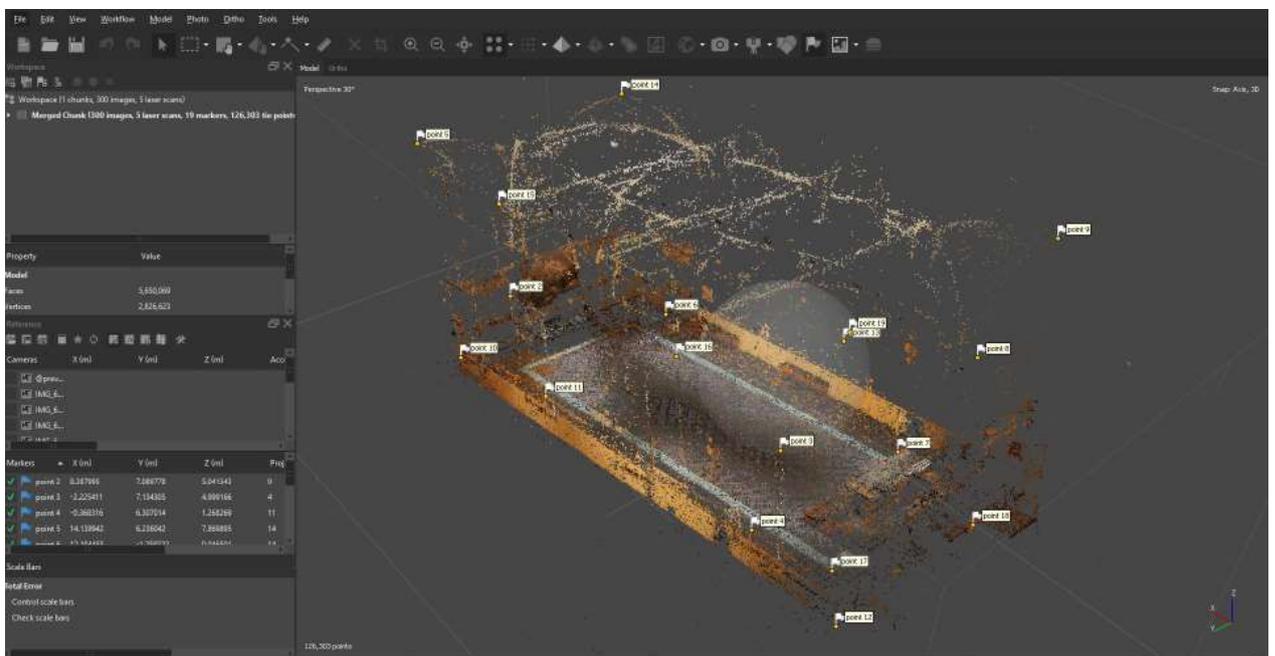
Fig 4.3.4.4
 Schermata dello spazio di lavoro Metashape, Creazione della mesh dalla nuvola di punti da scansione attraverso il comando "Build mesh"

La mesh creata è priva di informazioni cromatiche, poiché essa deve essere texturizzata attraverso l'allineamento alle scansioni della documentazione fotografica precedentemente trattata.



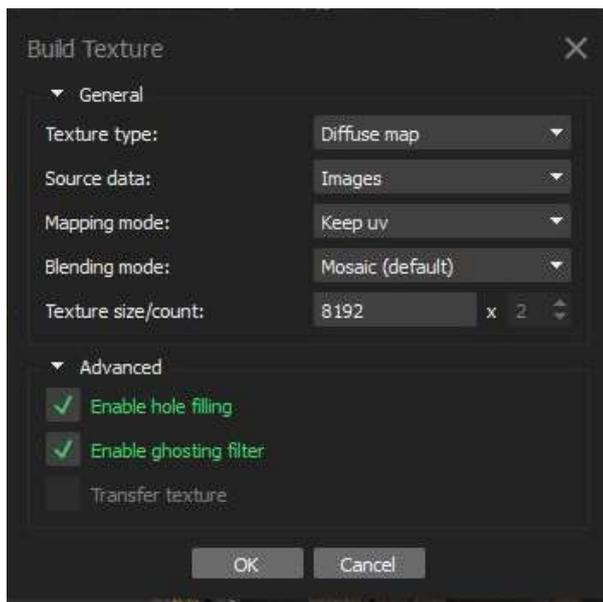
*Fig 4.3.4.5
Schermata dello spazio di lavoro Metashape,
Markers inseriti nella mesh del modello dato dalla scansione*

L'apposizione manuale di 19 Markers, improduttiva nella creazione di tie points per l'allineamento intrapreso con i soli dati fotografici, è in questo caso in grado di fornire i riferimenti per la texturizzazione della mesh.

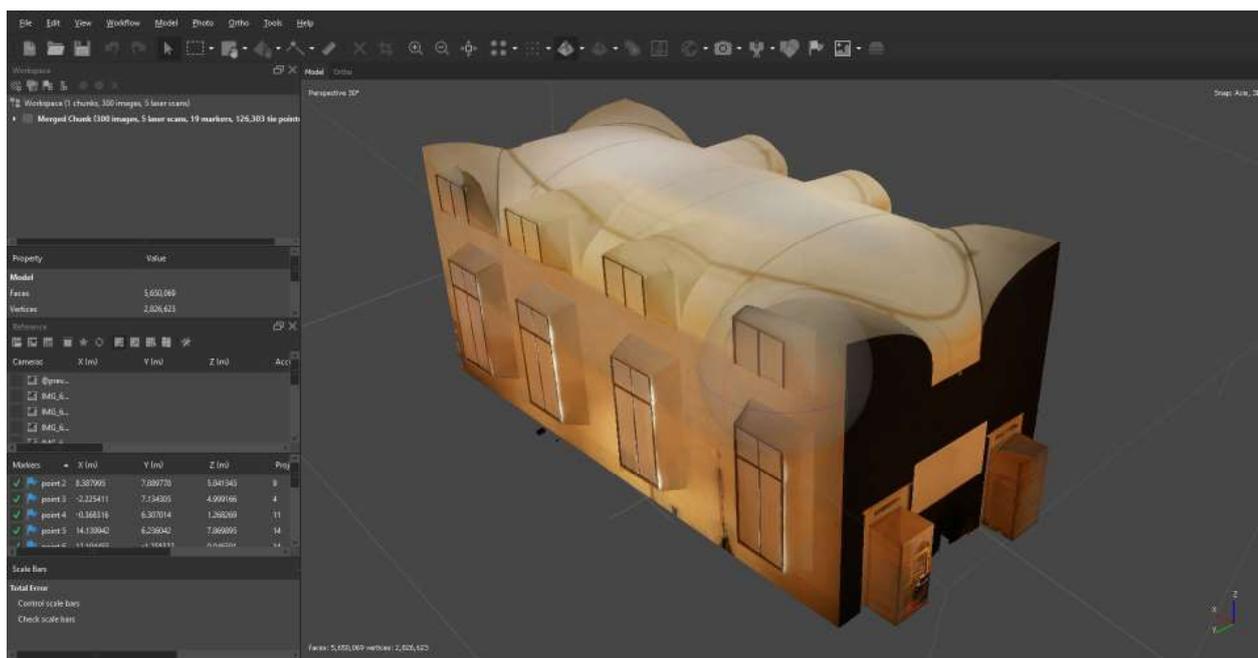


*Fig 4.3.4.6
Schermata dello spazio di lavoro Metashape,
Nuvola di punti sparsa generata dall'allineamento delle immagini allineata alla nuvola della scansione attraverso il posizionamento dei Markers*

Costruita dunque la nuvola di punti densa facente riferimento ai markers, si può procedere all'apposizione della texture attraverso il comando "build texture" con i parametri visibili in figura, che verrà applicata alla mesh derivante dalla nuvola di punti ottenuta tramite TLS. Agisoft LLC. (2023)



*Fig 4.3.4.7
Schermata dello spazio di lavoro Metashape, Texturizzazione della mesh con le immagini allineate della nuvola sparsa*



*Fig 4.3.4.8
Schermata dello spazio di lavoro Metashape, Mesh texturizzata*

4.4 Rilievo acustico.

Per valutare i principali parametri acustici monaurali degli ambienti, come T20, T30, EDT, C50, C80, D50 e TS, secondo le norme BS EN ISO 3382-1 e 3382-2 (Christensen, L. C. et al., 2013), sono state effettuate misurazioni di nove risposte all'impulso (RIR) nella sala conferenze.

Ogni misurazione è stata ripetuta tre volte, corrispondendo a diverse configurazioni spaziali tra sorgente e ricevitore.

In particolare, sono state definite due posizioni per la sorgente sonora, entrambe a un'altezza di 1,5 metri dal pavimento, per simulare le tipiche posizioni di un oratore. Per ogni posizione della sorgente, i ricevitori sono stati distribuiti uniformemente nell'area del pubblico.

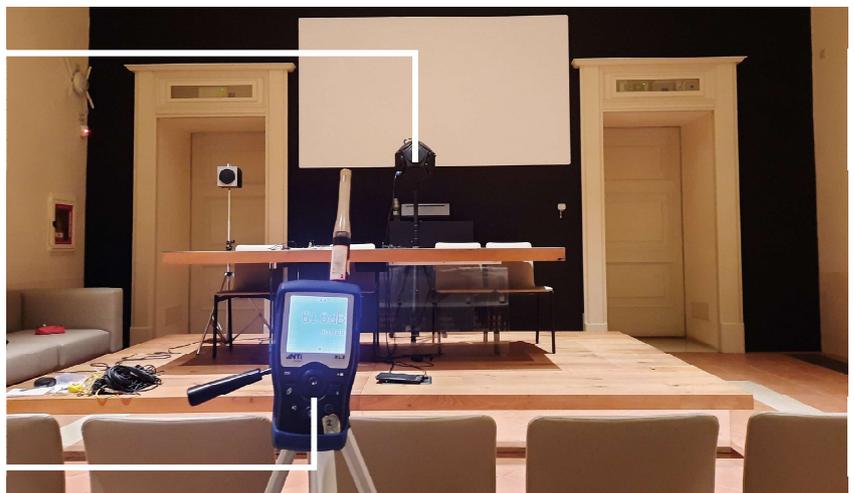
Le misurazioni sono state effettuate in condizioni di sala non occupata, con sistema HVAC spento, porte e finestre chiuse, tende tirate e proiettore attivo. È stato utilizzato il metodo della risposta all'impulso integrata inversa.

Come sorgente sonora è stato impiegato il diffusore omnidirezionale Brüel and Kjaer 4292-L, conforme agli standard, alimentato da un amplificatore Lab Gruppen LAB300, emettendo uno sweep esponenziale di 5 secondi con frequenza di campionamento a 48 kHz. Come ricevitore è stato utilizzato il fonometro omnidirezionale di classe 1 NTi Audio XL2, posizionato a 1,2 metri dal pavimento.

Fig 4.4.1
diffusore omnidirezionale
Brüel and Kjaer 4292-L.



Fig 4.4.2
fonometro
omnidirezionale di classe
1 NTi Audio XL2



I parametri acustici sono stati valutati utilizzando uno script MATLAB basato sulla funzione `ita_roomacoustics` della libreria ITA Toolbox, che implementa routine validate per calcolare i parametri acustici standard a partire dalle misurazioni della risposta all'impulso, seguendo le metodologie delle norme BS EN ISO 3382-1. I valori acustici, reali e virtuali, sono stati riportati come medie spaziali in bande di ottava comprese tra 125 e 8000 Hz.

Per calcolare i parametri acustici monaurali, sono state acquisite risposte all'impulso (RIR) considerando configurazioni spaziali sorgente-ricevitore tipiche degli scenari di comunicazione nella sala conferenze.

Questi parametri, dipendenti dalla posizione, sono stati calcolati utilizzando sei coppie sorgente-ricevitore, con la sorgente e il ricevitore rispettivamente a 1,5 m e 1,2 m dal pavimento (Guastamacchia, A. et al., 2024).

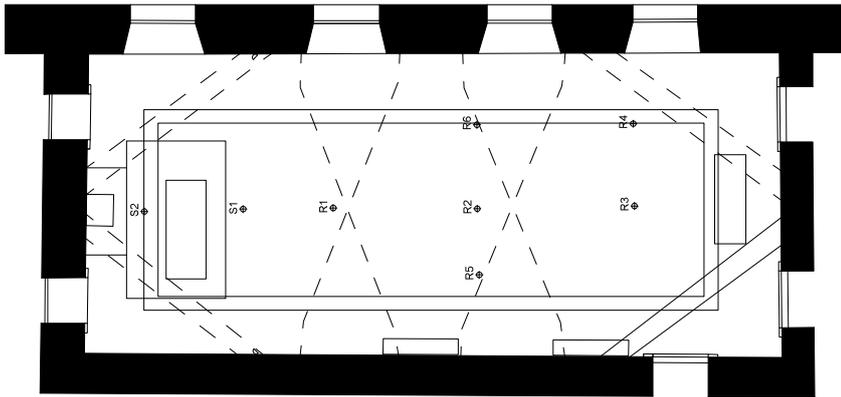


Fig. 4.4.1
Pianta della sala con
posizione di sorgenti
e ricevitori

Qui di seguito i risultati delle misurazioni secondo i parametri poi utilizzati nelle successive calibrazione del modello e simulazioni acustiche, confrontati con i valori ottimali forniti dalla Norma ISO 11532-2 per il T_R e il C_{50} , rappresentati con relativi JND (Just Noticeable Difference) forniti dalla Norma ISO 3382-1 ed errori relativi alla deviazione standard della media delle misure dei 6 Ricevitori.

Fig. 4.4.2
Pianta della sala con
posizione di sorgenti
e ricevitori

Subjective listener aspect	Acoustic quantity	Single number frequency averaging ^a Hz	Just noticeable difference (JND)	Typical range ^b
Subjective level of sound	Sound strength, G , in decibels	500 to 1 000	1 dB	-2 dB; +10 dB
Perceived reverberance	Early decay time (EDT) in seconds	500 to 1 000	Rel. 5 %	1,0 s; 3,0 s
Perceived clarity of sound	Clarity, C_{80} , in decibels	500 to 1 000	1 dB	-5 dB; +5 dB
	Definition, D_{50}	500 to 1 000	0,05	0,3; 0,7
	Centre time, T_S , in milliseconds	500 to 1 000	10 ms	60 ms; 260 ms
Apparent source width (ASW)	Early lateral energy fraction, J_{LF} or J_{LFC}	125 to 1 000	0,05	0,05; 0,35
Listener envelopment (LEV)	Late lateral sound level, L_J , in decibels	125 to 1 000	Not known	-14 dB; +1 dB
^a The single number frequency averaging denotes the arithmetical average for the octave bands, except for L_J which shall be energy averaged [see (A.17)].				
^b Frequency-averaged values in single positions in non-occupied concert and multi-purpose halls up to 25 000 m ³ .				

Fig 4.4.A1
Tempo di Riverberazione S1

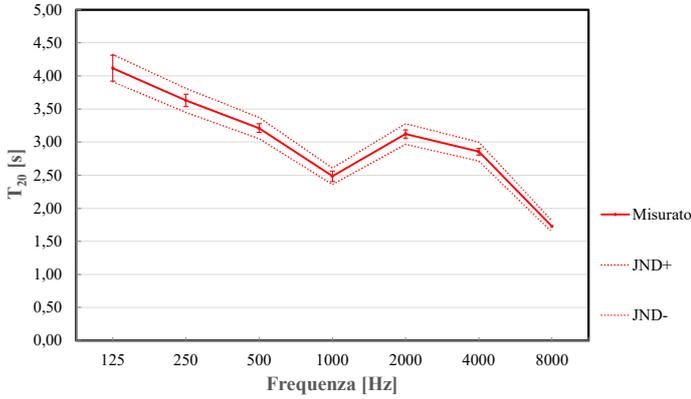


Fig 4.4.A2
Tempo di Riverberazione S2

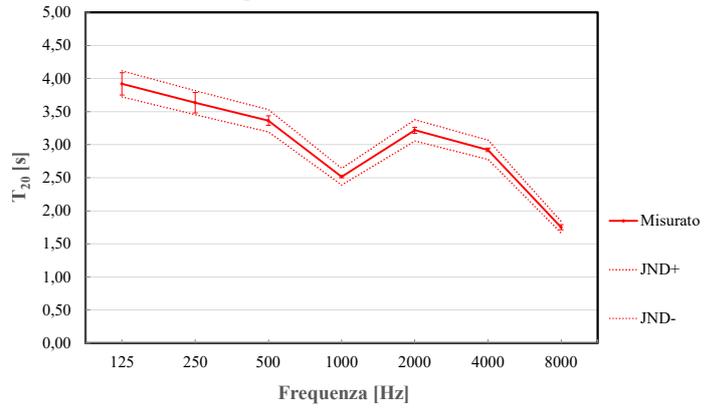


Fig 4.4.B1
Tempo di Riverberazione S1

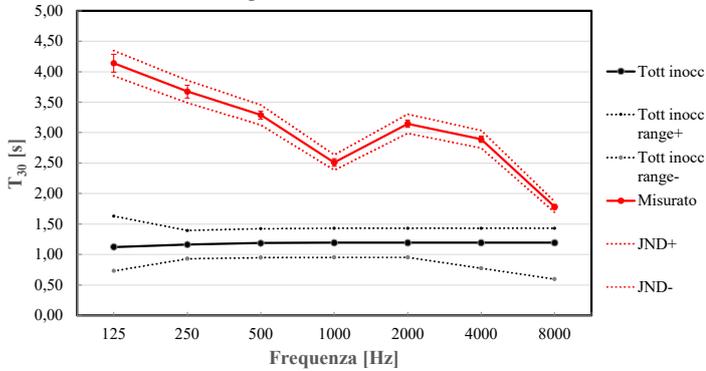


Fig 4.4.B2

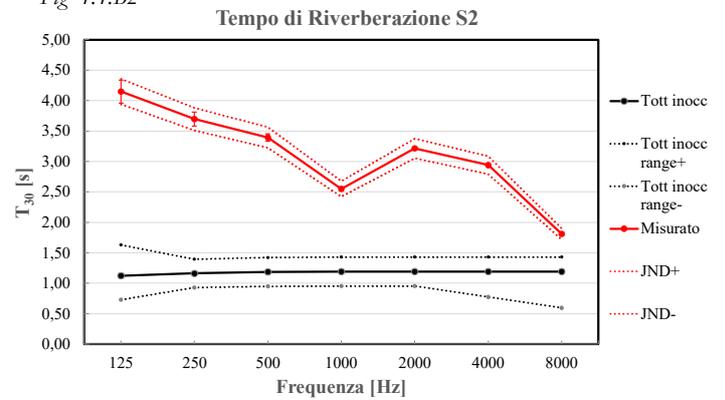


Fig 4.4.C1
EDT S1

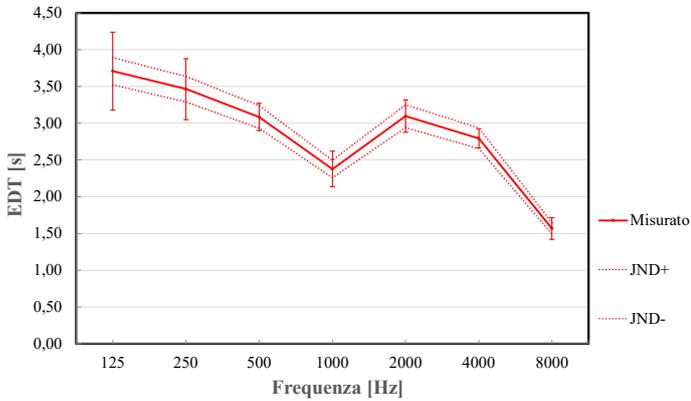


Fig 4.4.C2

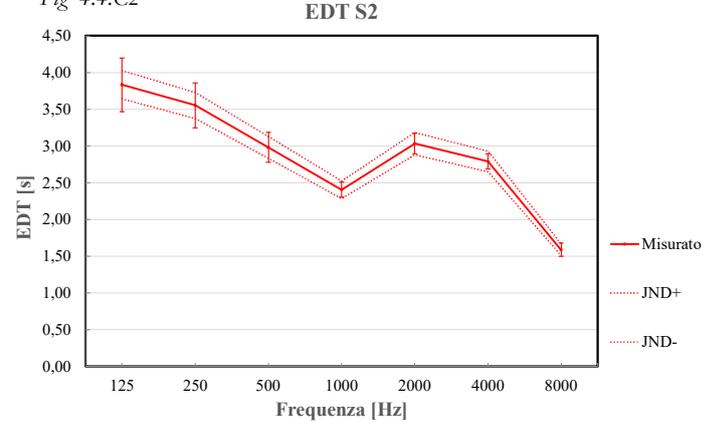


Fig 4.4.D1
Definizione S1

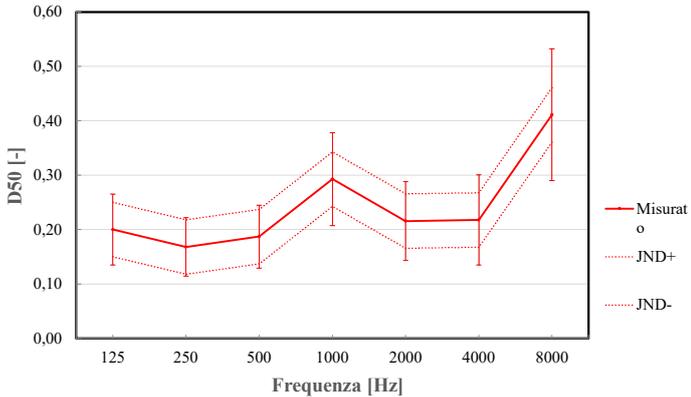
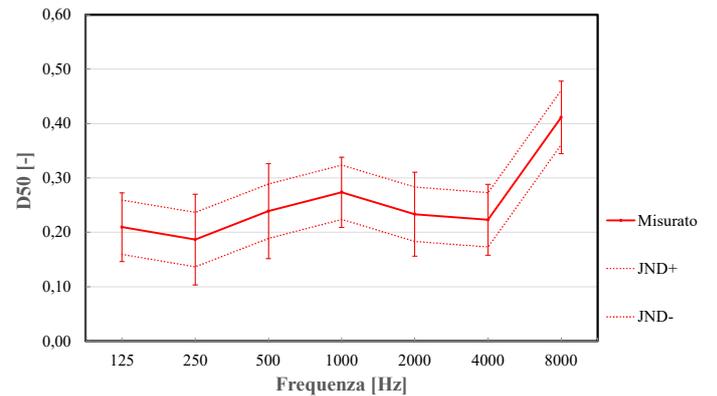


Fig 4.4.D2



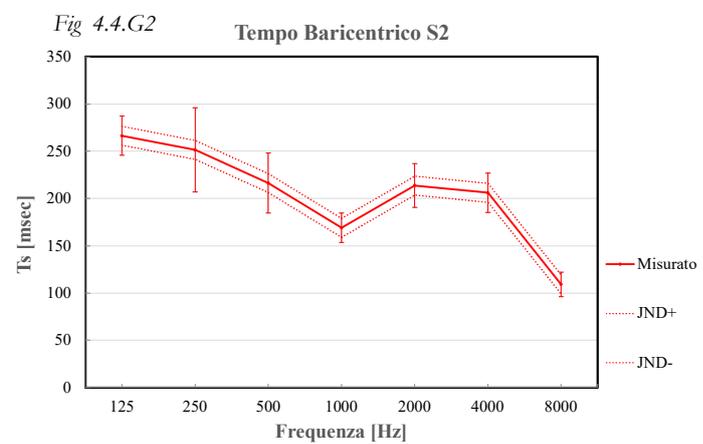
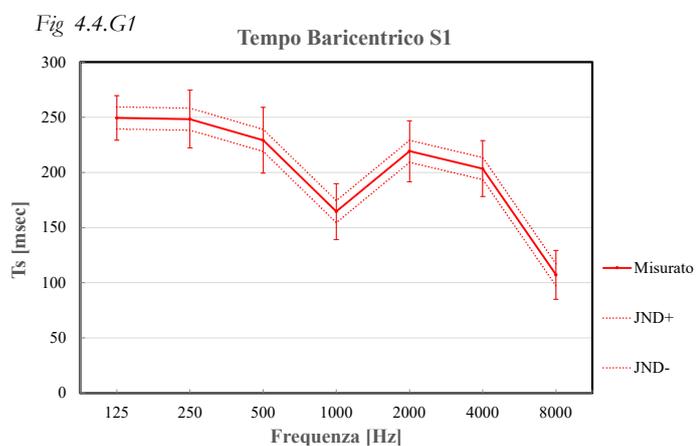
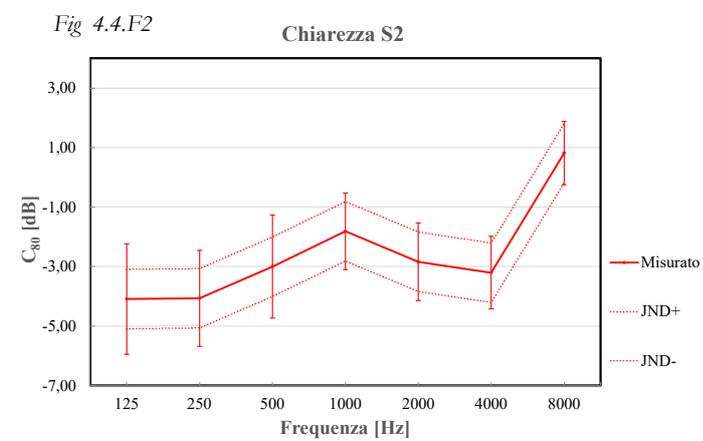
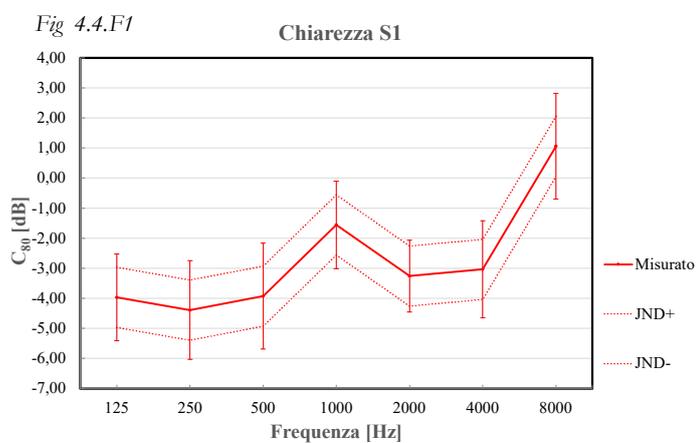
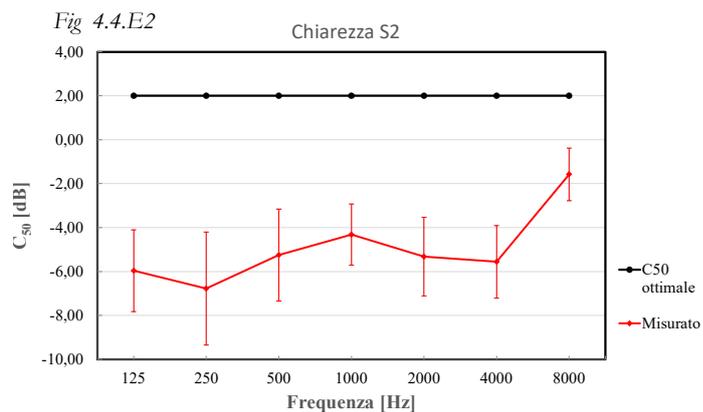
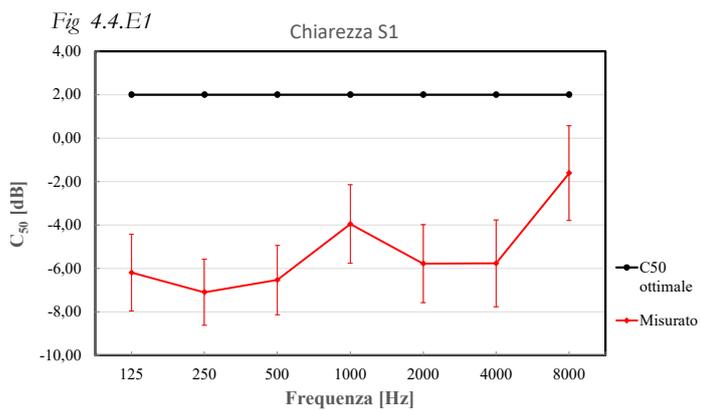


Fig 4.4.A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1, D2, E1, E2, F1, F2, G1, G2.
Parametri acustici misurati nella sala.

4.5 Simulazione acustica dell'esistente

4.5.1 Calibrazione del modello attraverso il confronto delle misure dirette

Calibrare un modello acustico significa adattare i parametri del modello numerico per ottenere risultati che coincidano con le misurazioni acustiche reali effettuate nello spazio fisico affinché il modello simuli accuratamente le caratteristiche acustiche dell'ambiente.

Possiamo suddividere la creazione di un modello acustico affidabile in questi passaggi:

- 1. Creazione del modello 3D.** Il modello tridimensionale dell'ambiente viene creato utilizzando software CAD o direttamente in strumenti acustici come ODEON. Deve replicare fedelmente le dimensioni, le superfici e i dettagli architettonici dell'ambiente reale secondo il grado di dettaglio necessario agli algoritmi di calcolo della simulazione.
- 2. Rilevazioni acustiche sul campo.** Viste al paragrafo 4.4
- 3. Iterazioni.** Vengono importati i dati dei parametri acustici misurati ed utilizzati come riferimento per il confronto con i dati della simulazione nella quale si regolano i valori di assorbimento e scattering delle superfici nel modello, modificandoli iterativamente fino a ottenere una corrispondenza con i dati misurati per ogni banda di ottava.
- 4. Validazione finale.** Una volta calibrato, il modello viene testato su condizioni differenti per garantire che rappresenti accuratamente il comportamento acustico dello spazio in diverse configurazioni (es. con e senza pubblico). Si possono effettuare nuove misurazioni sul campo per confermare la coerenza del modello. (Odeon A/S, 2023)

4.5.1.1 Creazione del modello 3D

Inizialmente un modello derivato da misure dirette è stato utilizzato per avere una visione di massima dei valori di assorbimento e scattering delle componenti geometriche dell'ambiente in relazione ai valori forniti dalla letteratura.

Una volta ottenuta dal rilievo laser scanning una mesh complessa con valori di riferimento e di proporzione dimensionale molto accurati, l'oggetto di studio principale è stato quello di definire un grado di dettaglio adatto alla simulazione acustica, poiché geometrie complesse, come volte o arredi fissi devono corrispondere alla realtà nel loro sviluppo dimensionale e non necessariamente nel loro dettaglio, così per gli elementi secondari come piccoli ornamenti o la stessa area dedicata

alle sedute del pubblico o eventuali oggetti d'uso come lampade o schermi che devono essere semplificati.

Capire il livello di semplificazione ottimale è, in prima analisi, connesso all'algoritmo ed al metodo di calcolo del software, per ciò che riguarda ODEON, si consiglia di modellare le superfici che appaiono grandi da qualunque posizione rilevante della sorgente o del ricevitore. Al contrario, se le superfici sono lontane dalle sorgenti e dai ricevitori, molte piccole superfici possono essere sostituite con un minor numero di superfici più grandi. In questo caso, però, è essenziale compensare i dettagli non modellati assegnando adeguati coefficienti di diffusione (Christensen, L. C. & Rindel H. J., 2005).

Un ottimo caso di analisi semplificativa è la sala capitolare dello York Minster, costruita tra la fine del XIII e l'inizio del XIV secolo, è un capolavoro dell'architettura gotica inglese. Ha una forma ottagonale quasi regolare, collegata alla cattedrale attraverso un vestibolo a forma di L nel transetto nord. Considerata uno dei più grandi edifici medievali d'Europa, rappresenta quasi tutte le fasi dello stile gotico, dal 1230 al 1475 e possiede la più alta concentrazione di vetrate medievali di qualsiasi altra cattedrale europea.

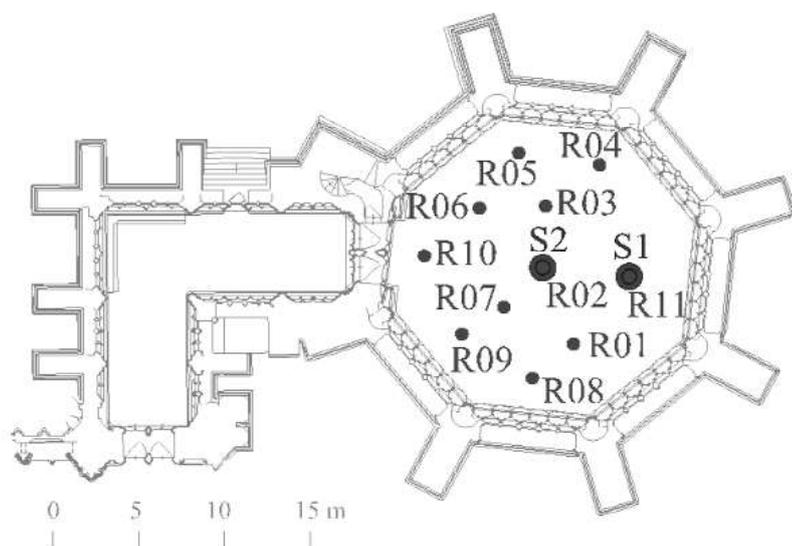
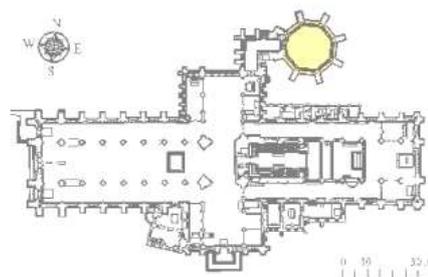


Fig 4.5.1.1.1
Pianta della Sala capitolare dello York Minster con le posizioni della sorgente (S) e del ricevitore (R) impostate per le misurazioni acustiche. La pianta completa della Minster è inclusa per mostrarne la posizione.
<https://www.mdpi.com/2624-599X/2/1/3>



Il modello 3D è stato creato partendo da planimetrie architettoniche e misurazioni laser in loco, utilizzando il software SketchUp. Per rispettare le linee guida degli algoritmi di acustica geometrica (GA), il modello è stato semplificato, evitando superfici troppo dettagliate e forme eccessivamente complesse.

Una delle principali semplificazioni ha riguardato i baldacchini decorati in calcare, modellati come superfici lisce. Per compensare l'area di calcare persa con questa semplificazione, il coefficiente di assorbimento acustico assegnato a questa superficie è stato lievemente aumentato, una pratica

comune nei modelli di edifici complessi, dove i dettagli decorativi possono rendere le superfici dure più assorbenti. Il coefficiente di scattering è stato stimato considerando le variazioni di profondità della superficie.

Un'ulteriore semplificazione ha riguardato le nervature in calcare che incorniciano le vetrate colorate. Tre configurazioni sono state testate: senza nervature, nervature in 2D e nervature in 3D. L'omissione delle nervature avrebbe aumentato l'area delle vetrate di circa 120 m² a scapito della superficie in pietra, e, data la differenza nelle proprietà acustiche dei due materiali, questa opzione è stata scartata.

Fig 4.5.1.1.2
Modello acustico della Chapter House della York Minster. Dettaglio delle semplificazioni, inclusi i baldacchini in calcare e le tre opzioni testate per i grappoli di calcare delle colonne o nervature che incorniciano le vetrate.
[Shttps://www.mdpi.com/2624-599X/2/1/3](https://www.mdpi.com/2624-599X/2/1/3)

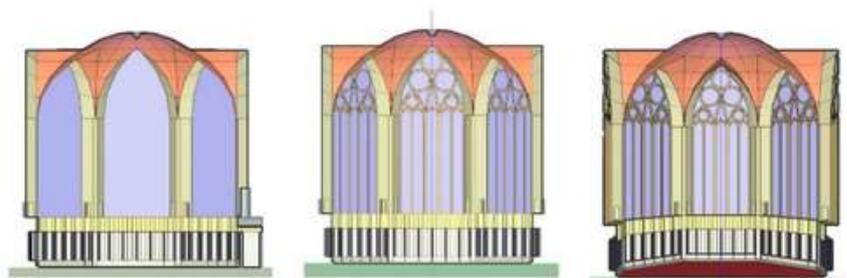
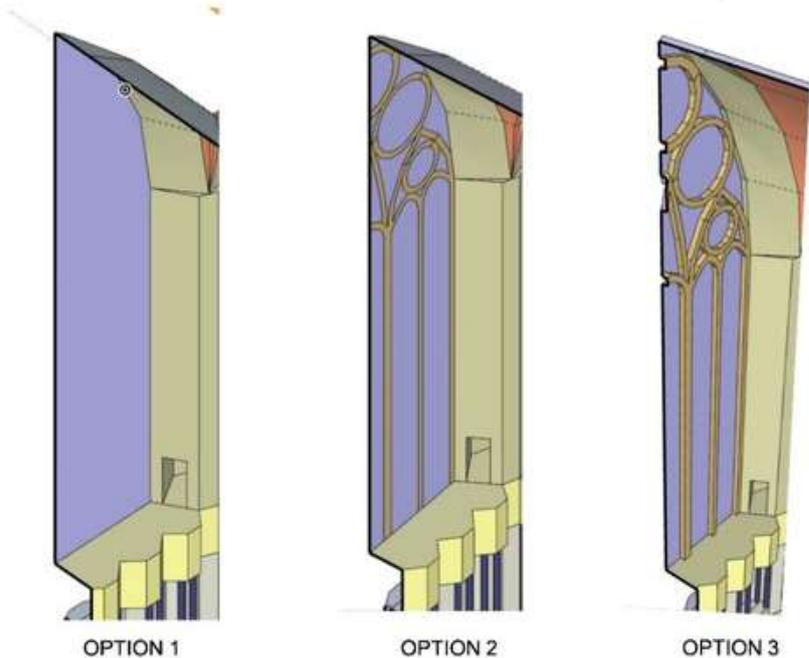


Fig 4.5.1.1.3
Veduta interna della sala Capitolare dello York Minster



Il modello con nervature in 3D ha aggiunto 200 m² di calcare distribuito su 1887 superfici rispetto al modello con nervature in 2D. Tuttavia, considerando l'impatto sui tempi di calcolo, è stata scelta l'opzione delle nervature in 2D. Anche in questo caso, il coefficiente di assorbimento delle nervature è stato leggermente aumentato per compensare la superficie persa, e il coefficiente di scattering è stato regolato di conseguenza. (Álvarez-Morales, L. et al., 2020)

Come anticipato, il modello iniziale è stato utile in prima istanza per approcciare dalle prime iterazioni di prova i valori di assorbimento dei materiali presenti nella sala.

Questo modello è stato redatto attraverso una modellazione su Rhinoceros per poi essere esportato come file .skp nell'area di lavoro Sketchup, così da creare il metamodello per ODEON.

Tuttavia, per la complessità delle forme della volta ed alcune imprecisione dovute alla complessità dell'ambiente, il modello è stato successivamente

Fig 4.5.1.1.4 e 5
 Schermata dello spazio di lavoro Sketchup, Modello acustico preliminare con volta semplificata.
 Schermata dello spazio di lavoro Odeon, Modello acustico preliminare con volta semplificata

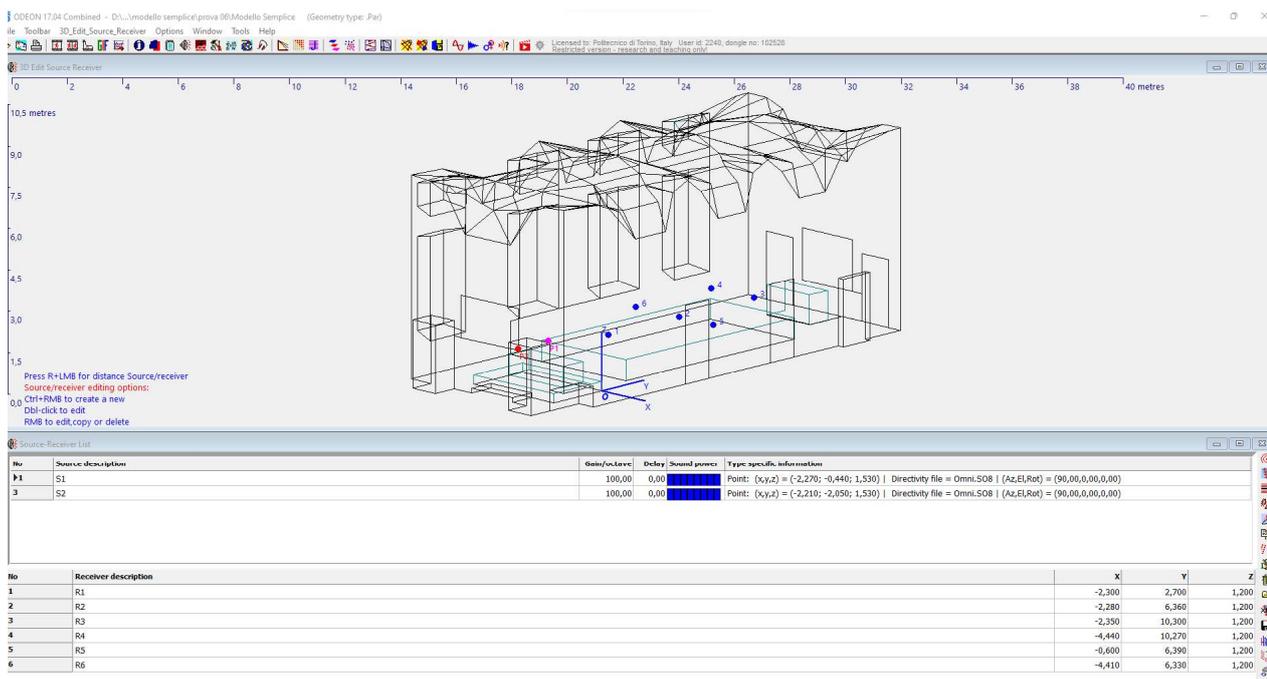
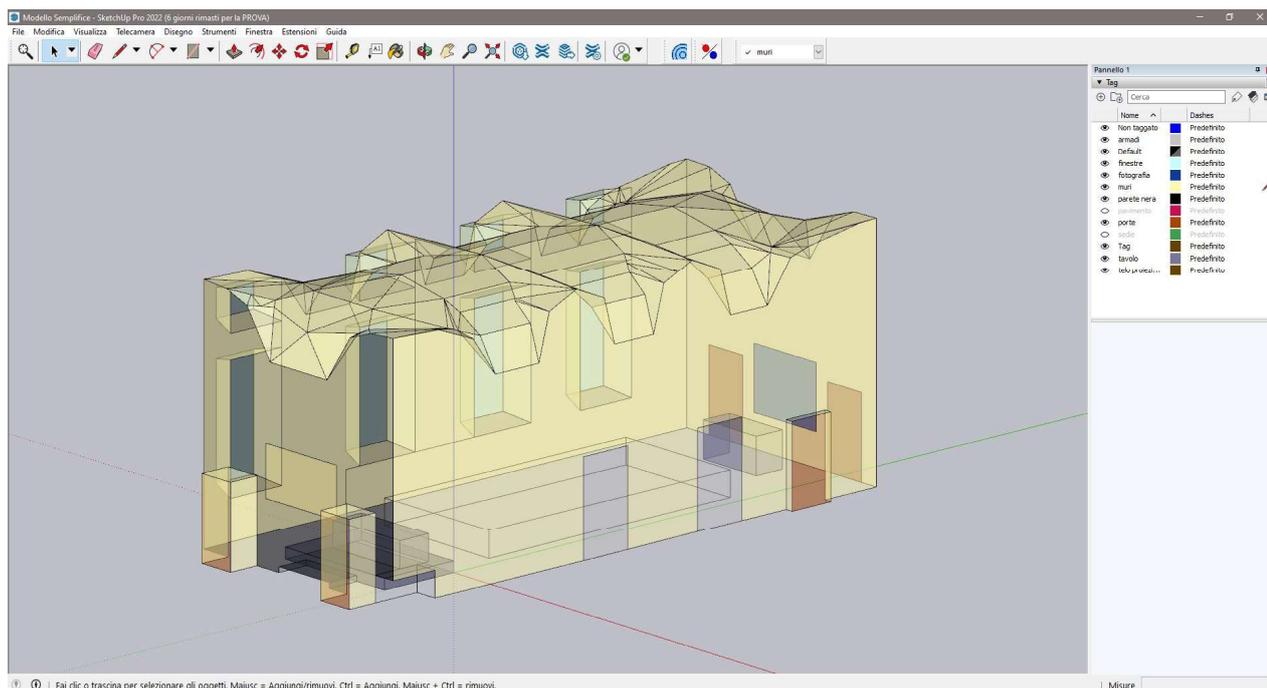
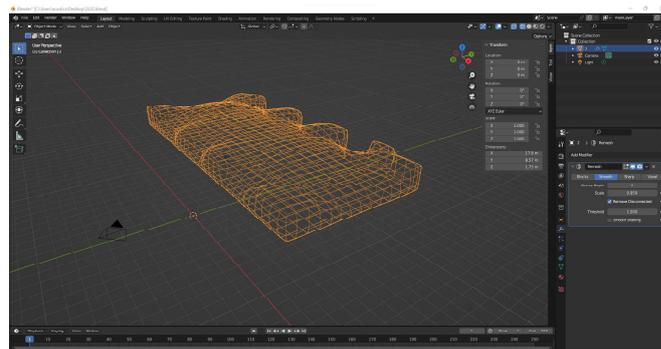
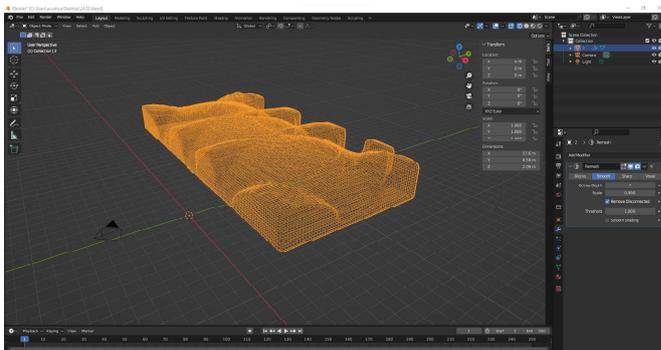
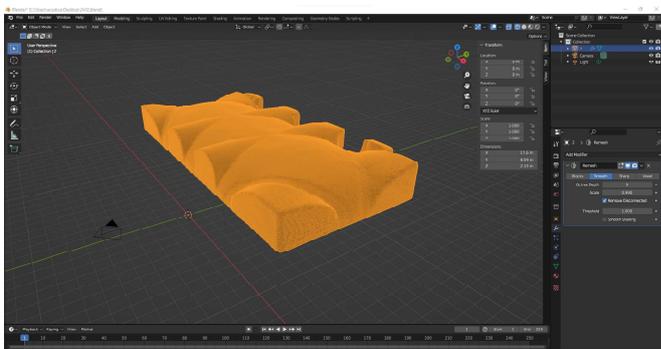
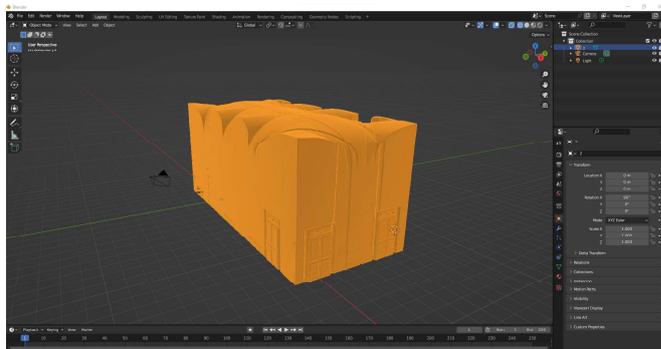


Fig 4.5.1.1.6, 7, 8 e 9

Schermata dello spazio di lavoro Blender, semplificazione della mesh ottenuta dal laser scanning attraverso il comando *Add Modifier > Remesh > Smooth*



implementato sulla base dei dati raccolti con il rilievo laser scanning e fotogrammetrico.

Il lavoro principale ha riguardato infatti la volta, caratterizzata da una porzione centrale a botte con due unghiate su entrambi i lati lunghi la cui monta corrisponde a quella della volta ed una porzione di raccordo alle due pareti più corte che definisce due semivele, delimitate a loro volta da due archi che diagonalmente intersecano agli angoli rispettivi 1/4 di cupola ellittica ribassata le cui sommità coincidono rispettivamente con i 4 angoli della sala.

Al netto della definizione geometrica, la pianta non perfettamente rettangolare suggerisce un'irregolarità che si può riscontrare anche nell'andamento delle geometrie della volta, complicate maggiormente dall'intersezione delle nicchie delle finestre in alto sul lato sud est.

La metodologia che si è scelto di applicare prevedeva l'importazione del file .obj ottenuto dalla generazione delle mesh su Metashape in Blender, per poter quivi applicare un modificatore di geometrie: il comando Remesh. (Blender Foundation, 2024)

Il parametro principale della scelta dei valori da applicare a tale modificatore è quantificabile solamente nel numero di superfici generate dalla semplificazione, che vede, nel caso specifico il mantenimento delle direzionalità delle superfici e l'angolo della loro intersezione quando questo supera una determinata soglia.

Come è infatti visibile dalle immagini a fianco, al diminuire delle superfici, progressivamente diminuisce la possibilità da parte del programma di riconoscere intersezioni significative.

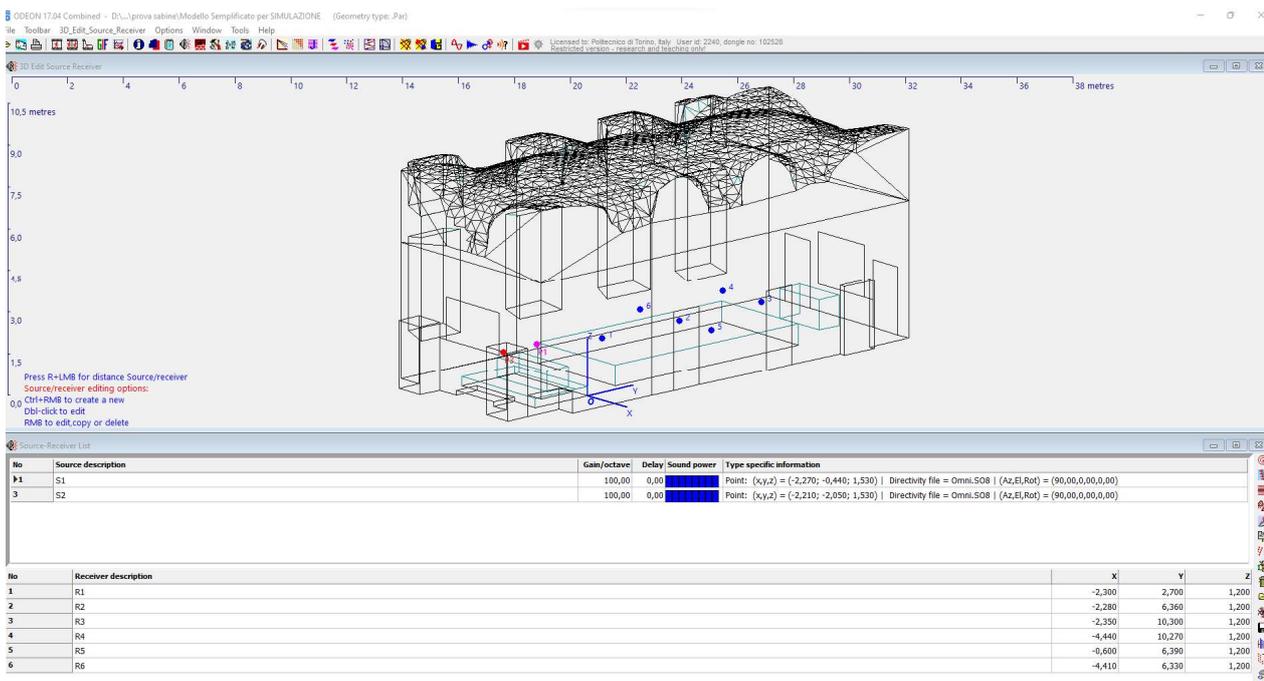
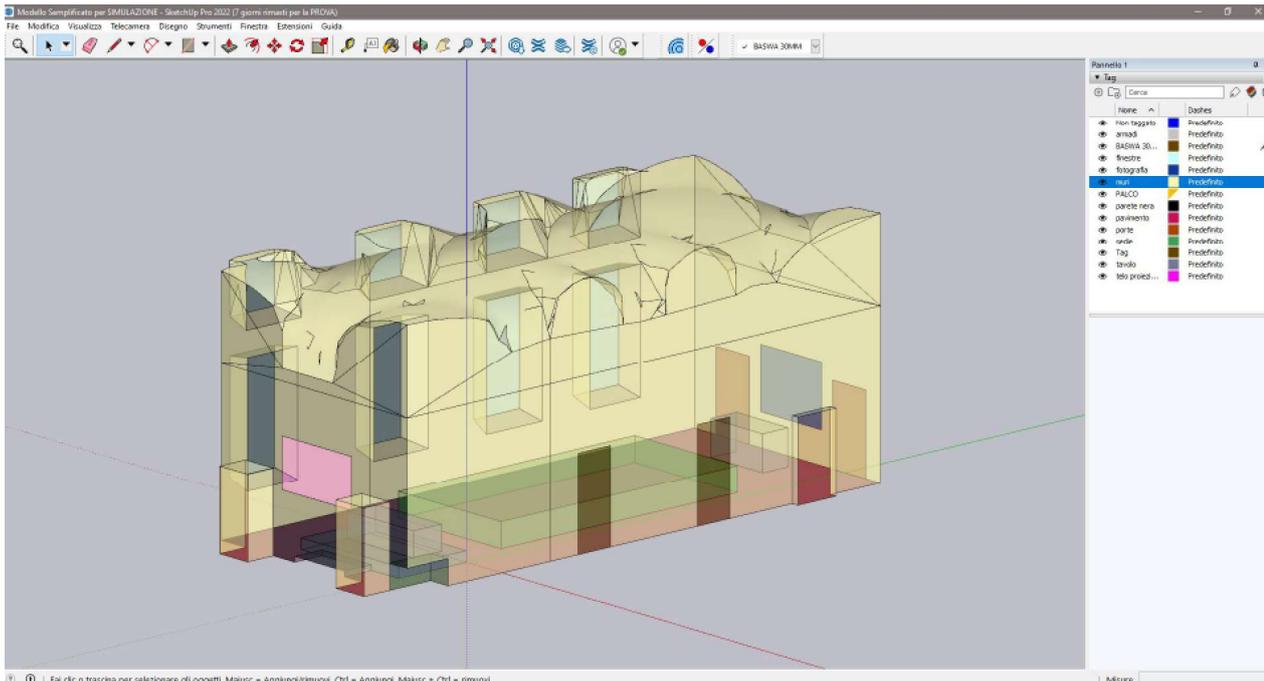
Questa soglia, di intelleggibilità della geometria di partenza è stata dunque il secondo parametro, di carattere indubbiamente più qualitativo.

Successivamente la geometria semplificata è stata importata su Rhinoceros, così da collimarne le estremità al resto del modello già creato, a sua volta rettificato nelle proporzioni e nei dettagli confrontandolo con il modello

mesh ottenuto dalla scansione laser, che ha fornito anche la base geometrica per la creazione delle geometrie dell'intervento di correzione acustica.

Importato nuovamente il file .skp nello spazio di lavoro Sketchup è stato possibile esportare il nuovo metamodello per la simulazione acustica relativa alla calibrazione.

Fig 4.5.1.1.10 e 11
 Schermata dello spazio di lavoro Sketchup, Modello acustico preliminare con volta elaborata dalla scansione.
 Schermata dello spazio di lavoro Odeon, Modello acustico preliminare con volta elaborata dalla scansione.



4.5.1.2 Iterazioni e validazione

Una volta ottenuto il modello geometrico adatto alla simulazione, occorre assegnare ai layers definiti i materiali corrispondenti nello spazio di lavoro ODEON, nel modello utilizzato sono stati impostati layers:

- **Muri:** tutte le porzioni intonacate
- **Finestre:** per le quali si è scelto di non modellare gli infissi in legno, la cui superficie era minima rispetto alla porzione vetrata
- **Pavimento**
- **Parete Nera:** la parete nord est che era stata trattata con intonaco acustico con forte assorbimento a 1000 Hz in un intervento precedente
- **Tavolo:** assegnato ai materiali in legno dell'arredo, al palco, alla scrivania sovrastante quest'ultimo ed alla scrivania in prossimità della parete sud ovest, in fondo alla sala, che ospita i comandi d'illuminazione, audio e video della sala
- **Porte:** la cui trasmissione è stata considerata nell'assorbimento
- **Telo proiezione:** il telo alle spalle del palco, considerato come un pannello vibrante a frequenze medie
- **Fotografia:** elemento d'arredo alle spalle della scrivania con i comandi
- **Armadi:** nicchie presenti nella parete nord ovest, considerate come pannelli vibranti
- **Sedie:** le sedute del pubblico, in pelle imbottita e metallo.

Il software dispone di una sua libreria già ben fornita e implementabile, nella quale si possono trovare vari materiali tipici come intonaco, marmo, legno ecc..

Nel corso delle numerose iterazioni i materiali assegnati ai layers sono stati cambiati nelle loro caratteristiche di assorbimento in bande di ottava, o sostituiti con altri, fino ad ottenere una corrispondenza con le misure effettuate. Di seguito, i valori degli assorbimenti e di scattering assegnati nella prima simulazione.

Fig 4.5.1.2.1
Schermate ricomposte in
schema dello spazio di lavoro
ODEON,
Valori di assorbimento della
prova "S00"

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	$\alpha(w)$	Class
armadi	0.04000	0.04000	0.05000	0.05000	0.08000	0.04000	0.06000	0.03000	0.10000	Not classified
finestre	0.08000	0.08000	0.04000	0.03000	0.03000	0.02000	0.02000	0.02000	0.05000	Not classified
fotografia	0.42000	0.42000	0.21000	0.10000	0.08000	0.06000	0.06000	0.06000	0.10(L)	Not classified
sedie	0.40000	0.40000	0.50000	0.58000	0.61000	0.58000	0.50000	0.50000	0.60000	C
muri	0.04000	0.04000	0.05000	0.05000	0.08000	0.04000	0.06000	0.03000	0.10000	Not classified
parete nera	0.01000	0.01000	0.01000	0.05000	0.35000	0.18000	0.09000	0.09000	0.15000	E
pavimento	0.02000	0.02000	0.02000	0.02000	0.02000	0.03000	0.03000	0.03000	0.05000	Not classified
porte	0.14000	0.14000	0.10000	0.08000	0.08000	0.08000	0.08000	0.07000	0.10000	Not classified
tavolo	0.40000	0.40000	0.30000	0.20000	0.17000	0.15000	0.10000	0.10000	0.20(L)	E
telo proiezione	0.42000	0.42000	0.21000	0.10000	0.08000	0.06000	0.06000	0.06000	0.10(L)	Not classified

Il processo iterativo, che in questa fase non richiede variazioni delle geometrie è descritto dal seguente schema:

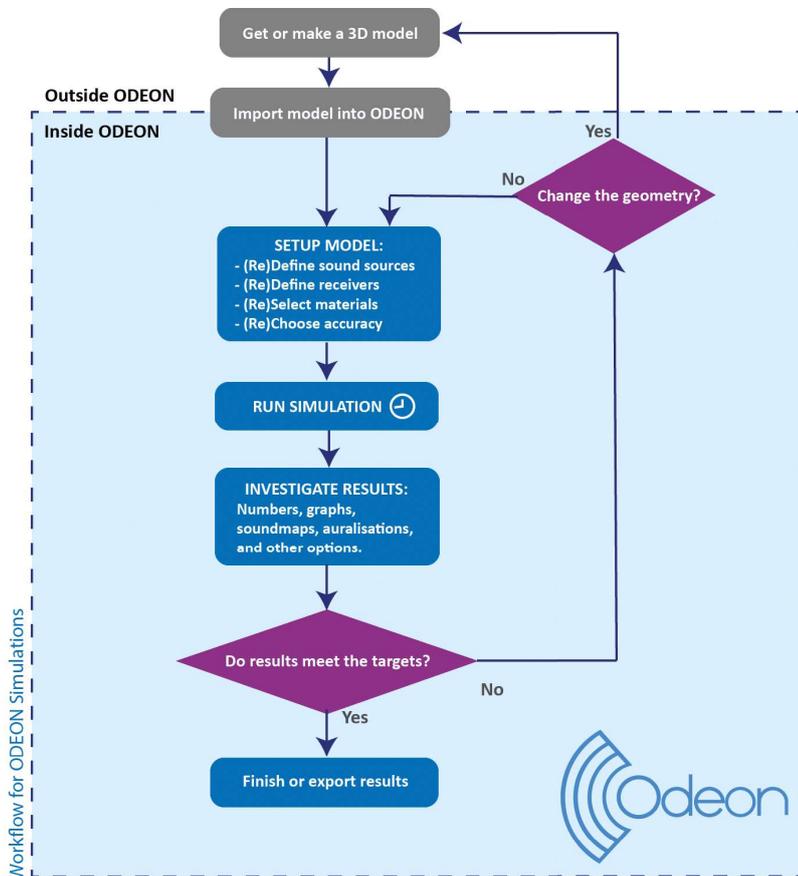


Fig 4.5.1.2.2
Schema del processo iterativo delle modifiche al modello per eseguire simulazioni acustiche in ODEON.
<https://odeon.dk>

Si è scelto di selezionare 7 variazioni significative nelle impostazioni di simulazione per le quali sono riportati i valori di assorbimento dei materiali assegnati: dalla prima (pag. precedente) simulazione (S00) a quella validata (S06), con relativi parametri simulati confrontati con le misure (Fig.)

Fig 4.5.1.2.3
Schermate ricomposte in schema dello spazio di lavoro ODEON, Valori di assorbimento della prova "S01"

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	$\alpha(w)$	Class
armadi	0.04000	0.04000	0.05000	0.05000	0.08000	0.04000	0.06000	0.03000	0.10000	Not classified
finestre	0.08000	0.08000	0.04000	0.03000	0.03000	0.02000	0.02000	0.02000	0.05000	Not classified
fotografia	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	Not classified
sedie	0.40000	0.40000	0.50000	0.58000	0.61000	0.58000	0.50000	0.50000	0.60000	C
muri	0.03800	0.03800	0.04700	0.04700	0.07600	0.03800	0.05700	0.02800	0.10000	Not classified
parete nera	0.01000	0.01000	0.01000	0.05000	0.35000	0.18000	0.09000	0.09000	0.15000	E
pavimento	0.02000	0.02000	0.02000	0.02000	0.02000	0.03000	0.03000	0.03000	0.05000	Not classified
porte	0.14000	0.14000	0.10000	0.08000	0.08000	0.08000	0.08000	0.07000	0.10000	Not classified
tavolo	0.40000	0.40000	0.30000	0.20000	0.17000	0.15000	0.10000	0.10000	0.20(L)	E
telo proiezione	0.42000	0.42000	0.21000	0.10000	0.08000	0.06000	0.06000	0.06000	0.10(L)	Not classified

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	$\alpha(w)$	Class
armadi	0.04000	0.04000	0.05000	0.05000	0.08000	0.04000	0.06000	0.03000	0.10000	Not classified
finestre	0.08000	0.08000	0.04000	0.03000	0.03000	0.02000	0.02000	0.02000	0.05000	Not classified
fotografia	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	Not classified
sedie	0.40000	0.40000	0.50000	0.58000	0.61000	0.58000	0.50000	0.50000	0.60000	C
muri	0.03600	0.03600	0.04500	0.04500	0.07200	0.03600	0.05400	0.02600	0.05000	Not classified
parete nera	0.01000	0.01000	0.01000	0.05000	0.35000	0.18000	0.09000	0.09000	0.15000	E
pavimento	0.02000	0.02000	0.02000	0.02000	0.02000	0.03000	0.03000	0.03000	0.05000	Not classified
porte	0.14000	0.14000	0.10000	0.08000	0.08000	0.08000	0.08000	0.07000	0.10000	Not classified
tavolo	0.40000	0.40000	0.30000	0.20000	0.17000	0.15000	0.10000	0.10000	0.20(L)	E
telo proiezione	0.42000	0.42000	0.21000	0.10000	0.08000	0.06000	0.06000	0.06000	0.10(L)	Not classified

Fig 4.5.1.2.4
Schermate ricomposte in schema dello spazio di lavoro ODEON, Valori di assorbimento della prova "S02"

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	$\alpha(w)$	Class
armadi	0.02000	0.02000	0.03000	0.04000	0.05000	0.03000	0.04000	0.02000	0.05000	Not classified
finestre	0.08000	0.08000	0.04000	0.03000	0.03000	0.02000	0.02000	0.02000	0.05000	Not classified
fotografia	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	Not classified
sedie	0.40000	0.40000	0.50000	0.58000	0.61000	0.58000	0.50000	0.50000	0.60000	C
muri	0.02000	0.02000	0.03000	0.04000	0.05000	0.03000	0.04000	0.02000	0.05000	Not classified
parete nera	0.01000	0.01000	0.01000	0.05000	0.35000	0.18000	0.09000	0.09000	0.15000	E
pavimento	0.01000	0.01000	0.01000	0.01300	0.01500	0.02000	0.02000	0.02000	0.00000	Not classified
porte	0.12000	0.12000	0.08000	0.07000	0.07000	0.07000	0.07000	0.06000	0.05(L)	Not classified
tavolo	0.40000	0.40000	0.30000	0.20000	0.17000	0.15000	0.10000	0.10000	0.20(L)	E
telo proiezione	0.42000	0.42000	0.21000	0.10000	0.08000	0.06000	0.06000	0.06000	0.10(L)	Not classified

Fig 4.5.1.2.5
Schermate ricomposte in schema dello spazio di lavoro ODEON, Valori di assorbimento della prova "S03"

Le prime prove fino alla quarta, (S03), come visibile anche dai risultati riportati dai grafici seguenti, presentano risultati simili, anche in virtù della cautela iniziale nel variare i valori di assorbimento rispetto a quelli iniziali.

I valori simulati risultano di molto inferiori per quanto riguarda il tempo di riverberazione, parametro di controllo principale a questo punto della calibrazione.

Fig 4.5.1.2.6
Schermate ricomposte in schema dello spazio di lavoro ODEON, Valori di assorbimento della prova "S04"

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	$\alpha(w)$	Class
armadi	0.01000	0.01000	0.02000	0.03000	0.02000	0.01500	0.02000	0.01000	0.05000	Not classified
finestre	0.08000	0.08000	0.04000	0.03000	0.03000	0.02000	0.02000	0.02000	0.05000	Not classified
fotografia	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	Not classified
sedie	0.20000	0.22000	0.32000	0.31000	0.31000	0.33000	0.22000	0.13000	0.30000	D
muri	0.01000	0.01000	0.02000	0.03000	0.02000	0.01500	0.02000	0.01000	0.05000	Not classified
parete nera	0.01000	0.01000	0.01000	0.05000	0.35000	0.18000	0.09000	0.09000	0.15000	E
pavimento	0.01000	0.01000	0.01000	0.01300	0.01500	0.02000	0.02000	0.02000	0.00000	Not classified
porte	0.12000	0.12000	0.08000	0.07000	0.07000	0.07000	0.07000	0.06000	0.05(L)	Not classified
tavolo	0.40000	0.40000	0.30000	0.20000	0.17000	0.15000	0.10000	0.10000	0.20(L)	E
telo proiezione	0.42000	0.42000	0.21000	0.10000	0.08000	0.06000	0.06000	0.06000	0.10(L)	Not classified

Come visibile nella tabella precedente, nella quinta prova (S04), si è scelto di abbassare di molto tutti i valori di assorbimento, ottenendo risultati di T_{30} superiori, seppur non eccessivamente, a quelli misurati. Il valore con minore corrispondenza è nella banda dei 1000 Hz, per i quali si è scelto di intervenire nel layer muri, il cui peso specifico, vista la quantità di superficie, risulta essere il più rilevante nel calcolo.

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	$\alpha(w)$	Class
armadi	0.04000	0.04000	0.05000	0.05000	0.08000	0.06000	0.06000	0.03000	0.10000	Not classified
finestre	0.08000	0.08000	0.04000	0.03000	0.03000	0.02000	0.02000	0.02000	0.05000	Not classified
fotografia	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	Not classified
sedie	0.20000	0.22000	0.32000	0.31000	0.31000	0.33000	0.22000	0.13000	0.30000	D
muri	0.01200	0.01300	0.02100	0.03300	0.03500	0.01700	0.01200	0.01000	0.05000	Not classified
parete nera	0.01000	0.01000	0.01000	0.05000	0.35000	0.18000	0.09000	0.09000	0.15000	E
pavimento	0.01000	0.01000	0.01000	0.01500	0.01600	0.01300	0.01200	0.01200	0.00000	Not classified
porte	0.12000	0.12000	0.08000	0.07000	0.07000	0.07000	0.07000	0.06000	0.05(L)	Not classified
tavolo	0.40000	0.40000	0.30000	0.20000	0.17000	0.15000	0.10000	0.10000	0.20(L)	E
telo proiezione	0.42000	0.42000	0.21000	0.10000	0.08000	0.06000	0.06000	0.06000	0.10(L)	Not classified

Fig 4.5.1.2.7
Schermate ricomposte in schema dello spazio di lavoro ODEON, Valori di assorbimento della prova "S05"

La sesta prova (S05) riporta dei risultati quasi in linea con la misurazione, eccetto per le bande dei 4000 HZ (discrepanza comune per entrambe le sorgenti) e dei 62,5 e 125 Hz, dove i risultati evidenziano ancora tempi di riverberazione lunghi per le simulazioni della seconda sorgente.

Operando sugli assorbimenti alle basse frequenze in aree localizzate come gli armadi e le porte, e ridistribuendo l'assorbimento di muri e sedute del pubblico, è stato possibile ottenere una corrispondenza soddisfacente nella settima simulazione (S06).

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	$\alpha(w)$	Class
armadi	0.12000	0.14000	0.12000	0.10000	0.08000	0.06000	0.06000	0.03000	0.10000	Not classified
finestre	0.14000	0.12000	0.10000	0.08000	0.06000	0.05000	0.03000	0.03000	0.10000	Not classified
fotografia	0.42000	0.42000	0.21000	0.10000	0.08000	0.06000	0.06000	0.06000	0.10(L)	Not classified
sedie	0.22000	0.22000	0.24000	0.22000	0.20000	0.18000	0.14000	0.12000	0.20(L)	E
muri	0.01700	0.01800	0.02700	0.04600	0.05000	0.03800	0.03400	0.03200	0.05000	Not classified
parete nera	0.01000	0.01000	0.01000	0.05000	0.35000	0.18000	0.09000	0.09000	0.15000	E
pavimento	0.01000	0.01000	0.01000	0.01500	0.01600	0.01300	0.01200	0.01200	0.00000	Not classified
porte	0.16000	0.11000	0.08000	0.06000	0.06000	0.05000	0.03000	0.02000	0.05(L)	Not classified
tavolo	0.40000	0.31000	0.28000	0.22000	0.19000	0.15000	0.10000	0.10000	0.20(L)	E
telo proiezione	0.42000	0.42000	0.21000	0.10000	0.08000	0.06000	0.06000	0.06000	0.10(L)	Not classified

Fig 4.5.1.2.8
Schermate ricomposte in schema dello spazio di lavoro ODEON, Valori di assorbimento della prova "S06"

Di seguito, i grafici con i valori dei parametri calcolati nelle 7 simulazioni riportate, confrontati con i dati misurati.

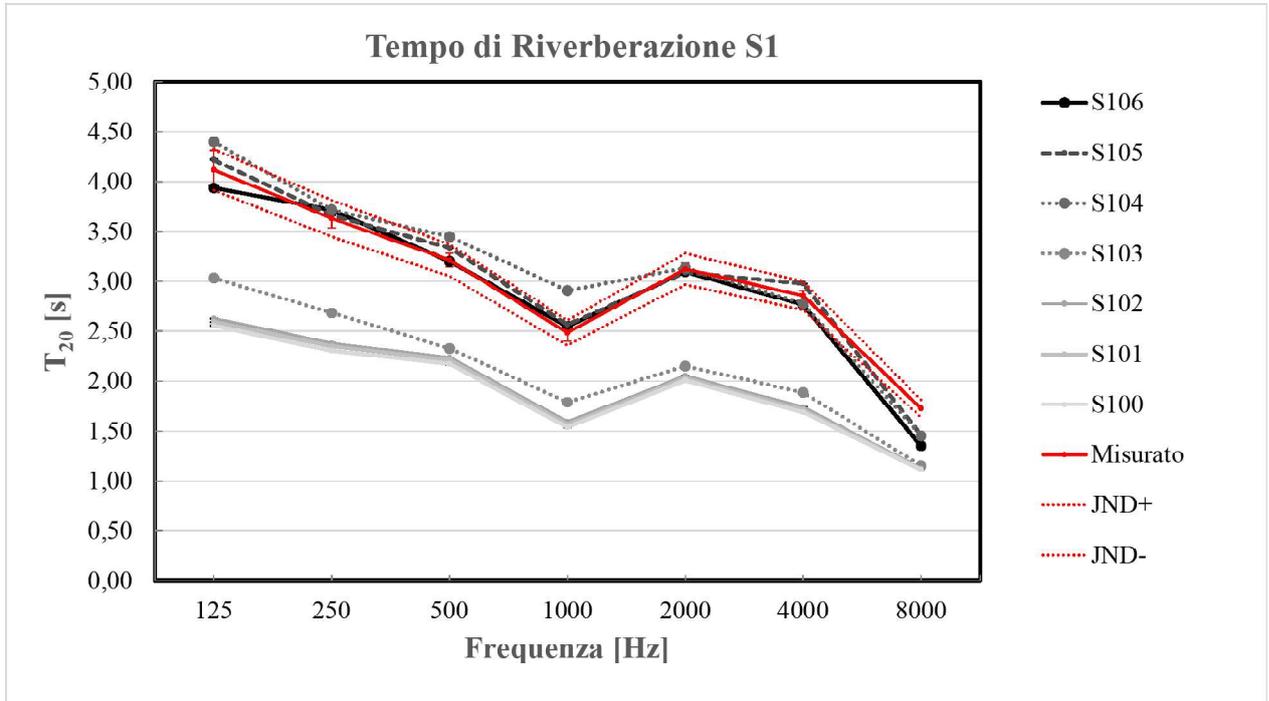
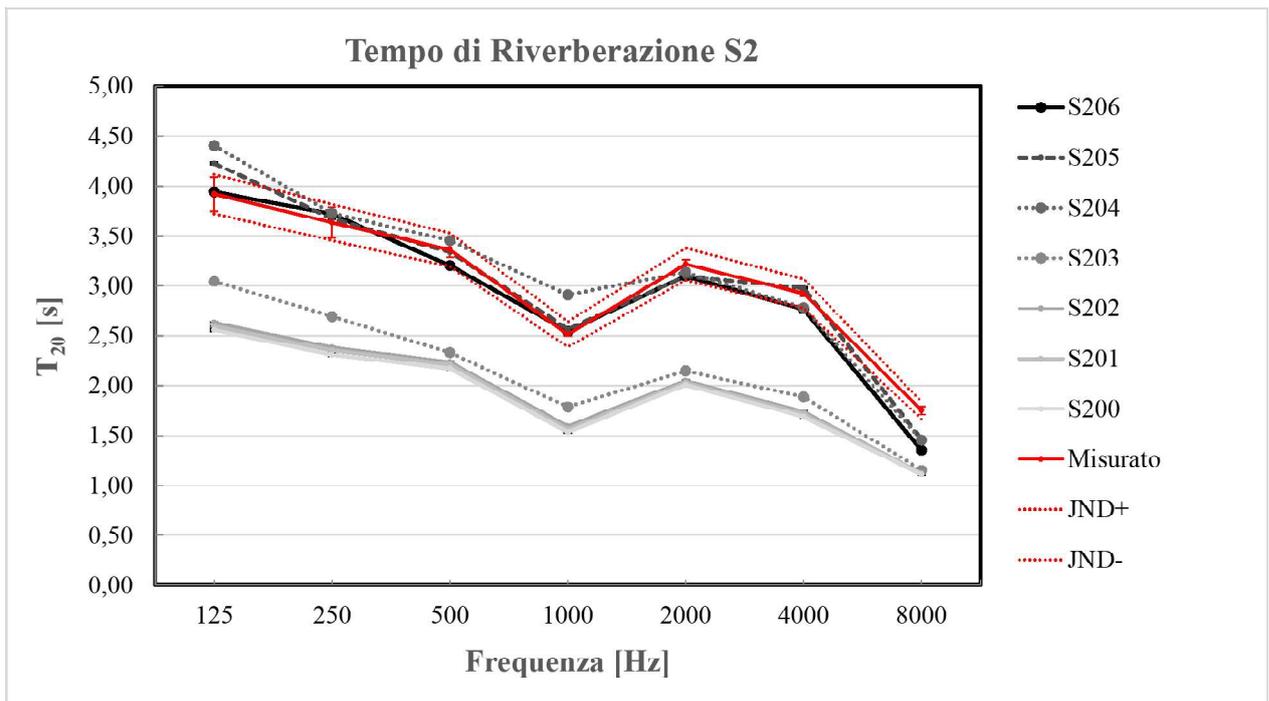


Fig 4.5.1.2.A1
Grafico del tempo di riverberazione T_{20} con i risultati delle simulazioni relativo alla Sorgente 1

Fig 4.5.1.2.A2
Grafico del tempo di riverberazione T_{20} con i risultati delle simulazioni relativo alla Sorgente 2



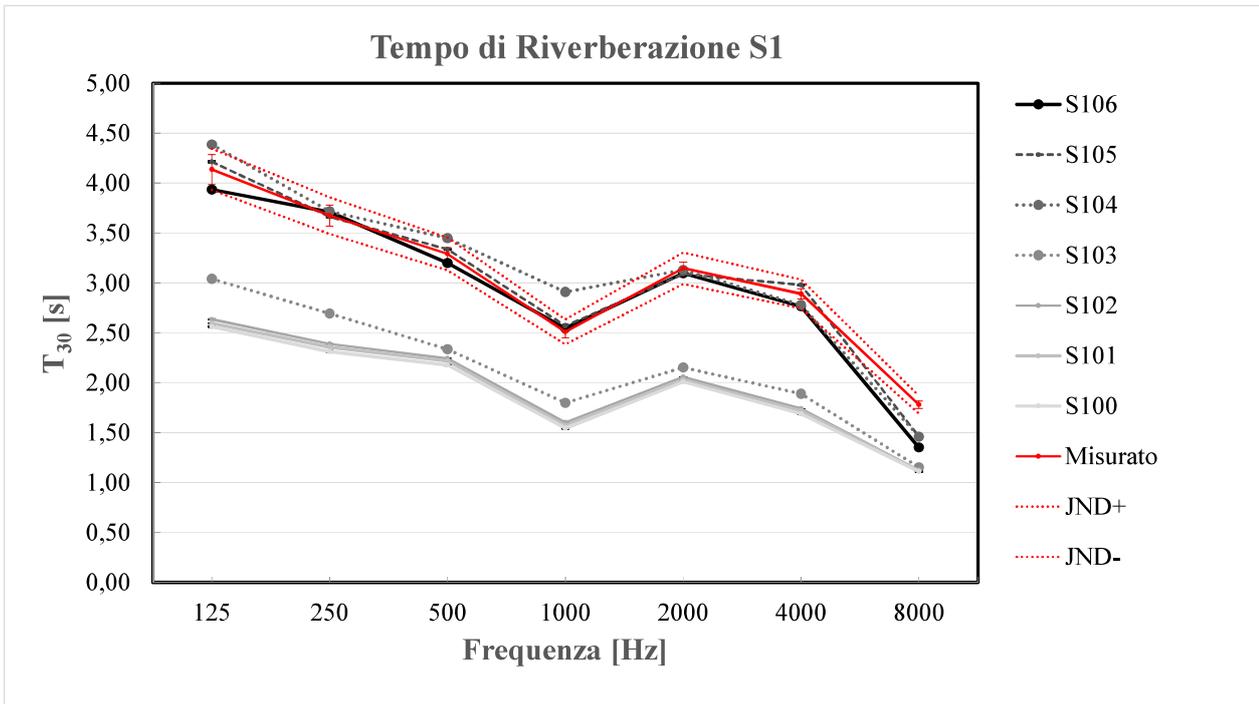
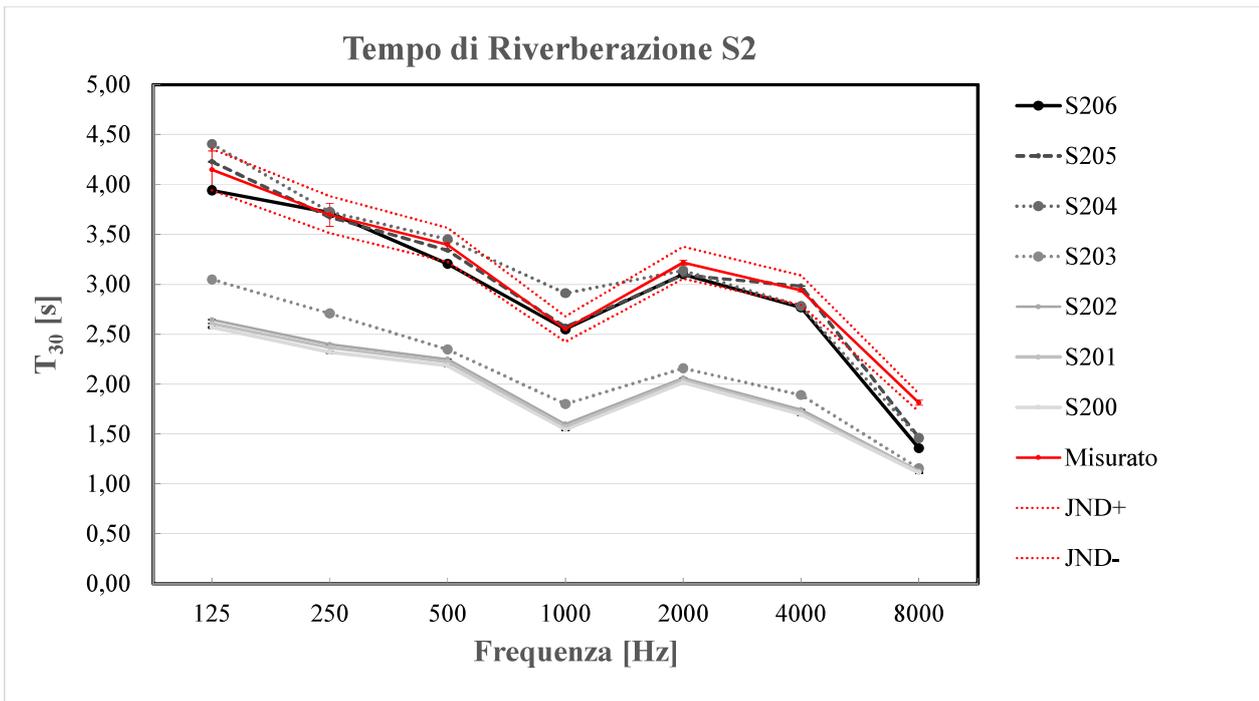


Fig 4.5.1.2.B1
 Grafico del tempo di riverberazione T_{30} con i risultati delle simulazioni relativo alla Sorgente 1

Fig 4.
 Grafico del tempo di riverberazione T_{30} con i risultati delle simulazioni relativo alla Sorgente 2



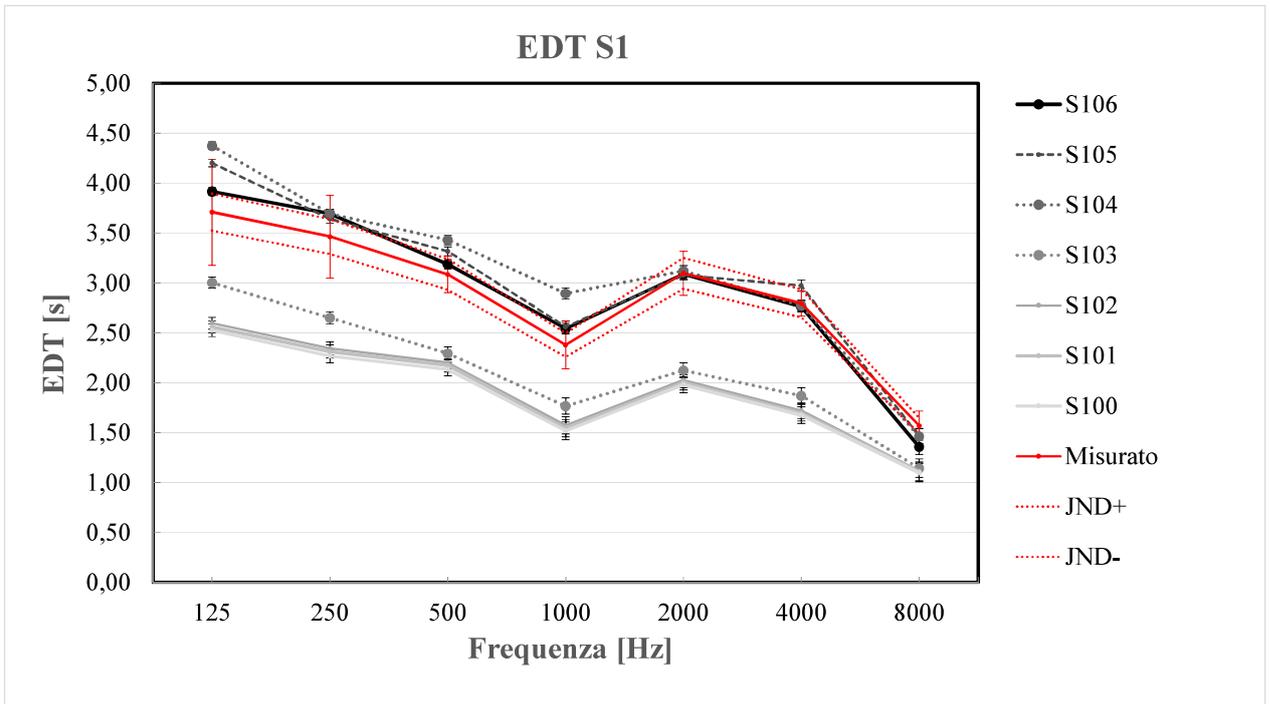
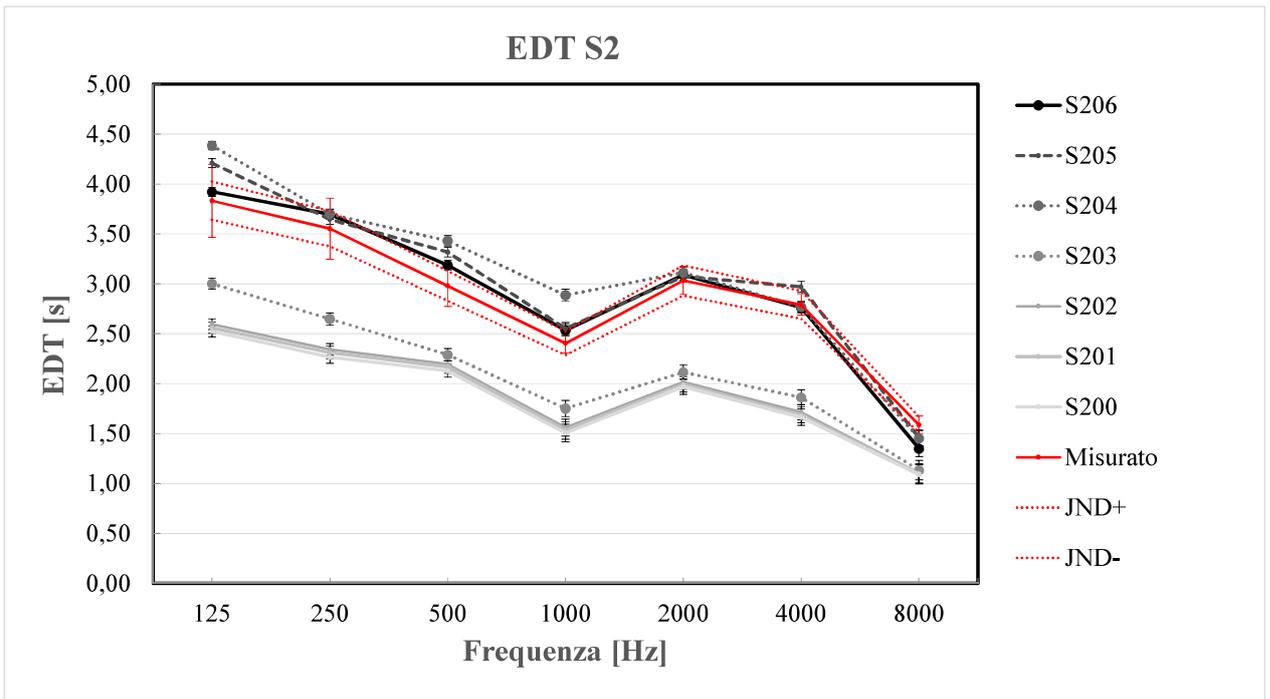


Fig 4.
Grafico del tempo di riverberazione EDT con i risultati delle simulazioni relativo alla Sorgente 1

Fig 4.
Grafico del tempo di riverberazione EDT con i risultati delle simulazioni relativo alla Sorgente 2



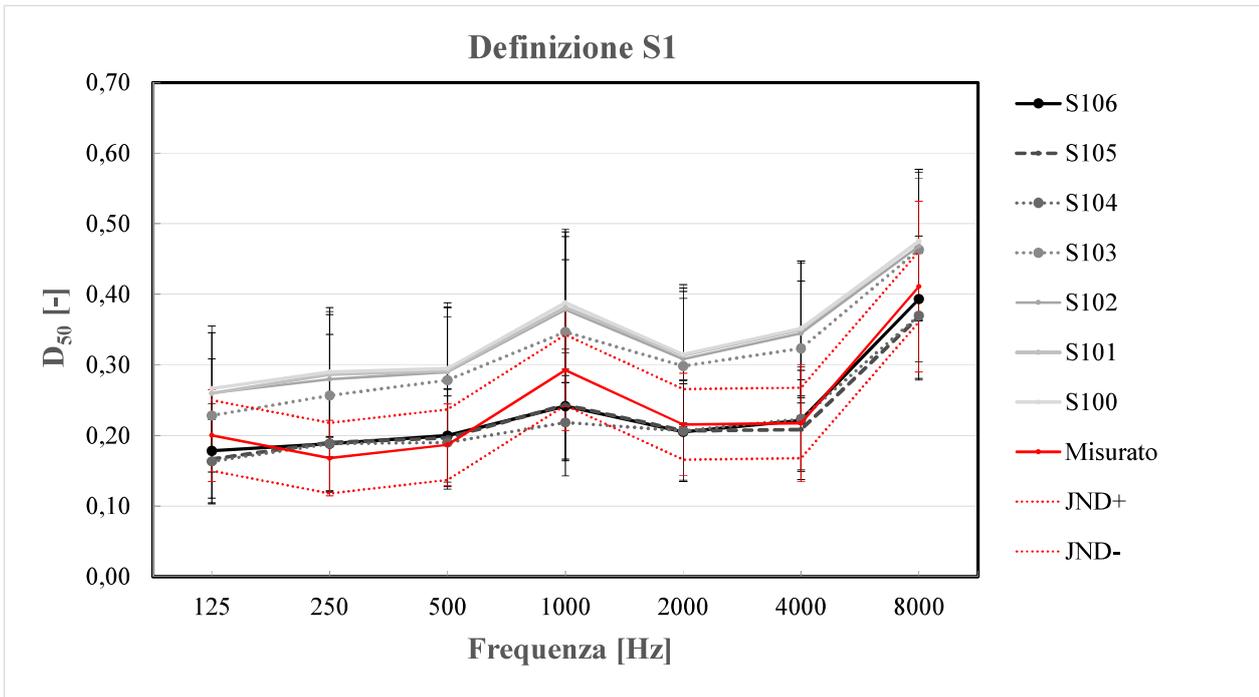
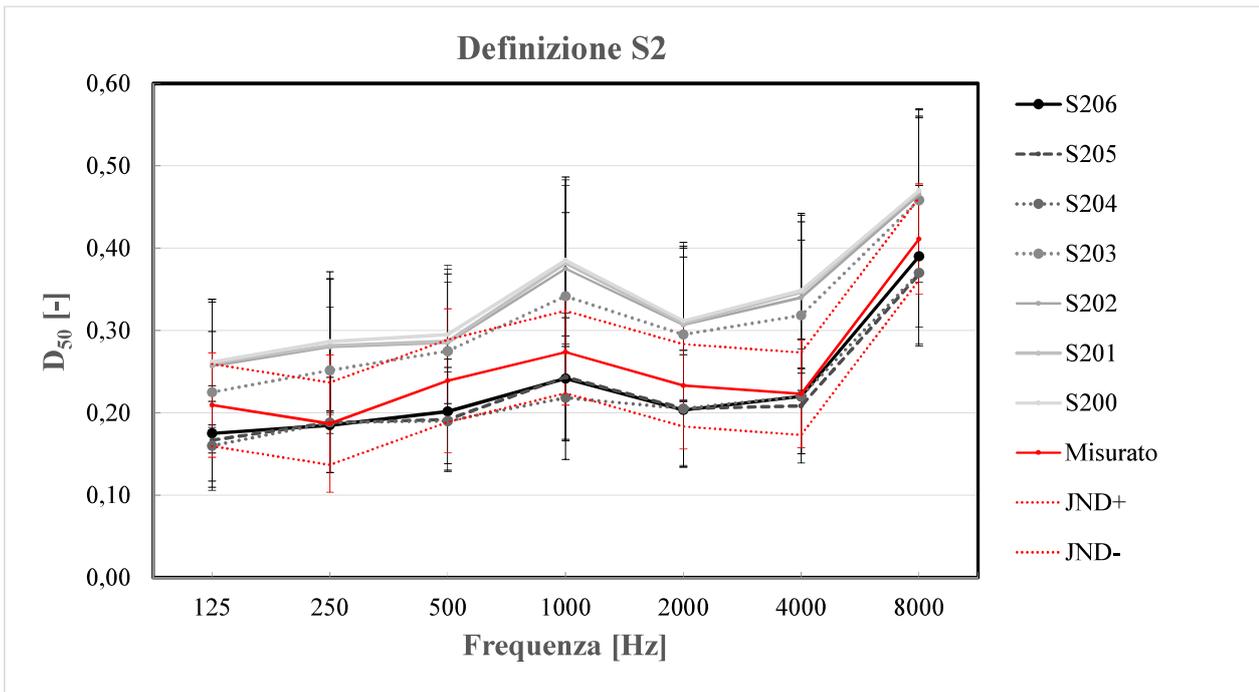


Fig 4.
Grafico del tempo di riverberazione D_{50} con i risultati delle simulazioni relativo alla Sorgente 1

Fig 4.
Grafico del tempo di riverberazione D_{50} con i risultati delle simulazioni relativo alla Sorgente 2



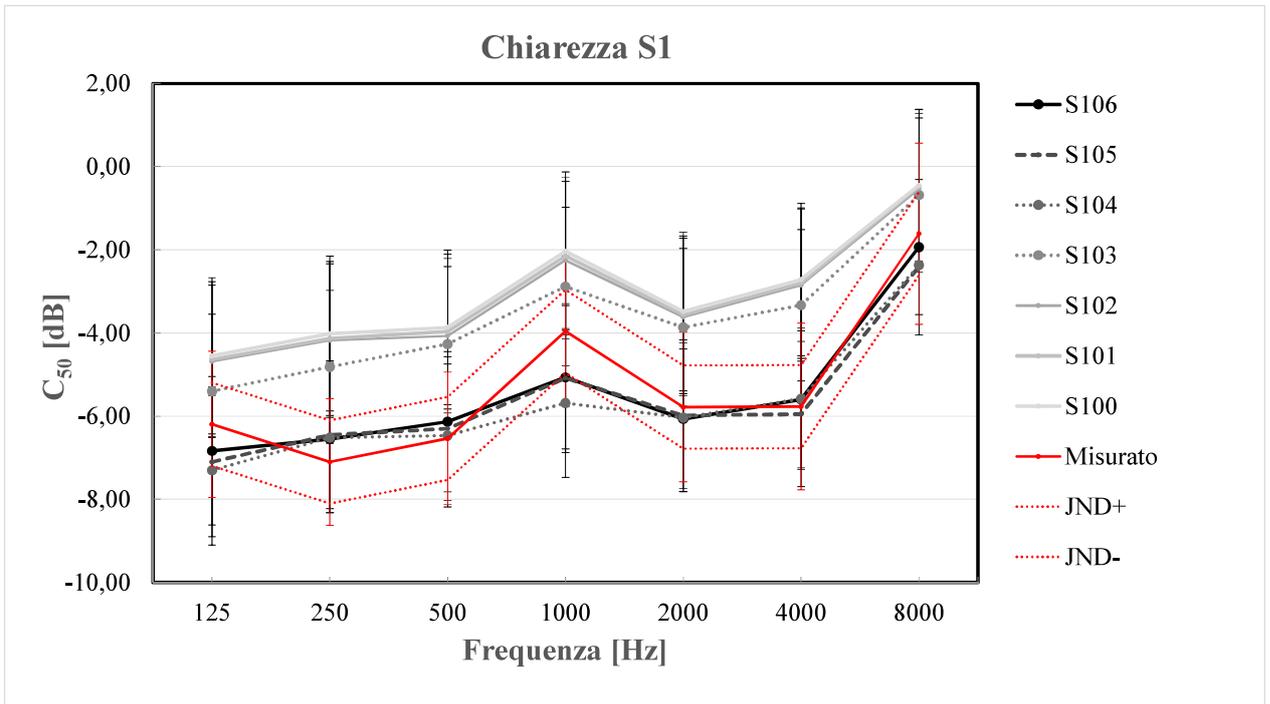
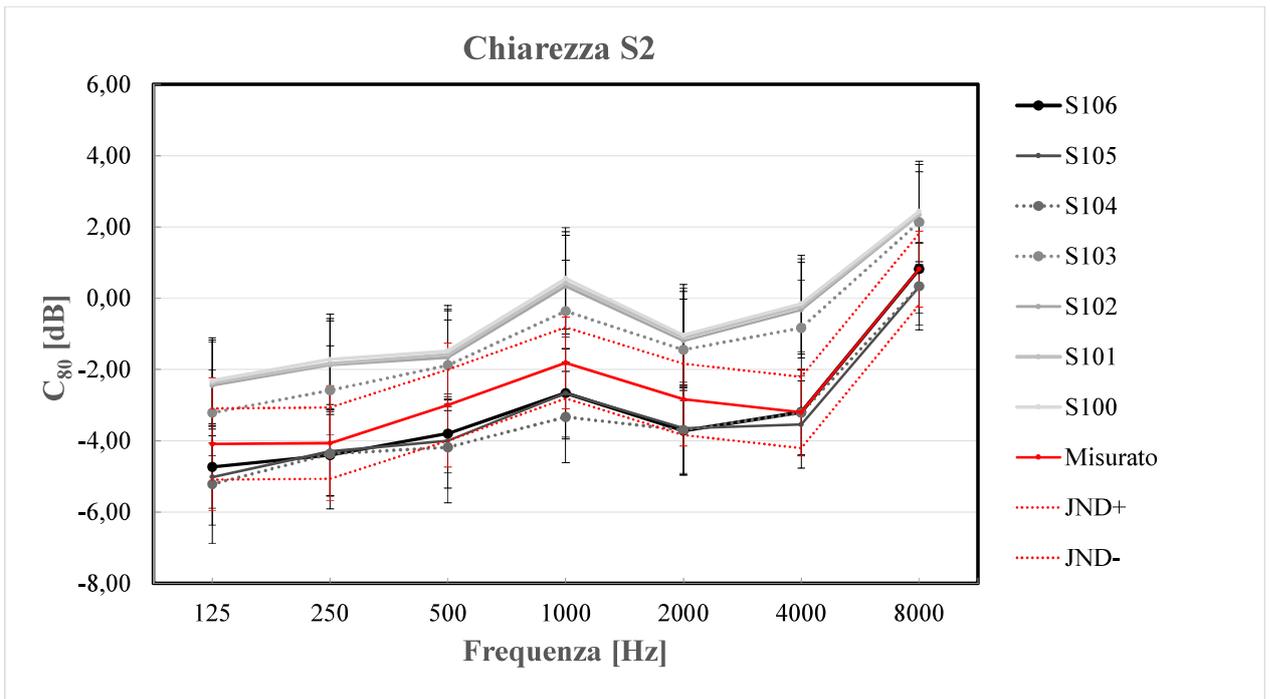


Fig 4.
Grafico del tempo di riverberazione C_{50} con i risultati delle simulazioni relativo alla Sorgente 1

Fig 4.
Grafico del tempo di riverberazione C_{50} con i risultati delle simulazioni relativo alla Sorgente 2



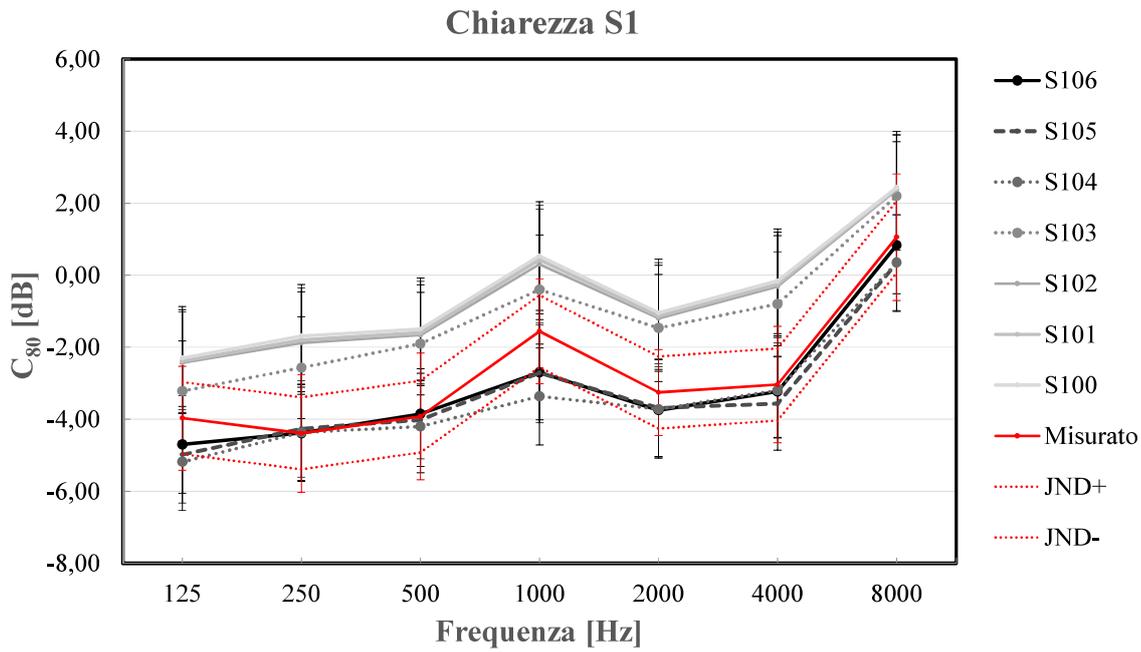
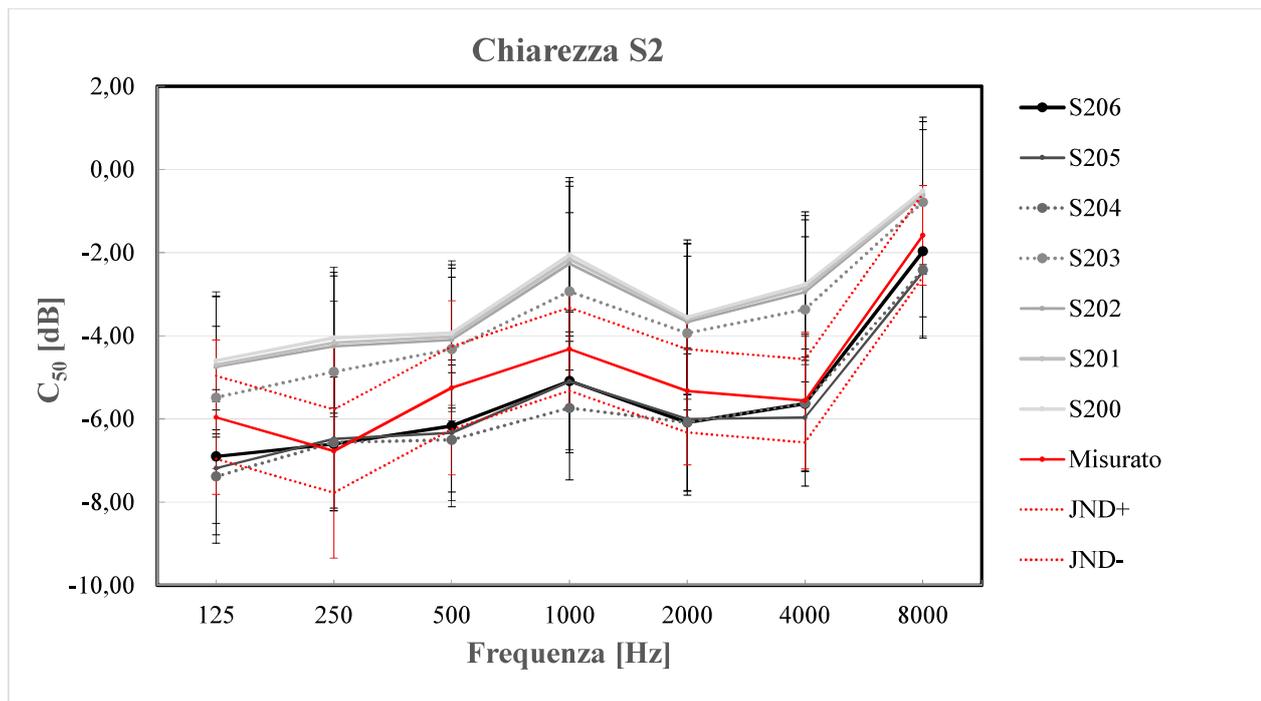


Fig 4.
Grafico del tempo di riverberazione C_{80} con i risultati delle simulazioni relativo alla Sorgente 1

Fig 4.
Grafico del tempo di riverberazione C_{80} con i risultati delle simulazioni relativo alla Sorgente 2



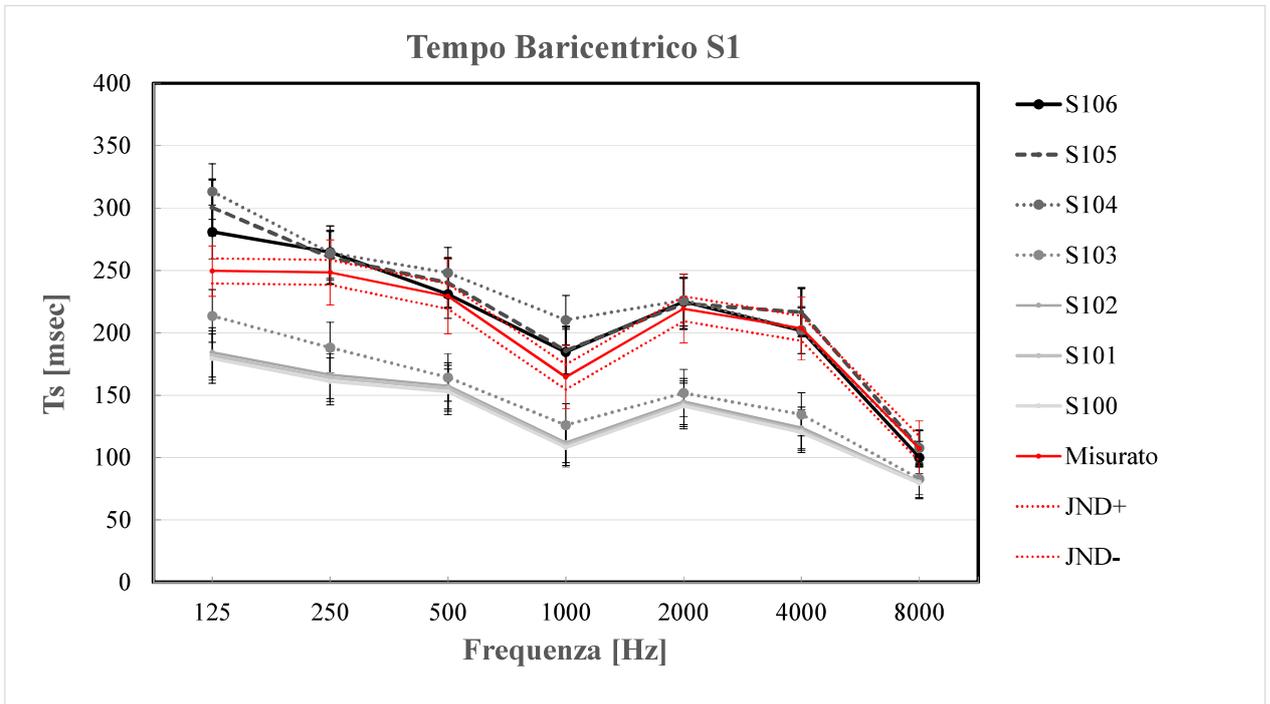
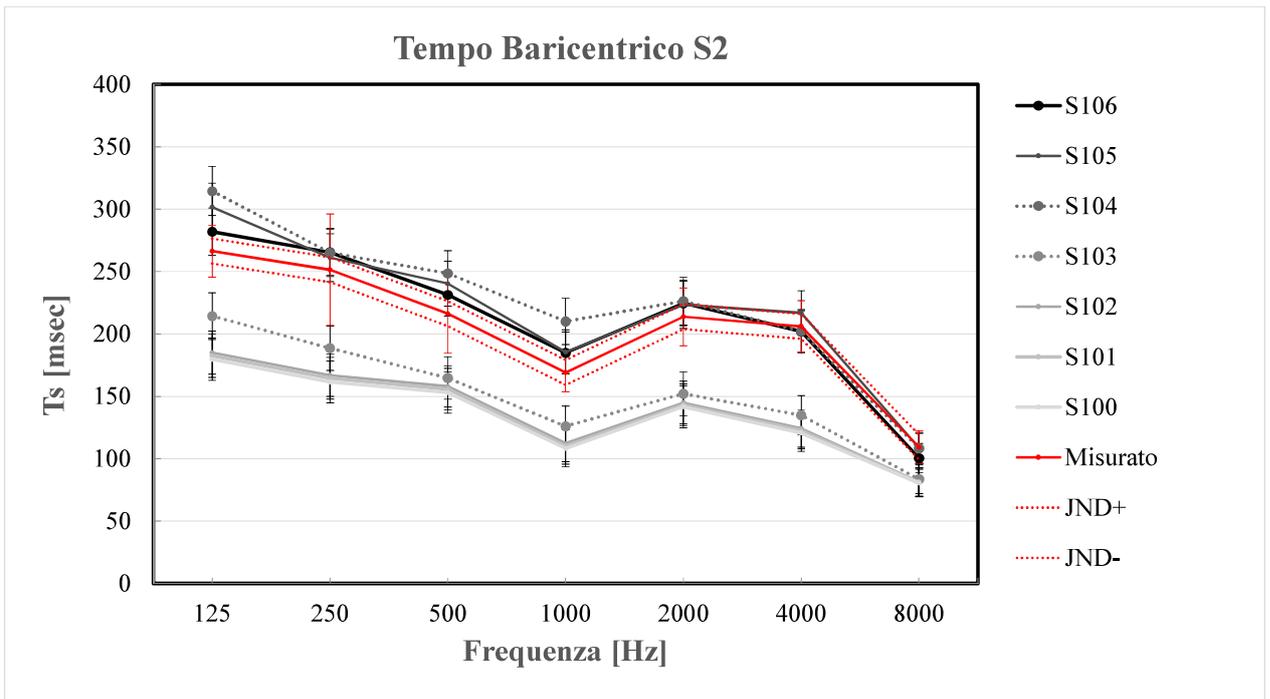


Fig 4.
Grafico del tempo di riverberazione T_s con i risultati delle simulazioni relativo alla Sorgente 1

Fig 4.
Grafico del tempo di riverberazione T_s con i risultati delle simulazioni relativo alla Sorgente 2



Bibliografia

Agisoft LLC. (2023). Agisoft Metashape user manual: Professional edition, version 2.0. Agisoft LLC.

Álvarez-Morales, L.; Lopez, M.; Álvarez-Corbacho, Á. (2020). The Acoustic Environment of York Minster's Chapter House. *Acoustics*, 2, 13-36. <https://doi.org/10.3390/acoustics2010003>

Campanella, C., & Kirova, T. (2000). Dal rilievo architettonico, al rilievo materico patologico. Problemi di codificazione e possibili criteri. In C. Cundari & L. Carnevali (Eds.), *Il rilievo dei beni architettonici per la conservazione* (pp. 324-333). Kappa Ed.

Cheng, L., Chen, S., Liu, X., Xu, H., Wu, Y., Li, M., & Chen, Y. (2018). Registration of laser scanning point clouds: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146, 1-20.

Xu, N., Qin, R., & Song, S. (2023). Point cloud registration for LiDAR and photogrammetric data: A critical synthesis and performance analysis on classic and deep learning algorithms. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 188, 1-16.

Christensen, L. C., Koutsouris G., Rindel H. J. (2013). The ISO 3382 parameters: Can we simulate them? Can we measure them?. *International Symposium on Room Acoustics 2013*.

Christensen, L. C., Rindel H. J. (2005). A new scattering method that combines roughness and diffraction effects. *Forum Acusticum 2005 Budapest*

Faro Technologies Inc. (2023). *SCENE classic manual*. Faro Technologies Inc.

Guastamacchia, A.; Rosso, R.G.; Puglisi, G.E.; Riente, F.; Shtrepi, L.; Astolfi, A. Real and Virtual Lecture Rooms: Validation of a Virtual Reality System for the Perceptual Assessment of Room Acoustical Quality. *Acoustics 2024*, 6, 933–965. <https://doi.org/10.3390/acoustics6040052>

Hanke, K., Grussenmeyer, P., & Streilein, A. (2002). *Digital photogrammetry* (M. Kasser & Y. Egels, Eds.). Wichmann Verlag.

Moyano, J., Nieto-Julián, J.E., Bienvenido-Huertas, D. and Marín-García, D., (2020) Validation of Close-Range Photogrammetry for Architectural and Archaeological Heritage: Analysis of Point Density and 3D Mesh Geometry, Remote Sensing (MDPI)

Nuttens, T., De Maeyer, P., De Wulf, A., Goossens, R., & Stal, C. (2011). Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry for cultural heritage: An accuracy assessment. *Heritage Studies Journal*, 5(2), 123-134.

Romano, G., & Dardanello, G. (1993). *Torino 1675-1699: Strategie e conflitti del Barocco*, Cassa di risparmio di Torino

Scovazzo, S., (2020) *L'esposizione universale di torino 1911: rilievo fotogrammetrico e modellazione 3d per applicazioni di realtà virtuale* (Tesi di laurea Magistrale, Politecnico di Torino). Webthesis. <https://webthesis.biblio.polito.it/16705/1/tesi.pdf>

Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J. and Reynolds J.M., (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, Elsevier.com

Wu, C., Yuan, Y., Tang, Y., & Tian, B. (2021). Application of terrestrial laser scanning (TLS) in the architecture, engineering and construction (AEC) industry. *Journal of Construction and Engineering Technology*, 15(3), 205-220.

Sitografia

<https://www.accademiadelle scienze.it>

<https://docs.blender.org/manual/>

https://www.canon.it/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/eos_5ds_r/specifications/

<https://www.meisterdrucke.it/stampe-d-arte>

<https://www.museogizio.it>

<https://www.nti-audio.com/en/news/xl2-sound-level-meter-calibration-according-to-iec61672>

<https://odeon.dk/download/Version18/OdeonManual.pdf>

<https://www.panasonic.com/it/consumer/fotocamere-e-videocamere/fotocamere-lumix-g/dmc-gh4eg-k.specs.html>

<https://www.parrot.com/assets/s3fs-public/2021-02/anafi-product-sheet-white-paper-en.pdf>

https://www.researchgate.net/figure/premiere-source-laser-realisee-par-T-Maiman-29_fig8_331935853

<http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/produktdetail/product/scanner/48/>

<https://www.topografi.it/strumenti/prodotto/faro-focus-s-150/>

<https://www.treccani.it/enciclopedia/stereoscopia>

Progetto di correzione acustica

5

5.1 Condizioni acustiche ottimali della sala, vuota e occupata

In riferimento alla norma UNI 11532-2:2020, che fornisce linee guida per la progettazione acustica degli ambienti destinati all'ascolto del parlato, i parametri di riferimento per il progetto di correzione acustica sono:

- Il tempo di riverberazione (T_{30})
- Indice di chiarezza (C_{50})
- Speech Transmission Index (STI)

(D'Orazio, 2020)

Tuttavia, per ambienti il cui volume è superiore a 250 m^3 , si applica solo lo STI (UNI, 2020), verrà considerato il valore di C_{50} a titolo di confronto aggiuntivo.

5.1.1 Tempo di riverberazione T_{30}

I valori di T_{30} forniti dalla simulazione si riferiscono alla sala vuota, troviamo nella norma i riferimenti per il range di valori ottimali di tempo di riverberazione riferiti alla sala occupata per almeno l'80% della capienza, visibile in Fig. 5.1.1.1.

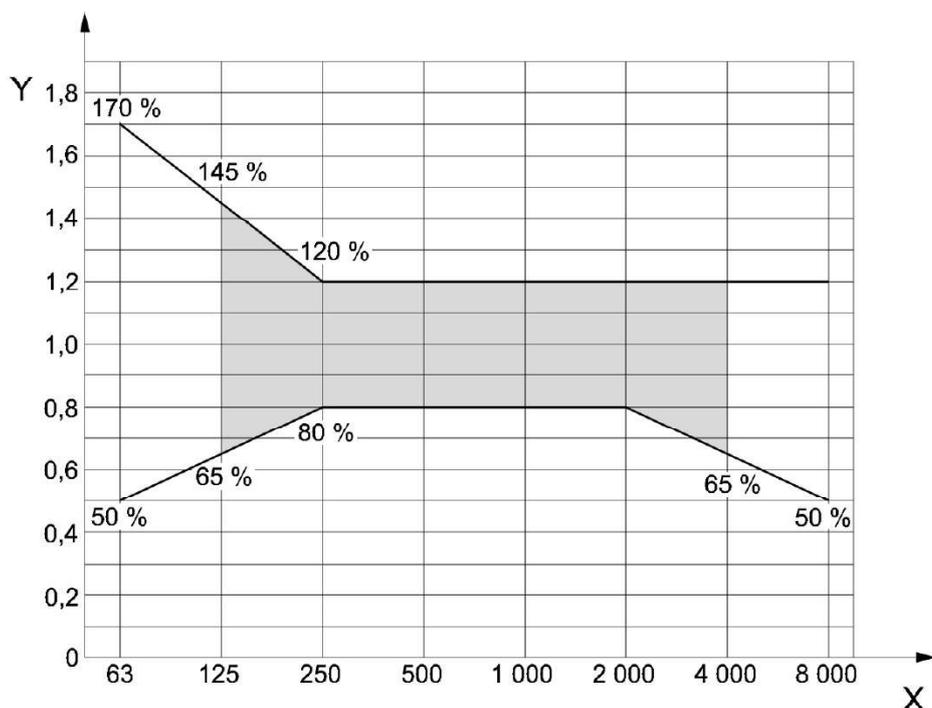


Fig. 5.1.1.1
Andamento ed intervallo
di conformità del tempo
di riverberazione TR in
funzione della frequenza
per le categorie da A1
a A4
UNI 11532-2

Al fine di ottenere il range di riferimento per la sala vuota, si calcoleranno i valori di TR con la formula presente in normativa:

$$T_{inocc} = \frac{T_{occ}}{\left(1 - T_{occ} \frac{\Delta A_{pers}}{0.16V}\right)}$$

dove:

T_{occ} Tempo di riverberazione ottimale per l'ambiente occupato all'80%, in secondi

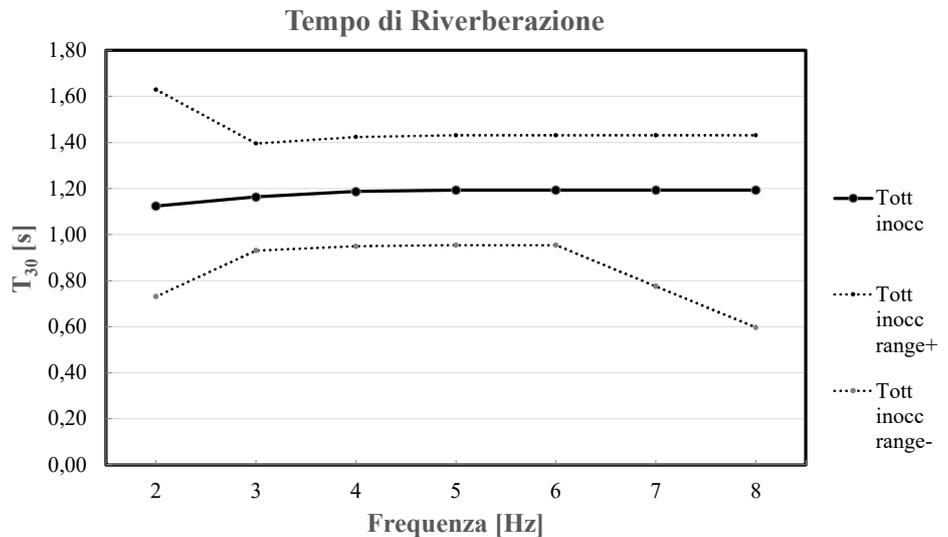
T_{inocc} Tempo di riverberazione ottimale ad ambiente non occupato (risultato della misurazione), in secondi

V Volume dell'ambiente, in metri cubi

ΔA_{pers} Superficie aggiuntiva equivalente di assorbimento acustico delle persone, in metri quadrati (UNI, 2020).

Ottenendo così questi valori di riferimento:

Fig. 5.1.1.A
Andamento ed intervallo di conformità del tempo di riverberazione T_{30} ottimale in ambiente inoccupato in funzione della frequenza per le categorie da A1 a A4



5.1.2 Indice di Chiarezza C_{50}

Da normativa, il valore di riferimento per l'indice di chiarezza ottimale che si applica alle categorie A1, A2, A3 e A4 è $C_{50} \geq 2$ (UNI, 2020).

Fig. 5.1.2.1
Valori di riferimento per l'indice di chiarezza C_{50} UNI 11532-2:2020

Senza impianto di amplificazione	di	< 250 m ³ ≥ 2 dB
----------------------------------	----	--------------------------------

5.1.2 Speech Transmission Index STI

Da normativa, il valore di riferimento per lo Speech Transmission Index ottimale che si applica alle categorie A1, A2, A3 e A4 è riportato nella seguente tabella:

	< 250 m ³	≥ 250 m ³
Senza impianto di amplificazione o con impianto spento	≥ 0,55 con segnale di emissione ad 1 m in asse alla sorgente pari a 60 dB(A).	≥ 0,50 con segnale di emissione ad 1 m in asse alla sorgente pari a 70 dB(A).
Con impianto di amplificazione	≥ 0,60 con segnale di emissione come in normali condizioni d'uso dell'impianto di amplificazione	

*Fig. 5.1.2.1
Valori di riferimento per
lo Speech Transmission
Index STI
UNI 11532-2:2020*

(UNI, 2020).

5.2 Concept di progetto

Alla base del progetto di Correzione acustica vi è la necessità di fornire una superficie in grado di lavorare sul fronte d'onda, mantenendo una trasparenza per quanto riguarda la lettura delle geometrie esistenti nell'ambiente: trasparenza quindi, come linea guida.

Alla domanda: cosa rende trasparente lo spazio architettonico? Le risposte frequentemente indicano la presenza di assemblaggi in vetro nelle chiusure esterne. Tuttavia, negli insiemi architettonici, la trasparenza sensoriale è legata alla capacità di creare connessioni visive attraverso aperture e vuoti, indipendentemente dalla presenza del vetro. La trasparenza spaziale non è vincolata a uno stile architettonico particolare (è stata e continua ad essere espressa diversamente in vari tempi e luoghi); essa esiste anche in natura e nel paesaggio.

*Fig. 5.2.1
Trasparenza in un bosco
di eucalyptus
(Rosales, C., 2023)*



La trasparenza spaziale dipende da modi specifici di organizzare e percepire lo spazio, i materiali e la luce, che insieme generano una varietà di manifestazioni. Lo studio e l'uso di organizzazioni permeabili, stratificate o porose possono offrire ricche sequenze spaziali e complessità relazionali, qualità che generalmente migliorano l'esperienza dell'architettura e delle arti spaziali correlate.

La trasparenza architettonica richiede di considerare confini e continuità, anche se tenui o impliciti. Mentre l'opacità nasconde, la trasparenza negli edifici nasce dal desiderio di connettere percettivamente, penetrare otticamente o concettualmente, o entrambi. La trasparenza spaziale, inoltre, favorisce la connessione e la continuità visiva tra spazi permeabili, stratificati o porosi attraverso lacune o materiali trasparenti.

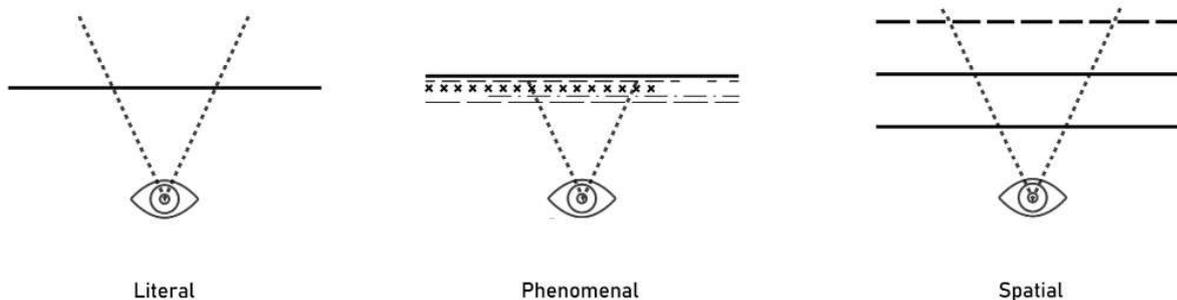
La trasparenza sensibile dipende tanto dalla forma, dai livelli di illuminazione e dai materiali che circondano l'apertura quanto dal vuoto che consente la percezione attraverso lo spazio. Può essere descritta come una qualità intrinseca di materiali e sostanze come vetro e acqua,

o come il risultato di configurazioni materiali permeabili a luce e visione, articolate da elementi opachi come reti o griglie.

Gli articoli intitolati “Transparency: Literal and Phenomenal”, Parti I e II, distinguono tra la trasparenza letterale (legata ai materiali fisici trasparenti come il vetro) e la trasparenza fenomenica (percepibile quando diversi strati o relazioni giustapposti vengono colti simultaneamente).

La trasparenza fenomenica, caratterizzata da strati e relazioni visive simultanee, viene contrapposta alla trasparenza letterale del vetro e dei materiali trasparenti (Rosales, C., 2023).

*Fig. 5.2.2
Schema con
percezione della
trasparenza
(Rosales, C., 2023)*



Così il progetto del sistema acustica intende procedere per mantenere l'intelligibilità delle geometrie dell'esistente.

Il volume opaco del sistema acustico, inteso come entità tridimensionale, attraverso la natura stessa dei pannelli sospesi - baffles - posizionati ortogonalmente alle superfici che delimitano l'ambiente, si traduce in una trasparenza che avviene attraverso una discretizzazione secondo porzioni longitudinali di quest'ultimo.

Partendo da questa prassi, alla base della stampa 3D - effettuata tramite layer di deposito di materiale - si può considerare di escludere le quantità di layers proporzionalmente al grado di discretizzazione nella definizione formale della geometria.



*Fig. 5.2.3
Stampa del busto di
Napoleone realizzato
con estrusore per stampa
ceramica
www.3dwasp.com*

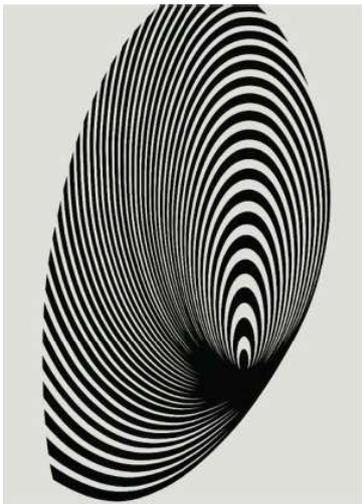


Fig. 5.2.4
 Franco Grignani
 (1908/1999)
 "diacronica 1 (53)"

Quel che ne deriva è dunque una rappresentazione del volume secondo porzioni discrete, che possono essere definite nei loro limiti dimensionali da linee geodetiche, parallele e unidimensionali in una vista prospettica, ma che definiscono una forma al variare della posizione dell'osservatore. Fondamentale quindi, la definizione di un volume interno, che sia definito da queste linee.

Kohlhaas Messebau GmbH & Co. KG nel progetto dello stand per l'EuroShop 2008, lavora sui volumi in quest'ottica.

Possiamo infatti leggere due volumi: quello parallelepipedo, esterno, e quello interno organico, che ricorda una gabbia toracica.

Lo stand di 85 metri quadrati, alto circa 4,5 metri, era composto da 27 partizioni in legno rivestite in tessuto, illuminate da un bagliore arancione che facesse percepire il volume tra il parallelepipedo esterno e il volume organico, vuoto, interno (Van Vleet, J., 2008).

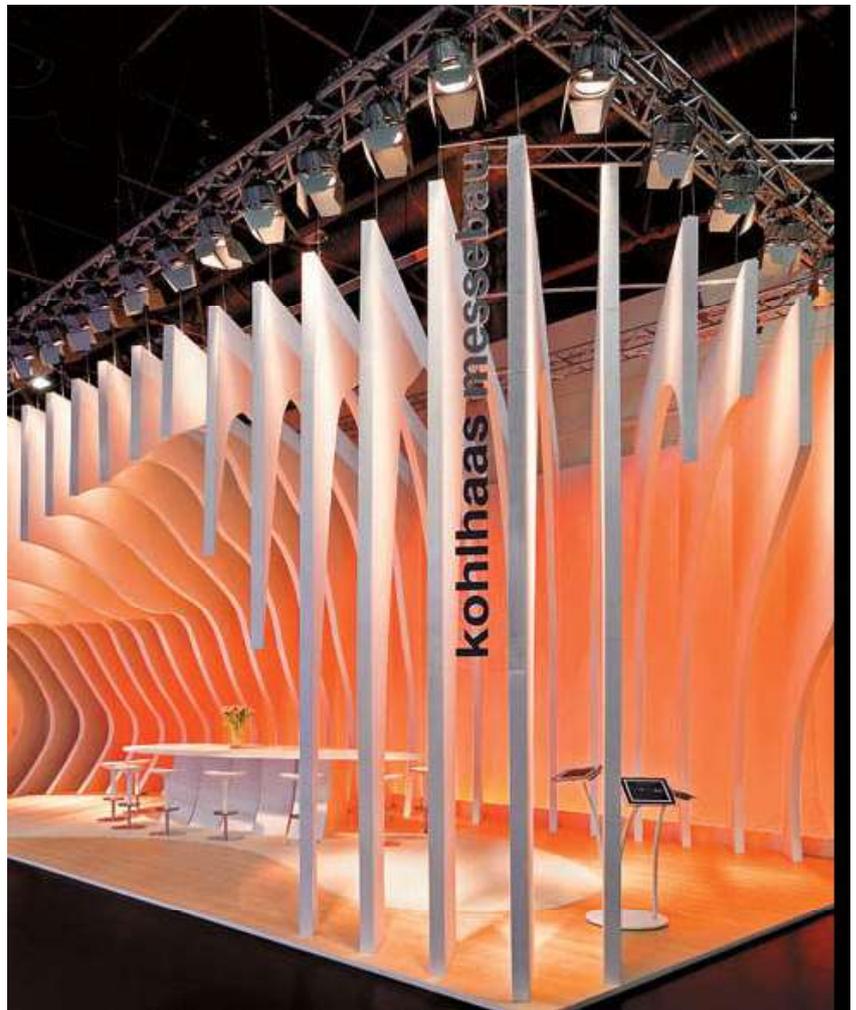


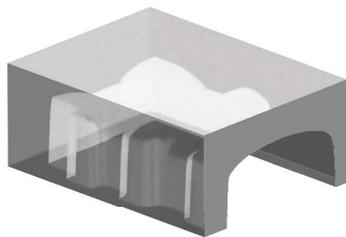
Fig. 5.2.5
 Stand di Kohlhaas
 Messebau GmbH
 & Co. KG, per
 l'Euroshop 2008

Fig. 5.2.6
 Pianta dello
 Stand di Kohlhaas
 Messebau GmbH
 & Co. KG



Per la definizione del volume interno si è voluto fare riferimento alla volta stessa, le cui imposte e intersezioni con le pareti caratterizzano l'ambiente.

la superficie interna della volta descrive il volume di vuoto che viene traslato e scalato, con un fattore di riduzione doppio per la parte alta dei baffles e singolo per la parte inferiore, coerentemente ai rapporti geometrici dei baffles stessi che delimiteranno il nuovo spazio.



Volume dell'ambiente interno



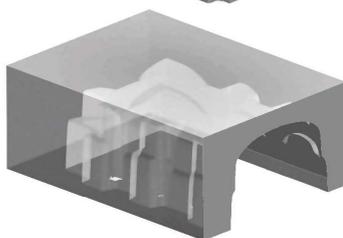
Prima scalatura del volume



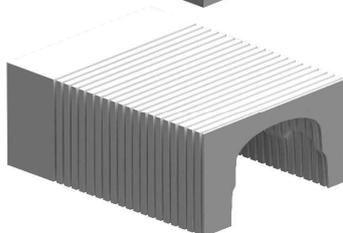
Seconda scalatura del volume



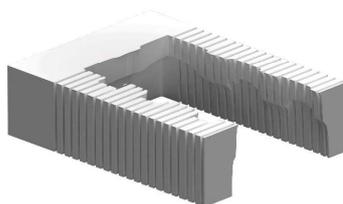
Composizione del calco derivante dalle due scalature



Vuoto volumico creato dal calco nel solido di riferimento, lo spazio tra i due vuoti



Discretizzazione del solido



Porzione mantenuta, spazio occupato dal sistema acustico

*Fig. 5.2.7
Schematizzazione del processo di creazione della forma del sistema acustico*

Il volume definito dallo spazio delimitato dai due offset della volta e della volta stessa diventa quindi il terreno di progettazione all'interno del quale sono le convergenze dei piani di definizione della geometria e le proporzioni dei profili della relativa discretizzazione che caratterizzeranno la cifra stilistica - per definizione d'intenti nelle sue interrelazioni parametrica - basata sulla performance degli elementi inseriti.

Il dialogo tra lo spazio dell'ambiente e del volume di progetto, per non lasciare che quest'ultimo definisca se stesso come interstiziale, dovrà imporre la sua presenza anche come positivo, come solido, e non solo come negativo, come calco.

Immaginando un velo che copre un solido polimorfico ricco di concavità, esso ne accompagnerà le depressioni, raccordando gli angoli che i vuoti creano sulla sua superficie: non sarà più lo spazio attorno al volume ad esprimere convessità nel riempirne gli interstizi, ma il solido stesso rispetto allo spazio attorno.

Di nuovo, geometricamente, attraverso l'uso degli angoli di raccordo si caratterizzerà l'identità del volume discretizzato sia come vuoto che come solido.



*Fig. 5.2.8
Soffitto di Bakery,
Gondomar, Portogallo,
Paulo Merlini, 2013
www.archdaily.com*

5.3 Progetto parametrico: Configurazione e criticità di interoperabilità dei programmi nell'individuazione dei parametri

la generazione dei baffle quindi si basa sulle prestazioni di assorbimento che le pareti laterali e di fondo devono avere per limitare le riflessioni indesiderate nell'ambiente.

Le simulazioni effettuate con Odeon non possono fornire dati in tempo reale a Grasshopper, in quanto occorrerebbe una simulazione “ciclica” che fornisca dati acustici che possano divenire parametro numerico tale da fornire a quest’ultimo le regole generative attraverso un’interoperabilità che dovrebbe prevedere il trasferimento continuo di dati tra le due interfacce.

Il metodo che adotteremo, dunque, deve essere per forza di cose iterativo, tale da tradurre i requisiti acustici, che assumeremo come ottimali, della porzione spaziale di intervento, in regole geometriche che possano descrivere la conformazione della superficie unitaria di sistema installato.

5.3.1 Impostazione geometrica delle aree di intervento

Prendendo in esame una suddivisione filologica delle caratteristiche riflettenti e assorbenti dell’ ambiente, dal punto di vista archetipico il progetto si configura con la porzione riflettente alle spalle della sorgente assunta come scatolare, i fianchi ed il fondo della sala ospiterà le superfici assorbenti fornite dal sistema di correzione acustica di progetto.

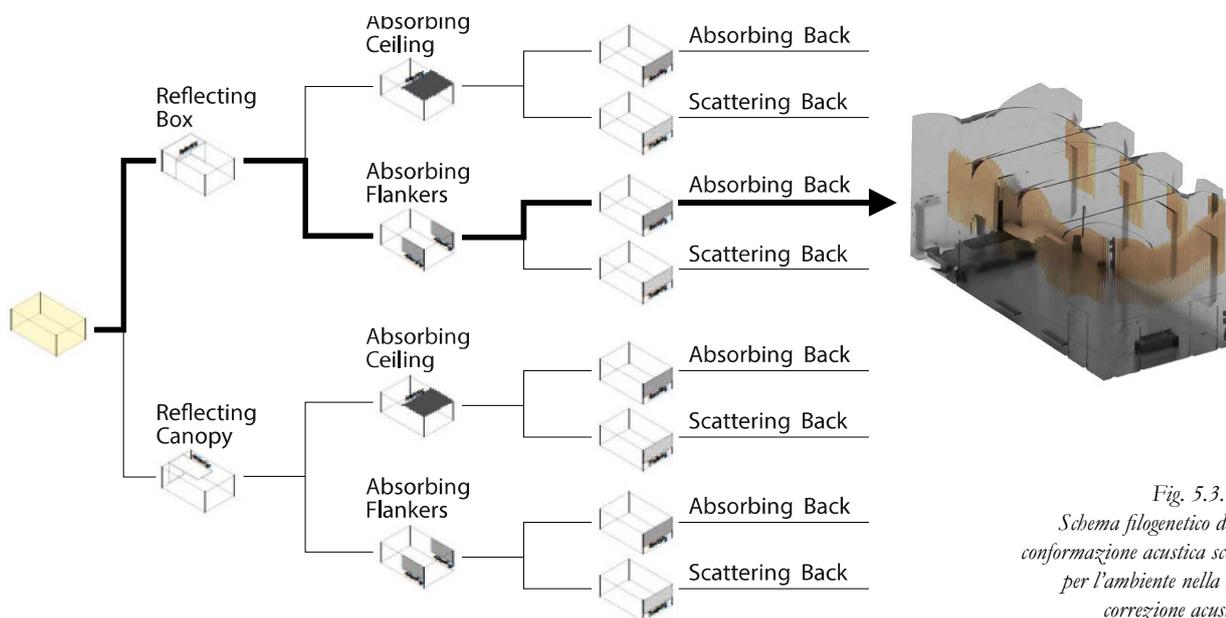
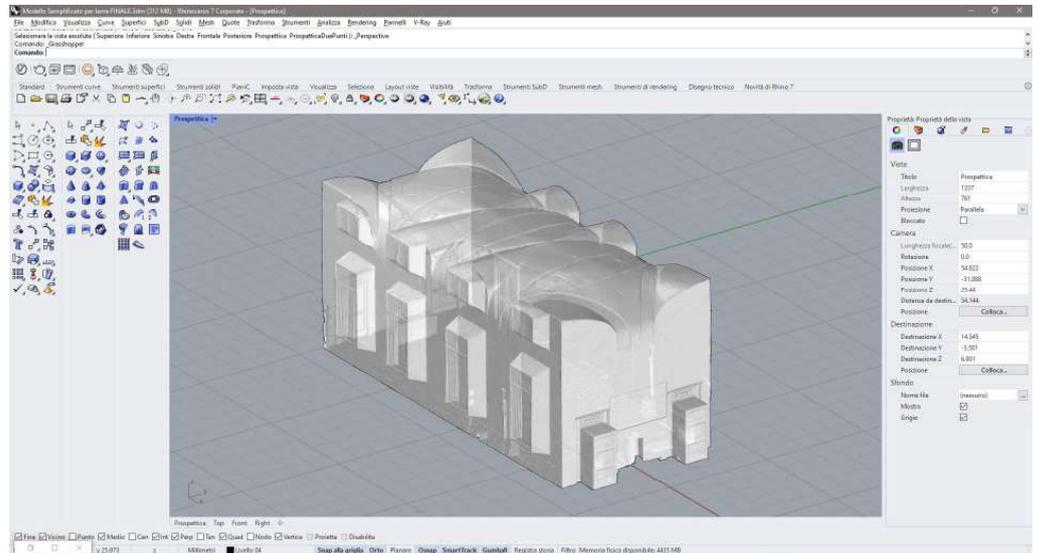


Fig. 5.3.1.1
*Schema filogenetico della
 conformazione acustica scelta
 per l’ambiente nella sua
 correzione acustica*

Partendo dal modello ottenuto dalla scansione laser, il primo passaggio è stata la sua importazione in formato .obj con relativo .mtl nello spazio di lavoro di Rhinoceros, definendo l'origine degli assi al centro della parete nord ovest.

Fig. 5.3.1.2
importazione del modello in Rhinoceros. Formato OBJ, con relativo MTL



Nello spazio di lavoro di Grasshopper, si è proceduto a generare una linea iniziale che definisse il profilo della metà della parete nordovest e nord est, con una distanza da esse ed un raccordo angolare gestibile attraverso degli slider visibili in Fig. 5.2.1.3.

Fig. 5.3.1.3
Vista in pianta della sala e generazione della linea iniziale

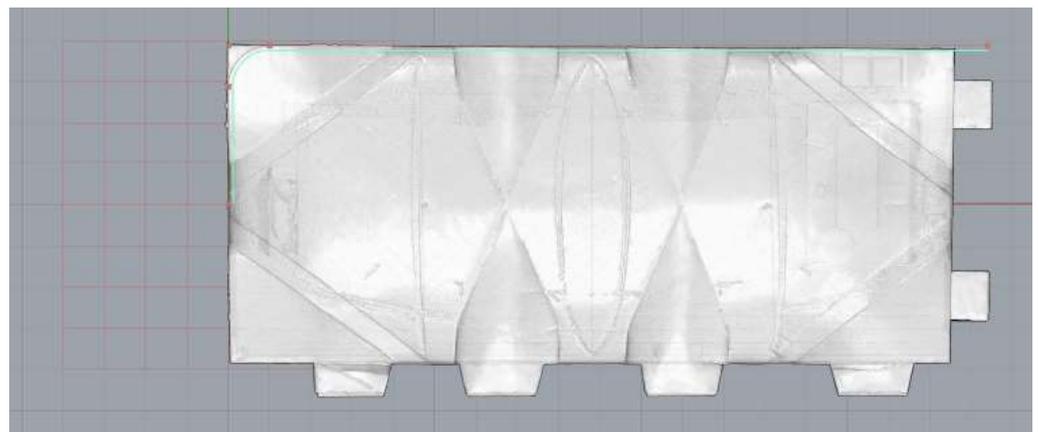
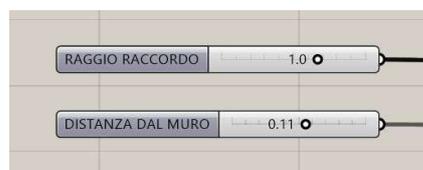


Fig. 5.3.1.4
Comandi slider di Grasshopper relativi ai valori quantitativi dei fattori di forma della linea iniziale

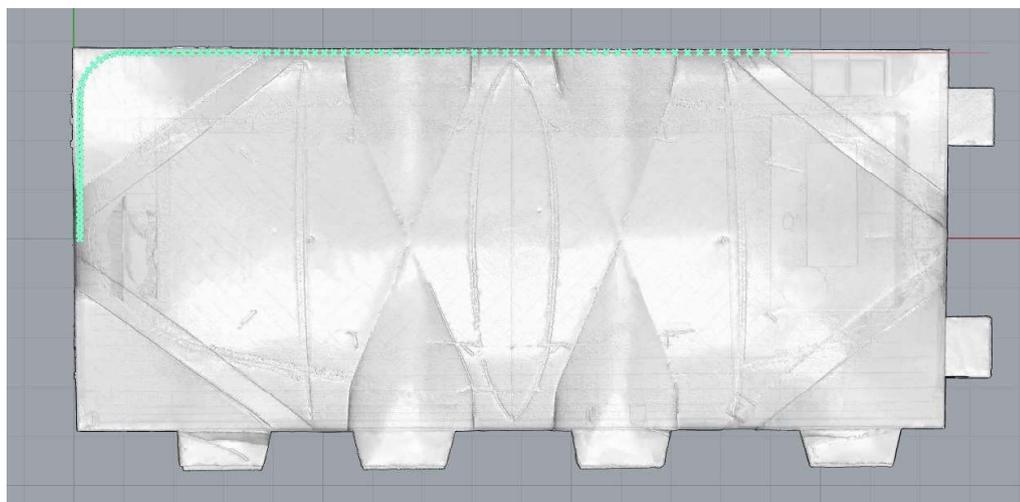


Gli slider, impostati in metri, controllano i punti di generazione della linea, il raccordo consentirà di controllare la convergenza angolare delle superfici assorbenti.

Il passo successivo è stata la suddivisione della linea creata in una serie di segmenti che avesse un progressivo aumento della lunghezza.

Per definire l'elemento discrezionale della suddivisione si è scelto di definire quattro valori:

1. **Scaglione d'incremento.** Definisce il quantitativo di punti che descrivono il numero di segmenti, essi avranno un valore definito di lunghezza.
2. **Interasse Iniziale.** Valore definito in m della lunghezza dei segmenti del primo scaglione.
3. **Incremento interasse.** Definisce il quantitativo in m di incremento alla lunghezza dei segmenti per ogni interasse in modo progressivo, es. se il primo scaglione viene impostato con interasse 10 cm, e l'incremento fissato a 0,02 m, lo scaglione successivo di interassi presenterà lunghezze di 12 cm.
4. **Distanza da Parete di Fondo.** Controlla la posizione secondo l'asse x del punto finale di suddivisione definendo il limite dell'ultimo segmento dell'ultimo scaglione, esso definisce in sostanza la distanza dal palco del sistema acustico installato.

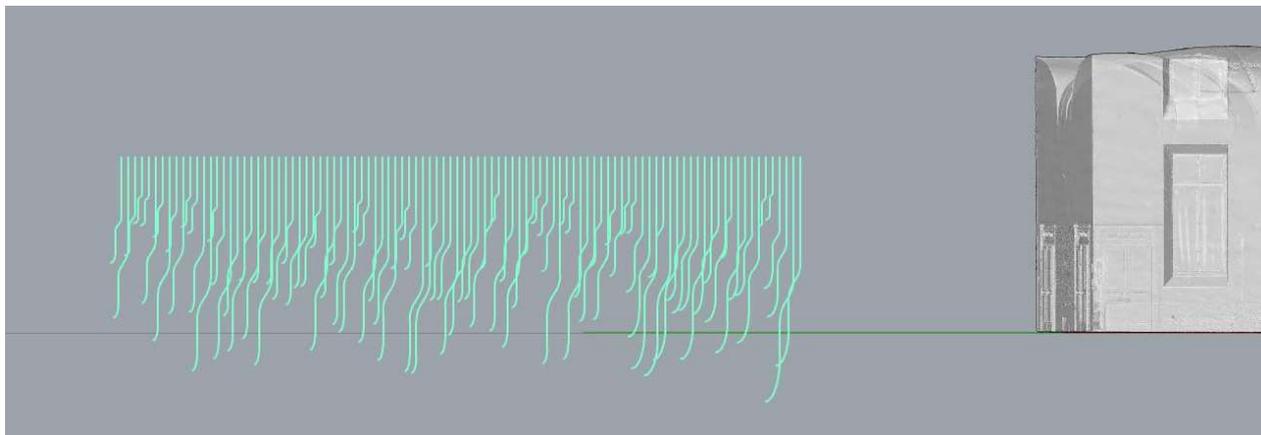


*Fig. 5.3.1.5
Vista in pianta della
sala
con suddivisione della
linea iniziale per il
successivo posiziona-
mento dei baffles*



*Fig. 5.3.1.6
Comandi slider di
Grasshopper relativi
ai valori quantitativi
della suddivisione
della linea iniziale*

Fig. 5.3.1.7
Vista Parallela delle
linee che definiscono i
profili dei baffle



La generazione dei profili, basata su una forma definita dal doppio raccordo speculare tra due linee, una più avanzata ed una più arretrata rispetto al fonte d'onda, avviene in modo pseudo casuale, ovvero, la casualità è definita entro certi limiti i cui valori sono definiti nelle loro proporzioni.



Fig. 5.3.1.8
Comandi slider di
Grasshopper relativi
ai valori quantitativi
di fattore di forma
proporzionale dei
baffles

In questa fase del progetto infatti, i range dimensionali non si riferiscono alla forma finale, ma solo alle proporzionalità, quindi alle differenze dimensionali tra i singoli baffles.

Queste proporzionalità prendono vengono definite da:

- **H Vela MIN/MAX.** Viene definita “vela” la porzione di baffle superiore, il cui profilo si trova più vicino al fronte d’onda, questi parametri ne definiscono il range di variabilità dell’altezza.
- **H Bezier MIN/MAX.** Il doppio raccordo tra i due profili avviene tramite una curva di bezier, definita da due angoli retti, questi parametri ne definiscono il range di variabilità dell’altezza.
- **Profondità Bezier MIN/MAX.** Parametri che definiscono il range di variabilità della larghezza del doppio raccordo.
- **H Parte Inf. MIN/MAX.** Viene definita “parte inferiore” la porzione di baffle il cui profilo si trova più lontano dal fronte d’onda, quindi più in basso, questi parametri ne definiscono il range di variabilità dell’altezza.
- **H Raggio Raccordo Inf.** Il raccordo tra la porzione inferiore del baffle e la perpendicolare alla parete di montaggio, il parametro ne definisce il valore base della lunghezza secondo l’asse azimutale.
- **Range incremento H Raggio Racc. Inf.** Parametro che definisce la variabilità delle altezze dei raccordi inferiori incrementando il valore base impostato

Una volta definiti i profili del fronte d'onda, sulla base del posizionamento del punto finale definito dal raccordo della parte inferiore alla perpendicolare del muro, si è proceduto tramite la proiezione secondo l'asse z ed y dei punti finali, alla creazione delle superfici dei baffles, i cui valori dimensionali, ricordiamolo, non sono ancora assoluti ma rappresentano una proporzionalità dei loro fattori di forma.

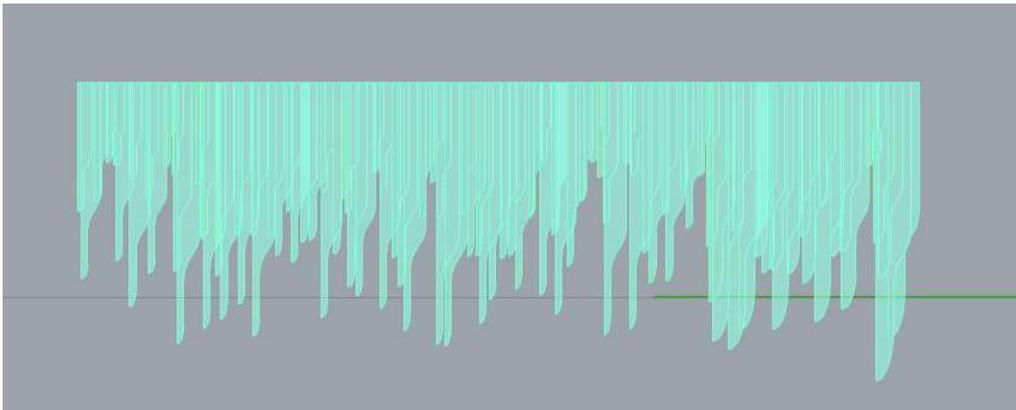


Fig. 5.3.1.9
Vista parallela delle
superfici dei baffles non
scalati

È ora necessario introdurre il fattore di forma, il parametro, principale del processo generativo del sistema acustico: a' .

Esso definisce il rapporto dimensionale tra l'interasse e la profondità della parte definita "vela" della superficie del baffle.

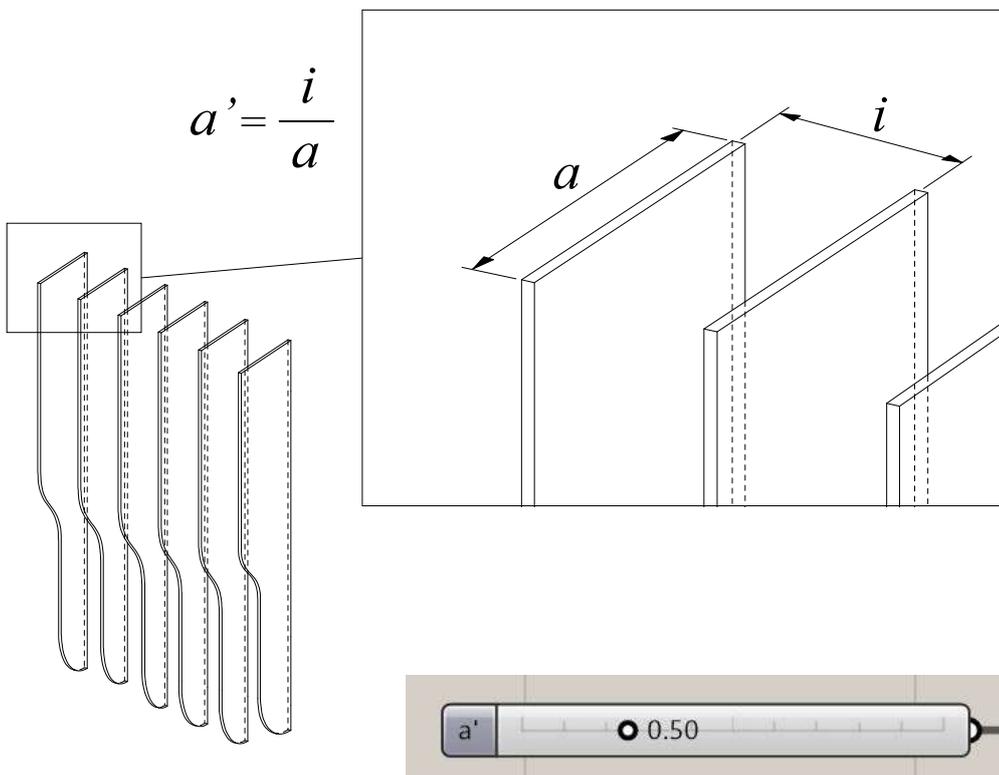
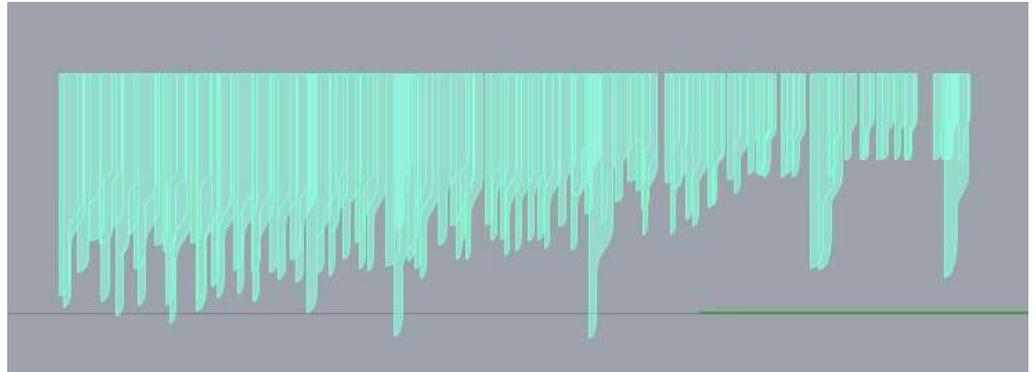


Fig. 5.3.1.10
Dettaglio rapporto
geometrico a'

Fig. 5.2.1.11
Comando slider di
Grasshopper relativo
al valore di rapporto
geometrico a'

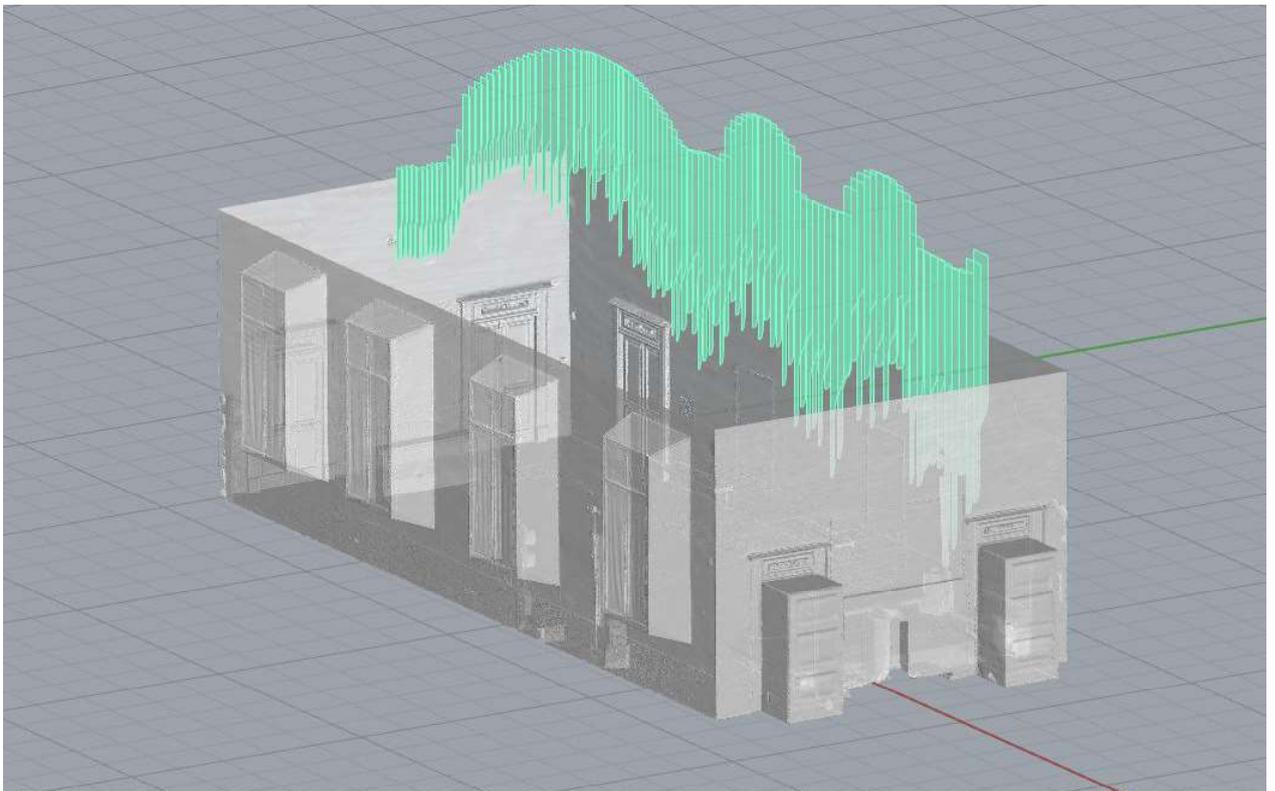
Questo parametro, definisce la scalatura secondo l'asse x delle superfici dei baffles partendo dal valore di interasse definito dai parametri iniziali.

*Fig. 5.3.1.11
Vista parallela
delle superfici dei
baffle scalati secondo
il valore di rapporto
geometrico a'*

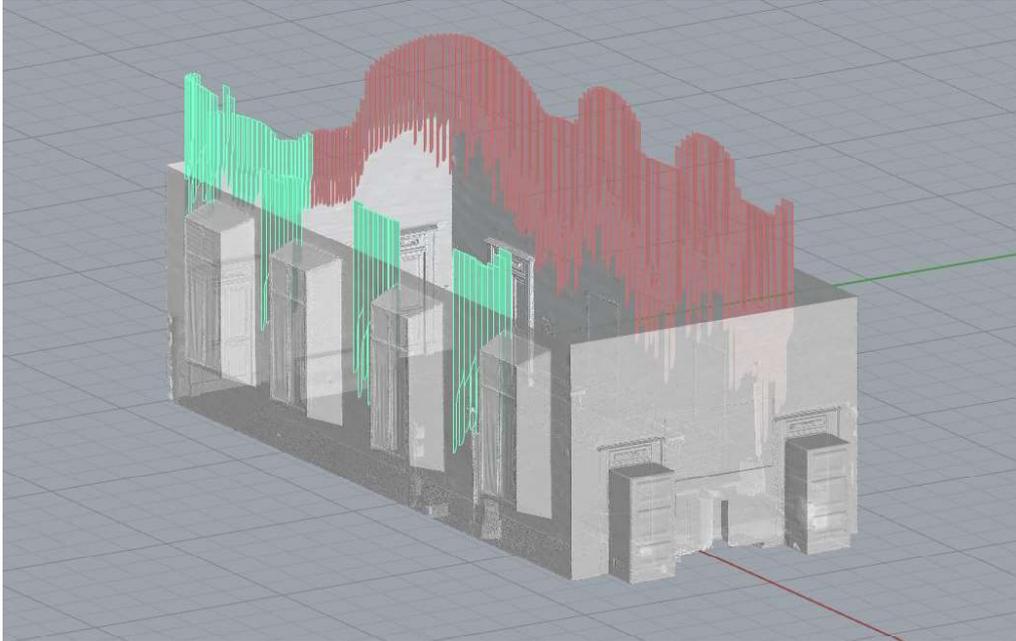


*Fig. 5.3.1.12
Posizionamento
delle superfici dei
baffle scalati secondo
il valore di rapporto
geometrico a'
lungo la proiezione
della linea iniziale sul
volume della volta*

Successivamente, i baffles vengono posizionati in corrispondenza della proiezione verticale dei punti della suddivisione della linea iniziale sulla superficie della volta prendendo a riferimento il punto estremo della parte più lontana al fonte d onda, semplificando, il punto in corrispondenza dell'angolo retto tra le linee rette del perimetro dei singoli baffles.

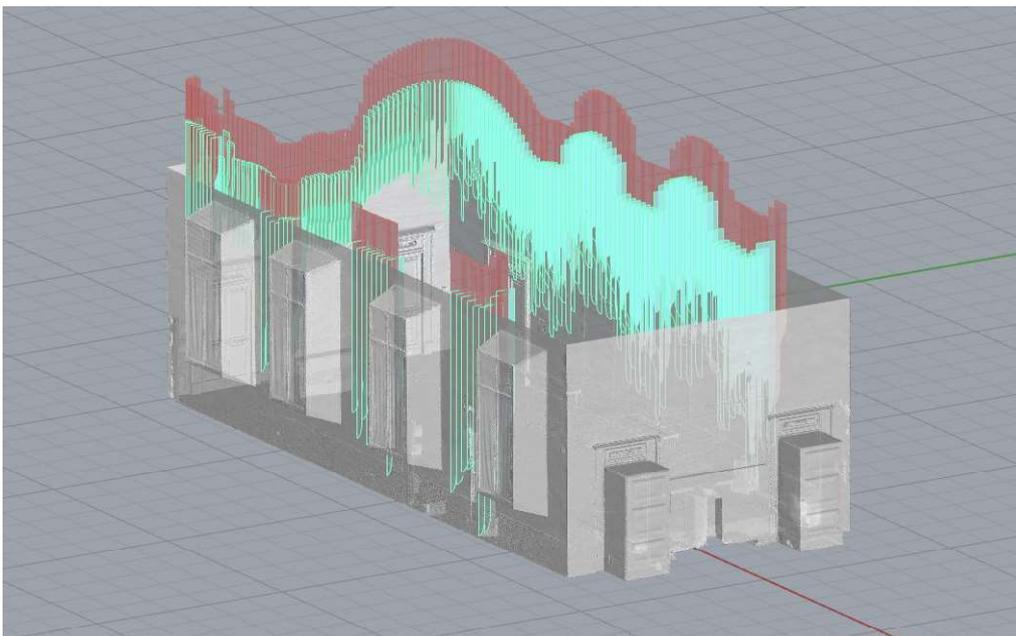


La porzione nord delle superfici create viene specchiata, escludendo le parti in corrispondenza delle finestre.



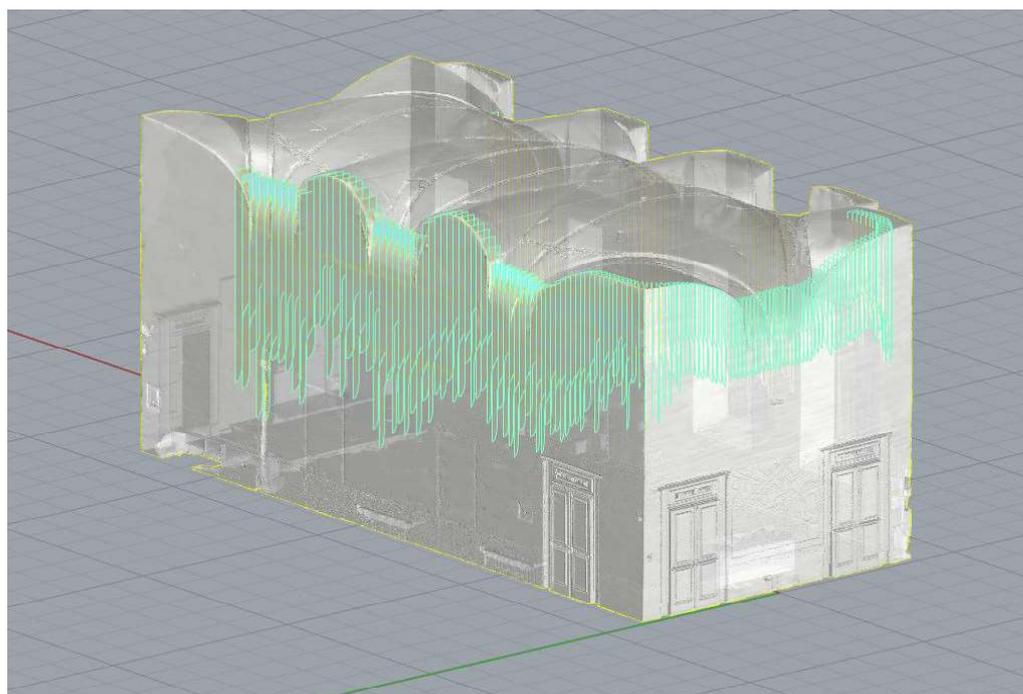
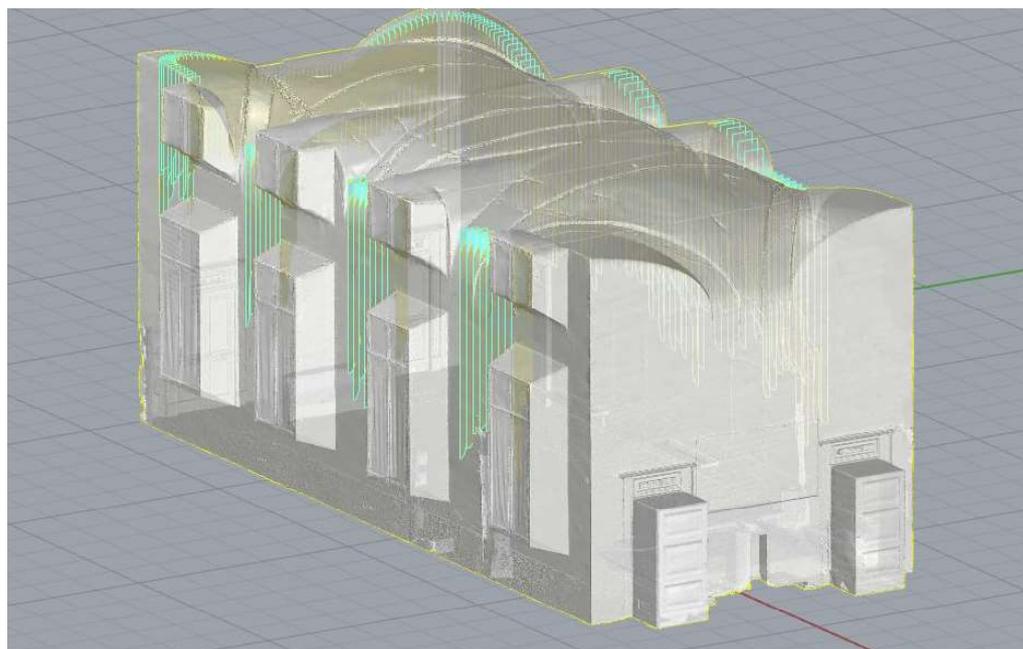
*Fig. 5.3.1.13
Specchiatura
simmetrica dei baffles
secondo l'asse
centrale della sala*

I baffles vengono dunque ruotati ortogonalmente alla superficie definita dall'estrusione azimutale della linea iniziale e delle sue porzioni specchiate, ottenendo il posizionamento in pianta finale delle superfici, che vengono poi traslate fino a far coincidere l'estremo superiore del fronte d'onda alla superficie della volta.



*Fig. 5.3.1.14
Rotazione
simmetrica dei baffles
secondo gli assi per-
pendicolari alla linea
iniziale*

Fig. 5.3.1.15 e 16
Viste parallele del
modello con relativo
posizionamento dei
baffles.



Le superfici create possono ora essere estruse per creare i singoli solidi dei baffles attraverso l'apposito comando apposto.

Fig. 5.3.1.17
Comando slider
di Grasshopper
relativo al valore
di lunghezza
dell'estrusione
delle superfici dei
baffles



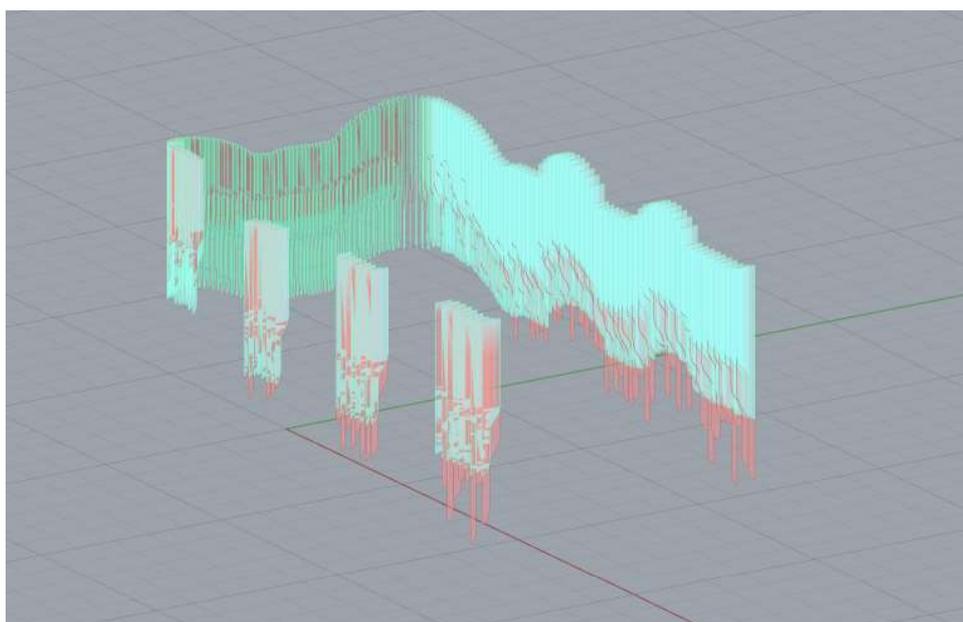


Fig. 5.3.1.18
Scalatura dei baffles
secondo l'asse Z

La scalatura verticale dei baffles proporzionerà le differenze definite inizialmente dai fattori di forma secondo le altezze totali dei solidi.

la distanza da terra, quindi lo sviluppo verticale, è definita da un range massimo e minimo.

Successivamente viene eliminata la porzione eccedente la linea d'intradosso della volta pe ottenere un valore d'area totale quantificabile

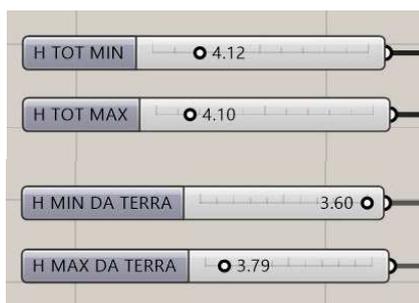


Fig. 5.3.1.19
Comandi slider di
Grasshopper relativi
al valori di lunghezza
dell'altezza dei
baffles e del range di
regolazione rispetto
alla distanza dal
pavimento

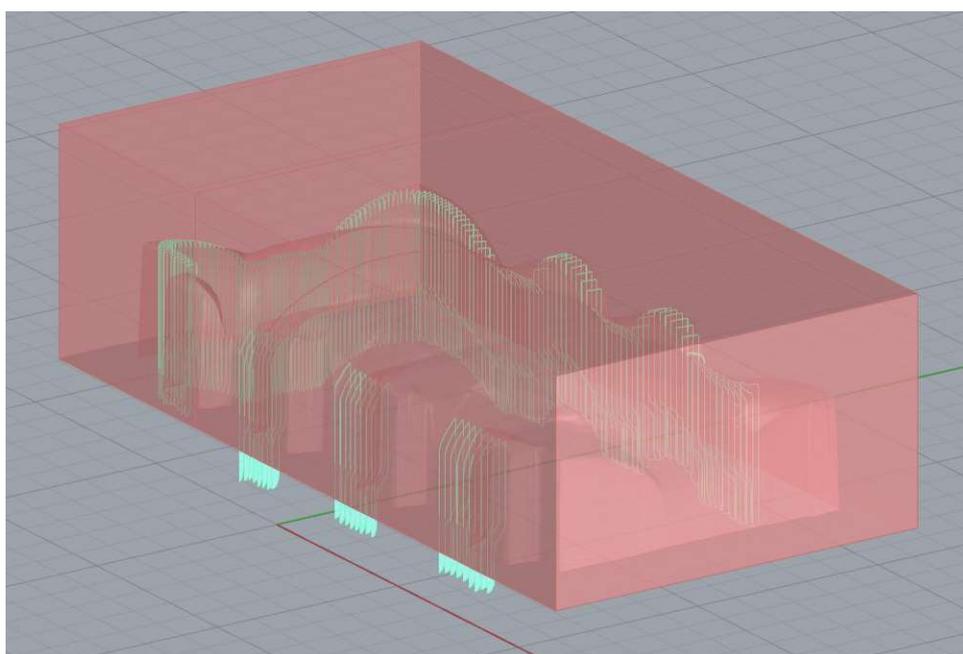
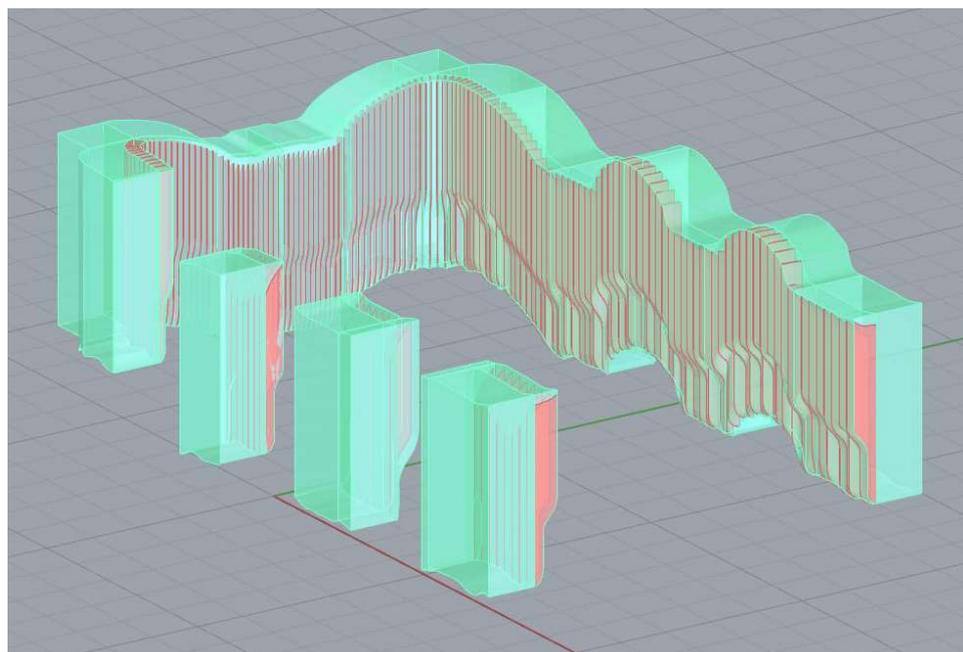


Fig. 5.3.1.20
Creazione del solido
negativo alla volta
per la rifilatura della
porzione superiore dei
baffles

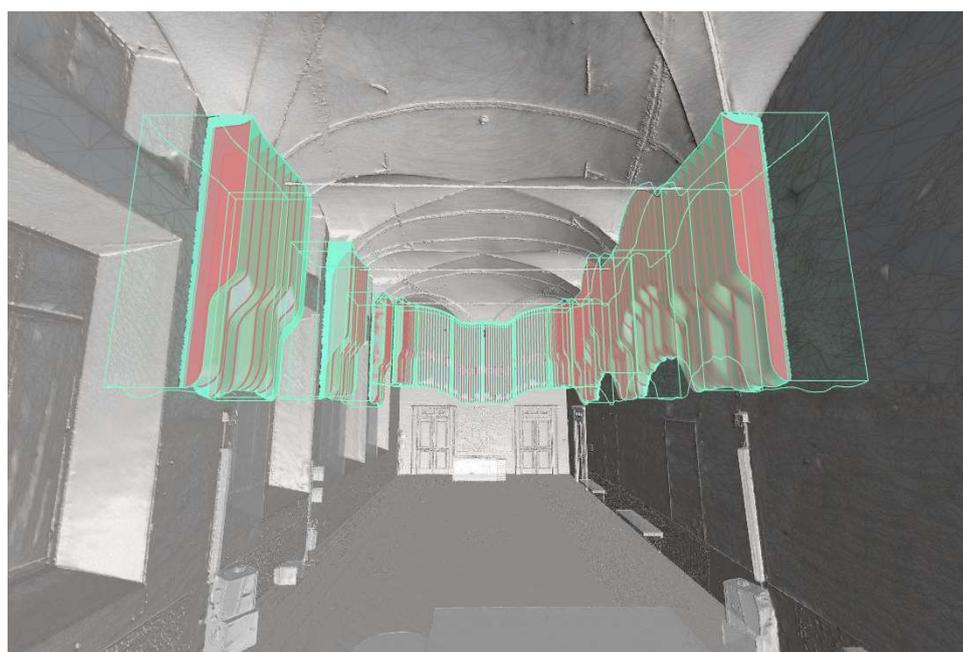
Fig. 5.3.1.21
Creazione del solido
mesh per il modello
Acustico



Si è quindi proceduto alla creazione di un'automazione in grado di creare un solido comprensivo dell'insieme dei baffles.

La superficie di questo solido sarà quella che offrirà il fronte d'onda alle simulazioni su Odeon del sistema di correzione acustica, i cui valori di assorbimento saranno dipendenti dal valore adimensionale di a' , la cui definizione di parametro acustico di natura geometrica verrà approfondita nel paragrafo seguente.

Fig. 5.3.1.22
Vista prospettica
interna dei baffles e
del solido mesh per il
modello Acustico



5.4 Misure in camera riverberante

5.4.1 Misure di sistemi con più elementi

Come anticipato, ai fini di definire un iter che potesse ovviare alle criticità dell'interoperabilità tra i programmi, era necessario isolare un parametro comune, necessariamente geometrico. La generazione geometrica dei baffles si basa su una proporzione tra la profondità del baffle (a), e l'interasse tra la coppia (i): a' .

Le prove iniziali valutano l'assorbimento del materiale posizionato tradizionalmente orizzontale, con una sola faccia esposta. Definiremo questo valore come (α_0).

L'assorbimento del materiale posizionato verticalmente (α_b), che quindi lavora su due superfici, risente di una variazione di prestazione sulla superficie unitaria, che è oggetto di questa prova preliminare.

Il provino in legno, misura iniziale di confronto per il calcolo dell'assorbimento delle prove successive, presenta montaggi ad incastro in legno. La superficie del provino (S) misura $0,8\text{m} \times 0,6\text{m} = 0,48\text{m}^2$.

Si noti come la superficie complessiva delle facce esposte dei due baffles organizzati casualmente nello spazio in posizione verticale coincida con la superficie del provino.

Superficie di montaggio del sistema
che definisce lo 0 di alfa.

Legno di abete:

$l = 0,60\text{ m}$

$l' = 0,80\text{ m}$

$S = 0,48\text{ m}^2$



Fig 5.4.1.1
Prova preliminare in camera riverberante del provino vuoto in legno che ospiterà le configurazioni dei baffles

PROVA 0

Superficie di prova interamente coperta dal materiale assorbente:

$l = 0,60\text{ m}$

$l' = 0,80\text{ m}$

$S = 0,48\text{ m}^2$



Fig 5.4.1.2
Prova 0
Camera riverberante con il materiale posto tradizionalmente sul provino in legno con una sola faccia esposta

PROVA 0,1

2 baffles organizzati casualmente nello spazio e posizionati verticalmente:

$l = 0,60\text{ m}$

$l' = 0,80\text{ m}$

$S = 0,48\text{ m}^2$

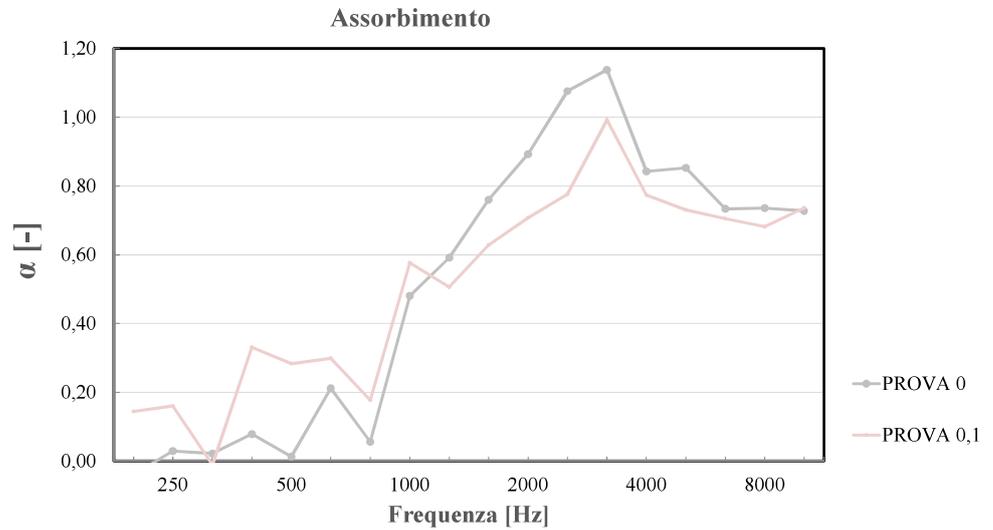
$S_{\text{baf}} = 0,48\text{ m}^2$



Fig 5.4.1.3
Prova 0.1
Camera riverberante con il materiale posto verticalmente rispetto al provino in legno con organizzazione casuale nello spazio

Di seguito il grafico di confronto delle prove 0 e 0,1.

Fig 5.4.1.A
Grafico
dell'assorbimento acustico della Prova 0
e della Prova 1



Si è dunque proceduto con 3 test del sistema il cui posizionamento di più elementi, ricoprì la stessa area di sistema complessiva.

PROVA 1

$n = 9$
 $a = 0,20 \text{ m}$
 $i = 0,10 \text{ m}$
 $a' = 0,5$
 $S_{\text{baf}} = 2,16 \text{ m}^2$



Fig 5.4.1.4
Prova 1
Camera riverberante
con i baffle posti in
configurazione con 9
elementi

PROVA 2

$n = 5$
 $a = 0,20 \text{ m}$
 $i = 0,20 \text{ m}$
 $a' = 1$
 $S_{\text{baf}} = 1,20 \text{ m}^2$



Fig 5.4.1.5
Prova 2
Camera riverberante
con i baffle posti in
configurazione con 5
elementi

PROVA 3

$n = 3$
 $a = 0,20 \text{ m}$
 $i = 0,40 \text{ m}$
 $a' = 2$
 $S_{\text{baf}} = 0,72 \text{ m}^2$



Fig 5.4.1.6
Prova 3
Camera riverberante
con i baffle posti in
configurazione con 3
elementi

Qui di seguito i grafici che confrontano i dati dell'assorbimento che registra il sistema inteso come l'impronta dei baffles sul provino e l'assorbimento dell'unità di superficie dei baffles.

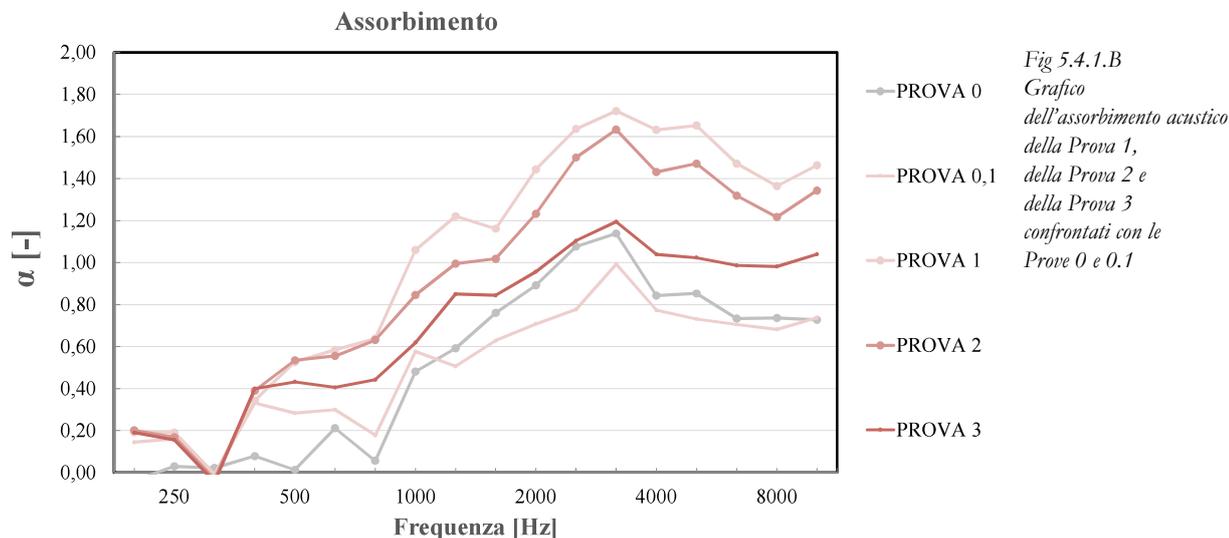


Fig 5.4.1.B
Grafico dell'assorbimento acustico della Prova 1, della Prova 2 e della Prova 3 confrontati con le Prove 0 e 0.1

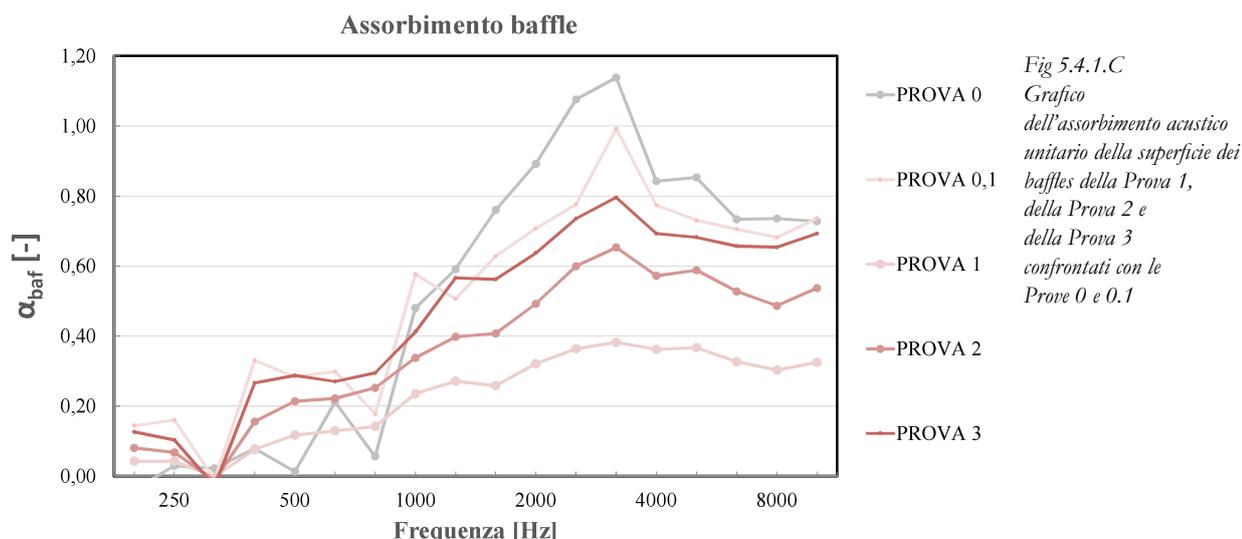


Fig 5.4.1.C
Grafico dell'assorbimento acustico unitario della superficie dei baffles della Prova 1, della Prova 2 e della Prova 3 confrontati con le Prove 0 e 0.1

Nel primo caso possiamo notare un'ovvia superiorità prestazionale del sistema all'aumentare del numero di elementi apposti. L'assorbimento arriva a superare la soglia di 1, poiché l'area di assorbimento equivalente viene ripartita sulla superficie del provino, inferiore a quella lavorante degli elementi, per calcolare l'assorbimento del sistema.

Nel secondo caso si può evincere come al contrario, all'aumentare del numero degli elementi, la prestazione unitaria del materiale subisce un decremento, proporzionale seppur non lineare. Questa non linearità è, con buona ragione di supposizione, a questo punto dei test, da attribuirsi al differente comportamento che gli elementi hanno in relazione alla geometria di organizzazione, in particolar modo, al pari di S_{baf} , alla proporzionalità tra la profondità e l'interasse.

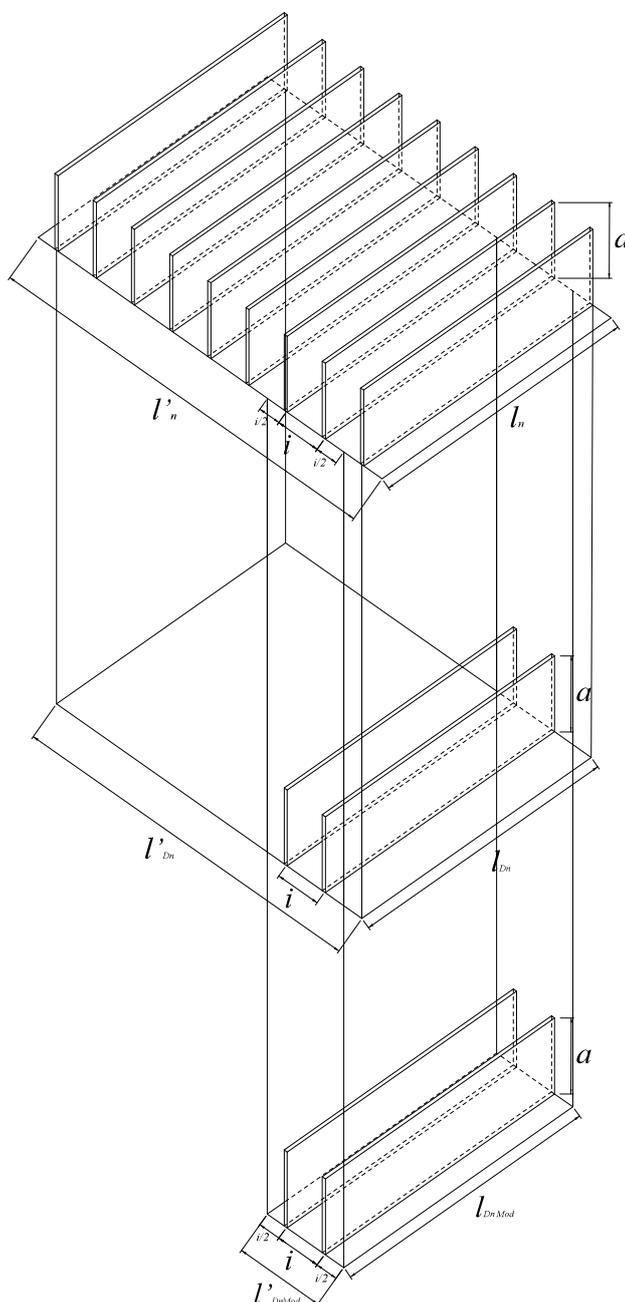
5.4.2 Misure di sistemi di coppia con interassi

L'analisi successiva è stata quella della relazione tra l'assorbimento unitario dei baffe e la geometria del sistema.

Sono state effettuate 4 prove a differenti interassi della medesima coppia di baffe.

La differente geometria introduce un nuovo parametro che sarà poi oggetto delle misure successive, esso è l'assorbimento del modulo di coppia: l'area di assorbimento equivalente che otteniamo dalla prova viene pesata sull'area occupata dall'interasse per ogni baffe presente: nel caso della coppia si chiamerà Modulo, nei casi precedenti, e quando occuperà tutta l'impronta di prova si chiamerà di Sistema.

Fig 5.4.2.1
Schematizzazione delle prove di modulo a coppie a confronto con le prove di sistema e relativi parametri dimensionali



PROVA 1

$$\begin{aligned}
 n &= 9 \\
 a &= 0,20 \text{ m} \\
 i &= 0,10 \text{ m} \\
 a' &= 0,5 \\
 S_{\text{baf}} &= a \times l \times 2n = 2,16 \text{ m}^2 \\
 l' &= n \times i \\
 S_{\text{Sis}} &= l' \times l = 0,54 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

PROVA D1

$$\begin{aligned}
 n &= 2 \\
 a &= 0,20 \text{ m} \\
 i &= 0,10 \text{ m} \\
 a' &= 0,5 \\
 S_{\text{baf}} &= a \times l \times 2n = 0,48 \text{ m}^2 \\
 l' &= 0,8 \\
 S &= l' \times l = 0,48 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

PROVA D1_{Mod}

$$\begin{aligned}
 n &= 2 \\
 a &= 0,20 \text{ m} \\
 i &= 0,10 \text{ m} \\
 a' &= 0,5 \\
 S_{\text{baf}} &= a \times l \times 2n = 0,48 \text{ m}^2 \\
 l'_{\text{D1Mod}} &= n \times i = 0,20 \text{ m} \\
 S_{\text{D1Mod}} &= l' \times l = 0,12 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Qui di seguito le prove effettuate:

PROVA D1

(Con geometria analoga alla prova 1)

$$n = 2$$

$$a = 0,20 \text{ m}$$

$$i = 0,10 \text{ m}$$

$$a' = 0,5$$

$$S_{\text{baf}} = 0,48 \text{ m}^2$$



Fig 5.4.2.2

Prova D1

Camera riverberante con i baffle posti in configurazione D1

PROVA D2

(Con geometria analoga alla prova 2)

$$n = 2$$

$$a = 0,20 \text{ m}$$

$$i = 0,20 \text{ m}$$

$$a' = 1$$

$$S_{\text{baf}} = 0,48 \text{ m}^2$$



Fig 5.4.2.3

Prova D2

Camera riverberante con i baffle posti in configurazione D2

PROVA D3

(Con geometria analoga alla prova 3)

$$n = 2$$

$$a = 0,20 \text{ m}$$

$$i = 0,30 \text{ m}$$

$$a' = 1,5$$

$$S_{\text{baf}} = 0,48 \text{ m}^2$$



Fig 5.4.2.4

Prova D3

Camera riverberante con i baffle posti in configurazione D3

PROVA D4

$$n = 2$$

$$a = 0,20 \text{ m}$$

$$i = 0,40 \text{ m}$$

$$a' = 2$$

$$S_{\text{baf}} = 0,48 \text{ m}^2$$



Fig 5.

Prova D4

Camera riverberante con i baffle posti in configurazione D4

Si noti come la prestazione del modulo, all'aumentare dell'interasse tra gli elementi aumenti su tutte le frequenze in modo pressoché lineare, con le dovute accortezze di constatazione relative alla proporzionalità tra interasse e lunghezza d'onda. Inoltre il grafico dell'assorbimento unitario dei baffles corrisponde in questo caso a quello di sistema, poiché l'area dei due baffles corrisponde all'impronta di quest'ultimo. In particolare nel grafico 3.D si noti che un'area d'impronta inferiore aumenta considerevolmente la prestazione del modulo di coppia.

Come evinto dalle prove precedenti, all'aumentare del numero di Si in Si

noti come i valori di assorbimento di sistema e di superficie unitaria in questa serie di prove coincidano poiché l'area del provino corrisponde all'area della superficie dei baffles.

Fig 5.4.2.A
Grafico dell'assorbimento acustico della Prova D1, della Prova D2, della Prova D3 e della Prova D4 confrontati con la Prova 0

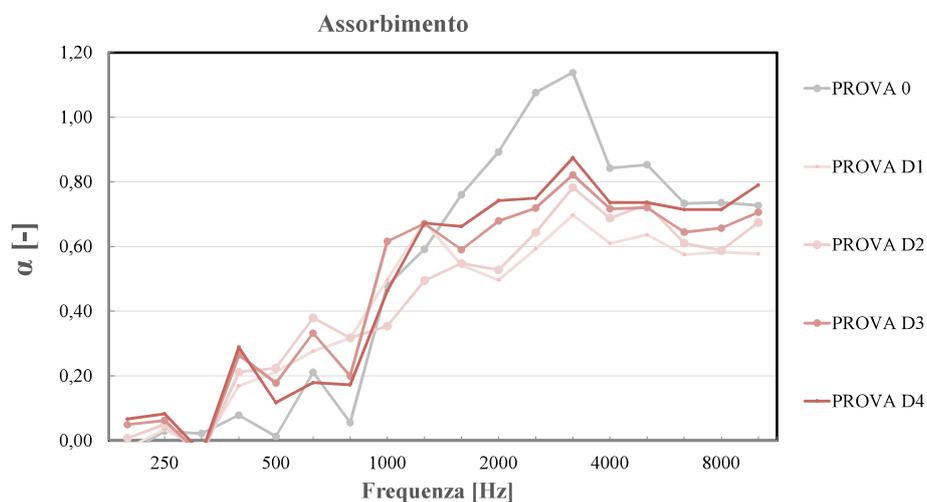


Fig 5.4.2.B
Grafico dell'assorbimento acustico unitario della superficie dei baffles della Prova D1, della Prova D2, della Prova D3 e della Prova D4 confrontati con la Prova 0

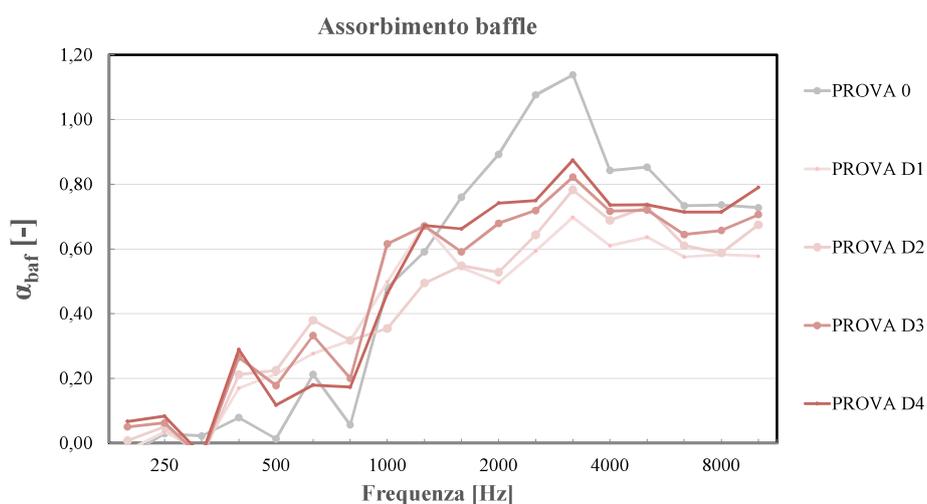
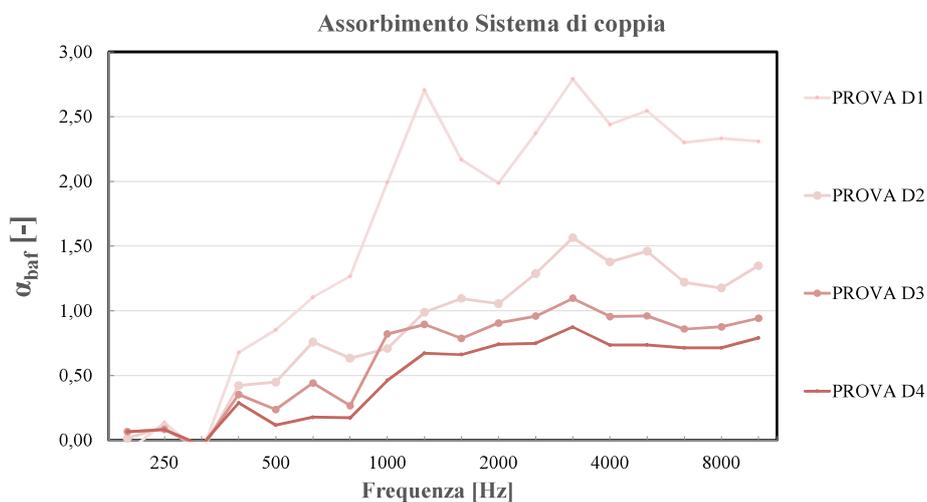


Fig 5.4.2.C
Grafico dell'assorbimento acustico di modulo della Prova D1, della Prova D2, della Prova D3 e della Prova D4



In particolare nel grafico 5.3.2.C si noti come un'area d'impronta inferiore aumenti considerevolmente la prestazione del modulo di coppia. Come evinto dalle prove precedenti, all'aumentare del numero di elementi, quindi di moduli, l'ennesimo elemento aggiuntivo causa al sistema un proporzionale decremento prestazionale per quanto riguarda la superficie unitaria dei baffles, decremento che non è al momento oggetto di indagine poiché essa si focalizza nel paragrafo seguente sul confronto del modulo di coppia.

5.4.3 Misure di sistemi di coppia con a' differenti

Come anticipato, ai fini di definire un iter che potesse ovviare alle criticità dell'interoperabilità tra i programmi, era necessario isolare un parametro comune, necessariamente geometrico.

La generazione geometrica dei baffles si basa su una proporzione tra la profondità del baffle (a), e l'interasse tra la coppia (i): a' .

Il progetto prevede due sezioni con due differenti rapporti geometrici, uno nella parte superiore, ed uno nella parte inferiore:

Gli assorbimenti di sistema che si intende usare in queste sezioni sono quelli della PROVA 1 e PROVA 2 i cui valori di a' sono rispettivamente 0,5 e 1: all'aumentare dunque dell'interasse tra gli elementi aumenterà la profondità di questi ultimi. Nella sezione seguente si prenderà in esame il comportamento dell'assorbimento acustico in relazione al rapporto tra queste grandezze geometriche.

Sono state selezionate 3 conformazioni tagliando i baffles secondo la forma che essi avranno nella disposizione di progetto suddividendoli in altrettante sezioni. Le 28 misure per ognuna delle tre conformazioni sono state effettuate incrementando via via l'interasse di 1 cm.

Tre misure preliminari con organizzazione casuale nello spazio, mantenendo chiaramente la posizione verticale sono inoltre state effettuate per controllo.

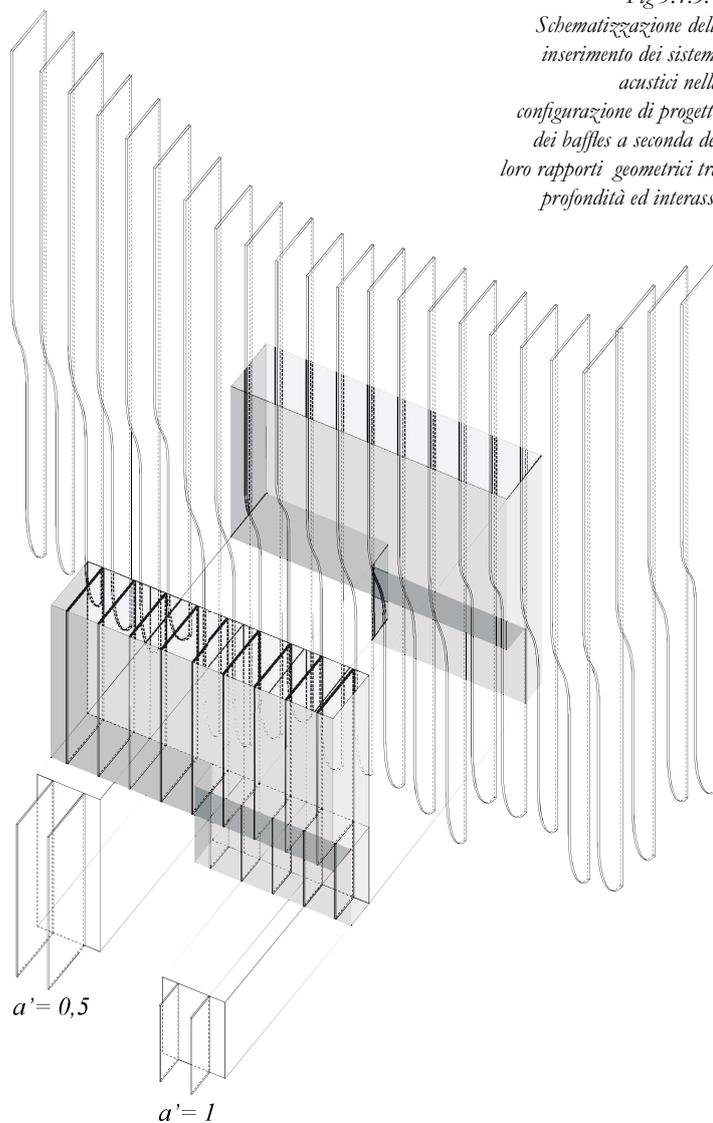
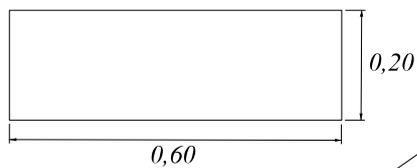


Fig 5.4.3.1
Schematizzazione dell'inserimento dei sistemi acustici nella configurazione di progetto dei baffles a seconda dei loro rapporti geometrici tra profondità ed interasse

Fig 5.4.3.1.1, 2 e 3
 Camera riverberante
 con i baffle
 in conformazione A
 posti verticalmente con
 organizzazione casuale per



5.4.3.1 Conformazione A



Schematizzazione delle prove di
 conformazione A, con relativi
 parametri geometrici

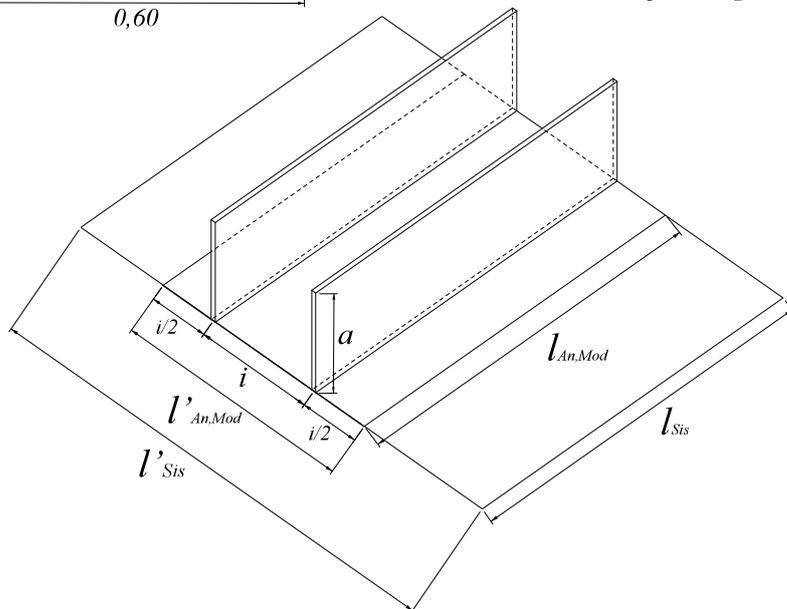


Fig 5.4.3.1.4
 Camera riverberante
 con i baffle
 in conformazione A
 posti con interasse minimo,
 10,25 cm



Fig 5.4.3.1.5
 Camera riverberante
 con i baffle
 in conformazione A
 posti con interasse massimo,
 37,25 cm



Interasse

0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37
A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22	A23	A24	A25	A26	A27	A28

Prova

Di seguito i grafici relativi all'assorbimento di sistema delle prove, in bande di ottava, si può notare, nel primo, dove in ordinata abbiamo le frequenze, come gli effetti di risonanza agiscono diversamente a seconda dell'interasse, con una variabilità particolarmente accentuata nella zona tra i 1000 e 1500 Hz.

Nel secondo, suddiviso per bande di ottava ed in ordinata gli interassi delle differenti prove tali effetti risultano avere un andamento ripetitivo.

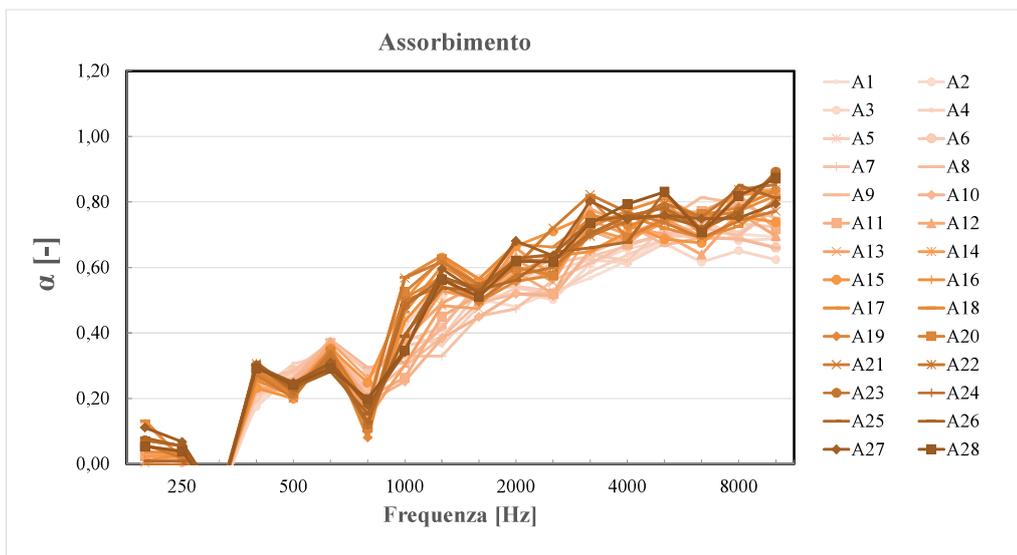
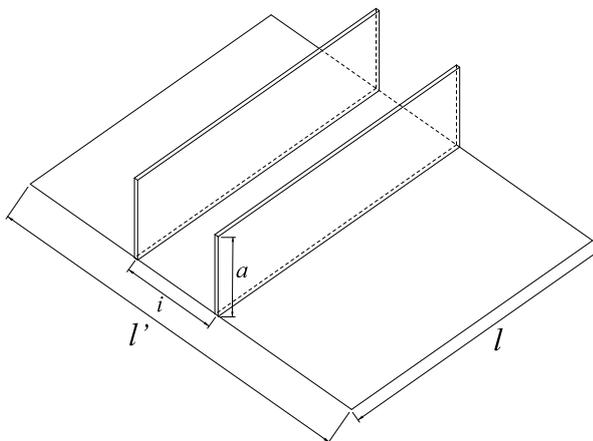


Fig 5.4.3.1.A
Grafico dell'assorbimento acustico delle prove con conformazione A

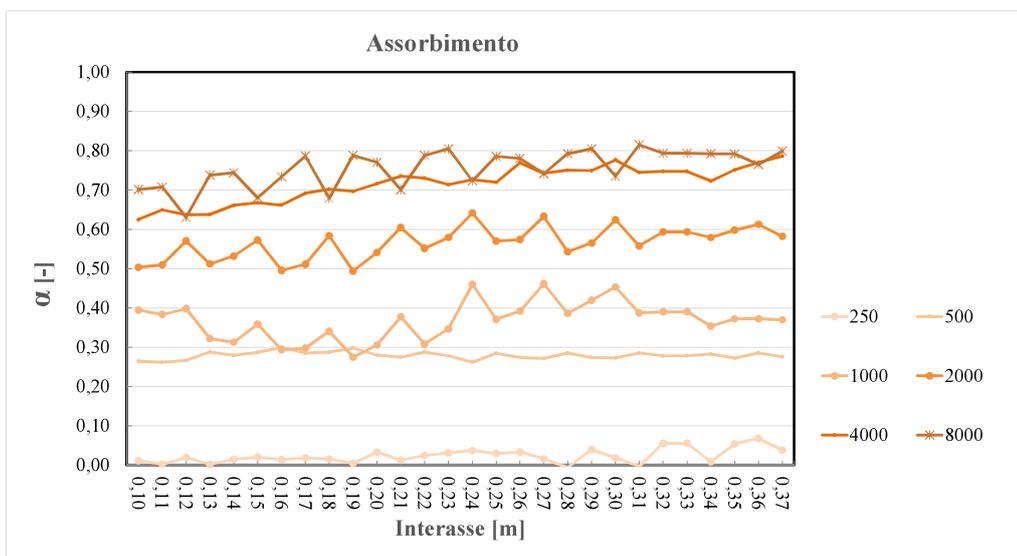
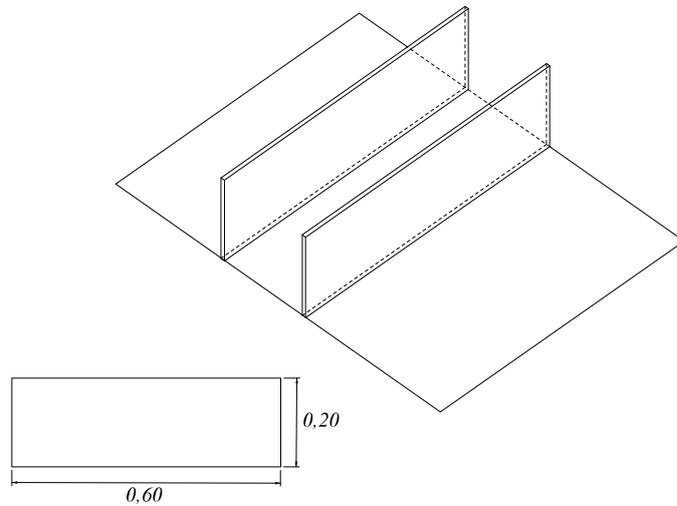


Fig 5.4.3.1.B
Grafico dell'assorbimento acustico per bande di ottava ed in ordinata i valori di lunghezza dell'interasse delle prove con conformazione A



L'assorbimento per unità di superficie delle prove, in bande di ottava. Come già avvenuto questi valori coincidono con l'assorbimento di sistema, poiché l'area complessiva dei pannelli coincide con l'area del provino inserito in camera riverberante.

Fig 5.4.3.1.C
Grafico dell'assorbimento acustico unitario della superficie dei baffles delle prove con conformazione A

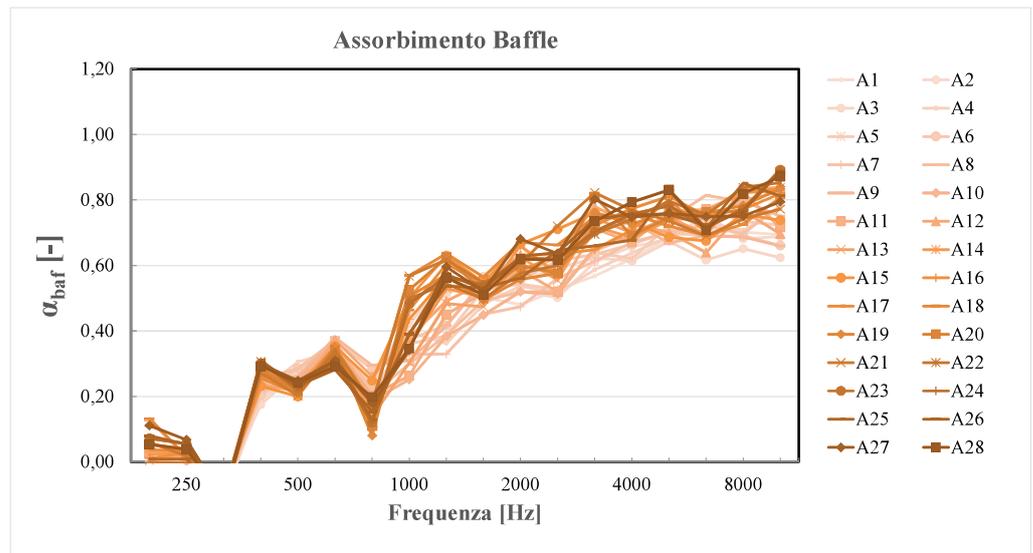
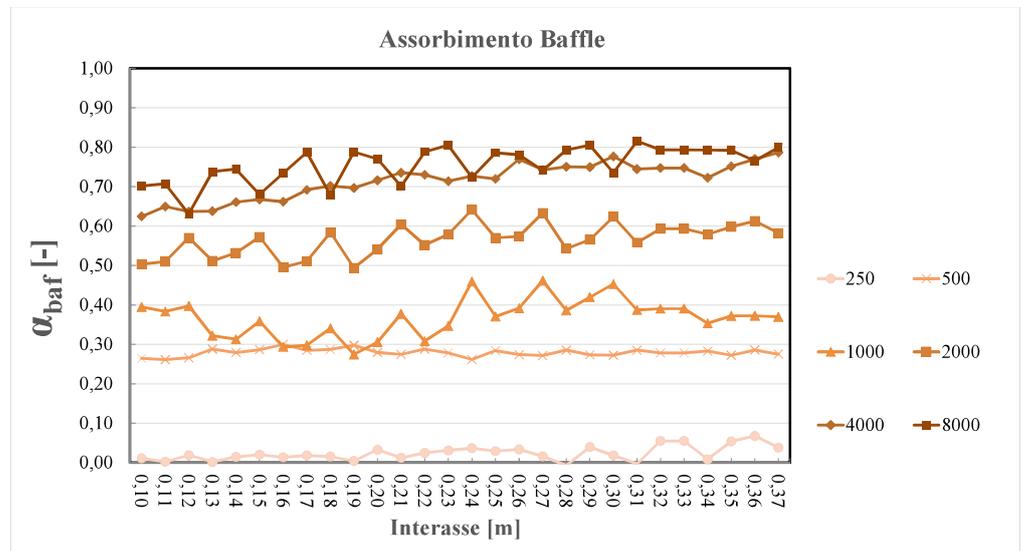


Fig 5.4.3.1.D
Grafico dell'assorbimento acustico unitario della superficie dei baffles per bande di ottava ed in ordinata i valori di lunghezza dell'interasse delle prove con conformazione A



Strettamente dipendente dall'area dell'impronta, l'assorbimento fornito dal modulo è di conseguenza fortemente dipendente dall'interasse.

Il decremento dell'assorbimento all'aumentare di esso non sembra però avere un andamento lineare, ma progressivo via via che il rapporto a' (a/i) diminuisce: la diminuzione pare essere lineare tra le prove A8 e A12,

con $0,91 > a' > 1,11$;

$0,18 > i > 0,22$.

Nel grafico con gli interassi in ordinata, si può apprezzare in maniera più evidente l'andamento non lineare della diminuzione dell'assorbimento di modulo

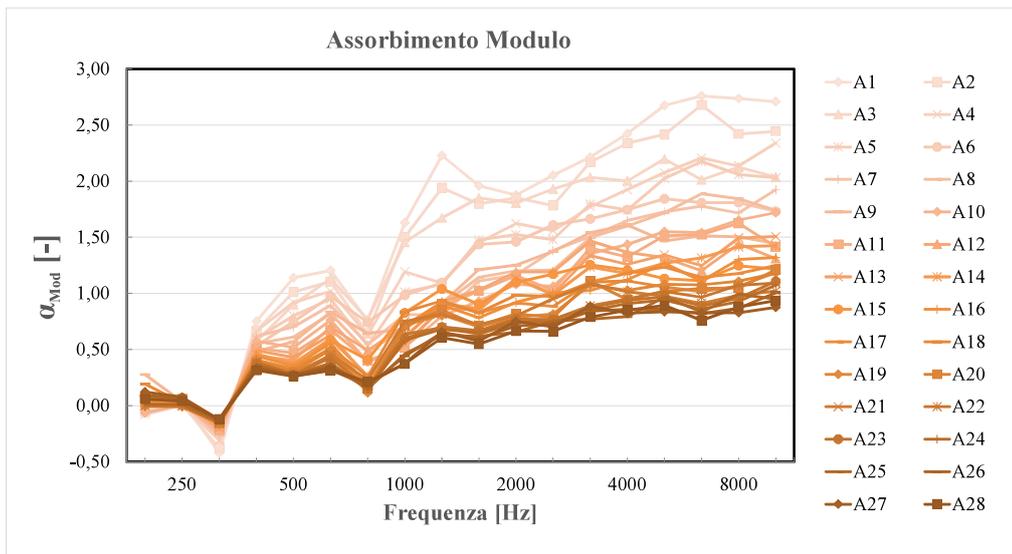
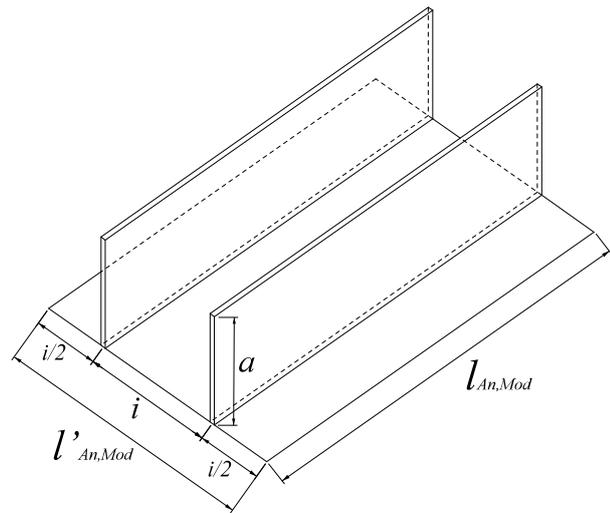


Fig 5.4.3.1.E
Grafico dell'assorbimento acustico di modulo delle prove con conformazione A

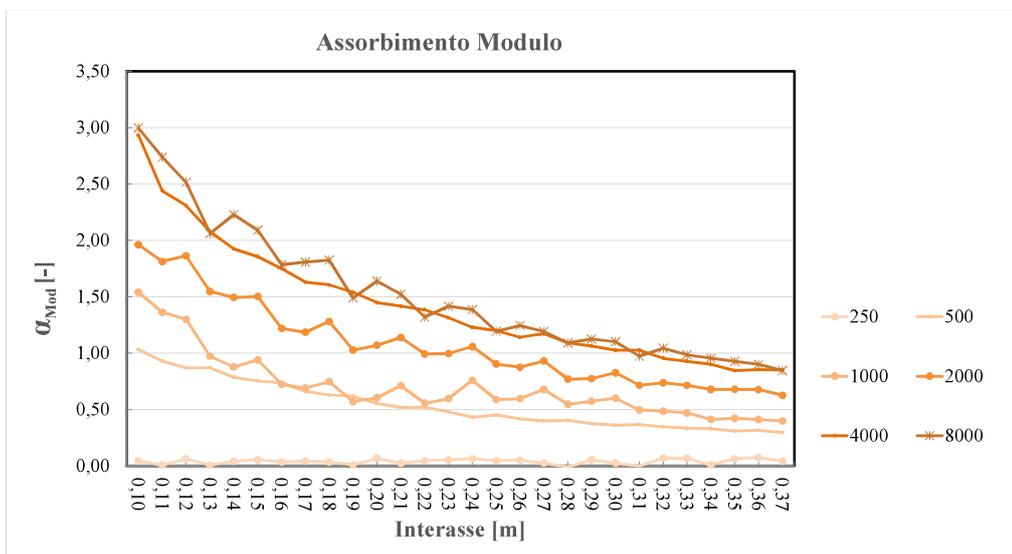
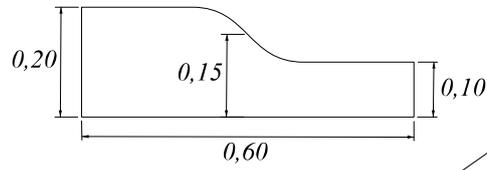


Fig 5.4.3.1.F
Grafico dell'assorbimento acustico di modulo per bande di ottava ed in ordinata i valori di lunghezza dell'interasse delle prove con conformazione A

5.4.3.2 Conformazione B

Fig 5.4.3.2.1,2
Camera riverberante
con i baffle
in conformazione B
posti verticalmente con
organizzazione casuale per



Schematizzazione delle prove di
conformazione B, con relativi
parametri geometrici

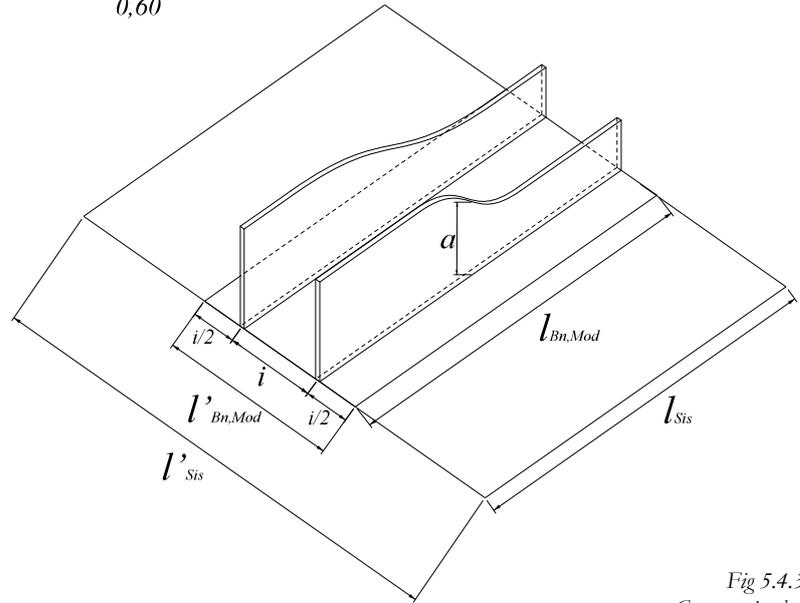


Fig 5.4.3.2.3
Camera riverberante
con i baffle
in conformazione B
posti con interasse minimo,
10,25 cm

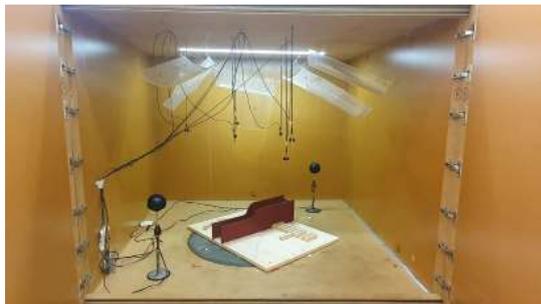


Fig 5.4.3.2.4
Camera riverberante
con i baffle
in conformazione B
posti con interasse massimo,
37,25 cm



Interasse

0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37
B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15	B16	B17	B18	B19	B20	B21	B22	B23	B24	B25	B26	B27	B28

Prova

La distribuzione degli assorbimenti appare proporzionale alle prove A, con una variabilità, ridotta proporzionalmente alla superficie assorbente, accentuata nella zona tra i 1000 e 1500 Hz, anche se, in questo caso, se ne registra in questo caso una maggior presenza nella zona tra 2500 e 4000 Hz. Nel grafico che ha in ordinata gli interassi possiamo però apprezzare una distribuzione più simile per i valori delle alte frequenze.

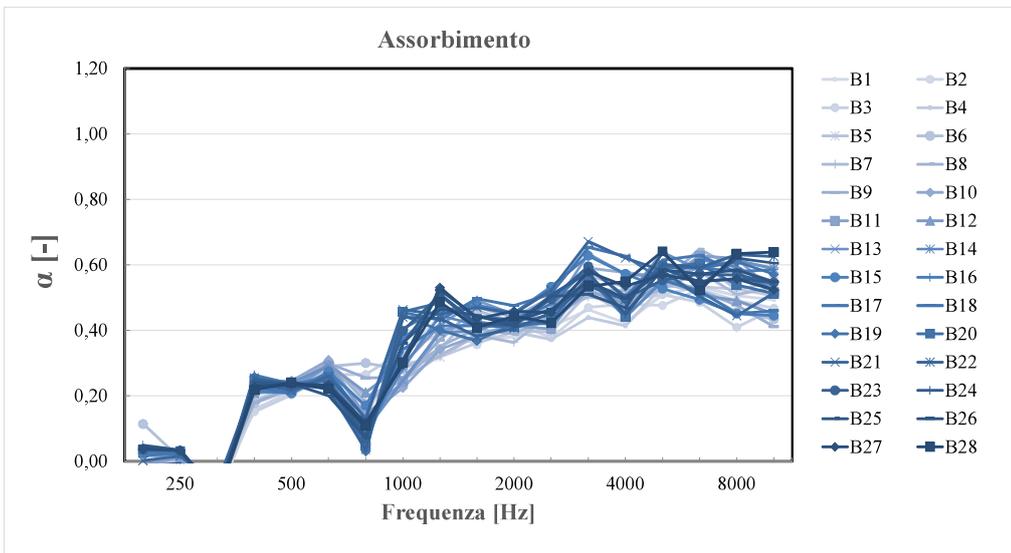
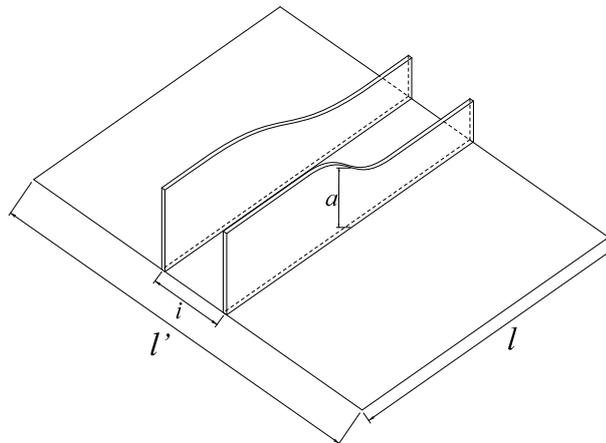


Fig 5.4.3.2.A
Grafico dell'assorbimento acustico delle prove con conformazione B

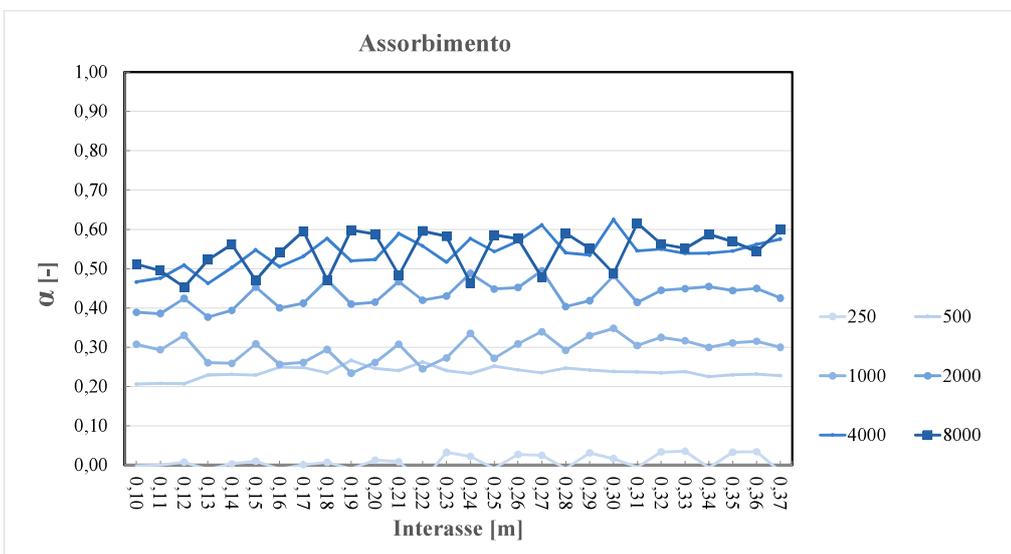
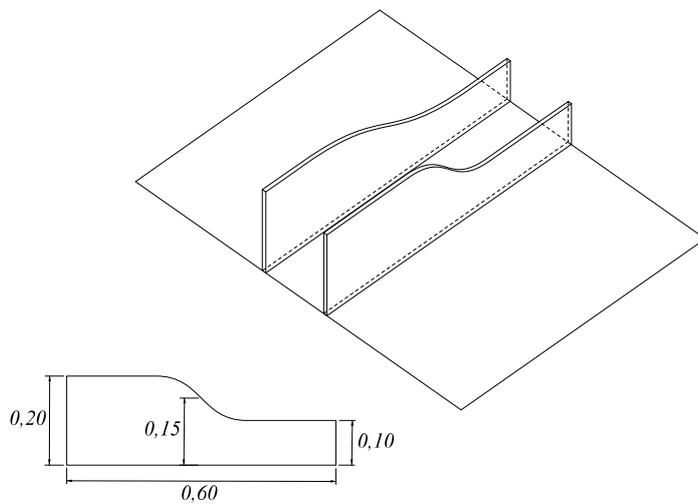


Fig 5.4.3.2.B
Grafico dell'assorbimento acustico per bande di ottava ed in ordinata i valori di lunghezza dell'interasse delle prove con conformazione B



Nell'assorbimento per unità di superficie si può notare una variabilità molto più simile ai valori di A, anche in questo caso però, leggermente superiore per le frequenze medio alte.

Fig 5.4.3.2.C
Grafico dell'assorbimento acustico unitario della superficie dei baffles delle prove con conformazione B

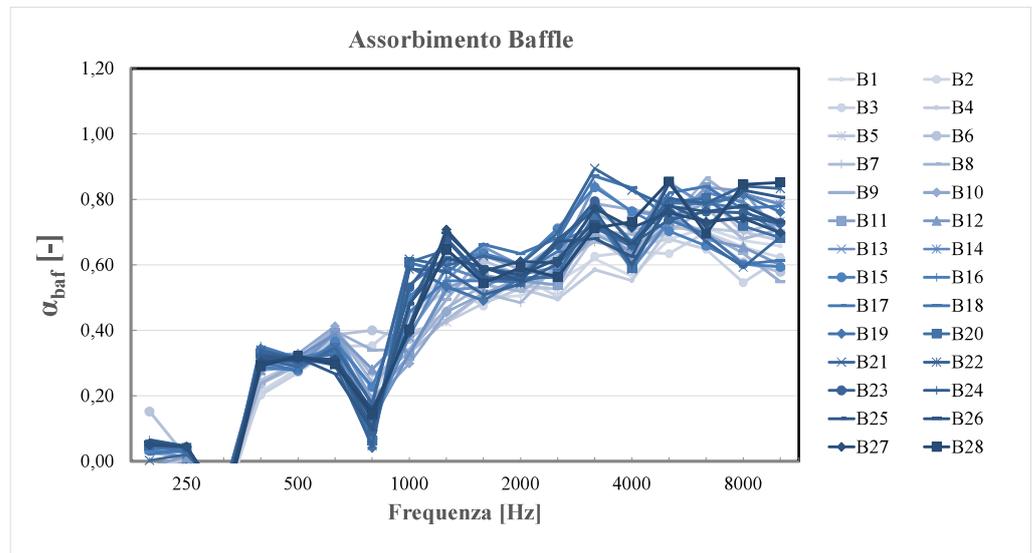
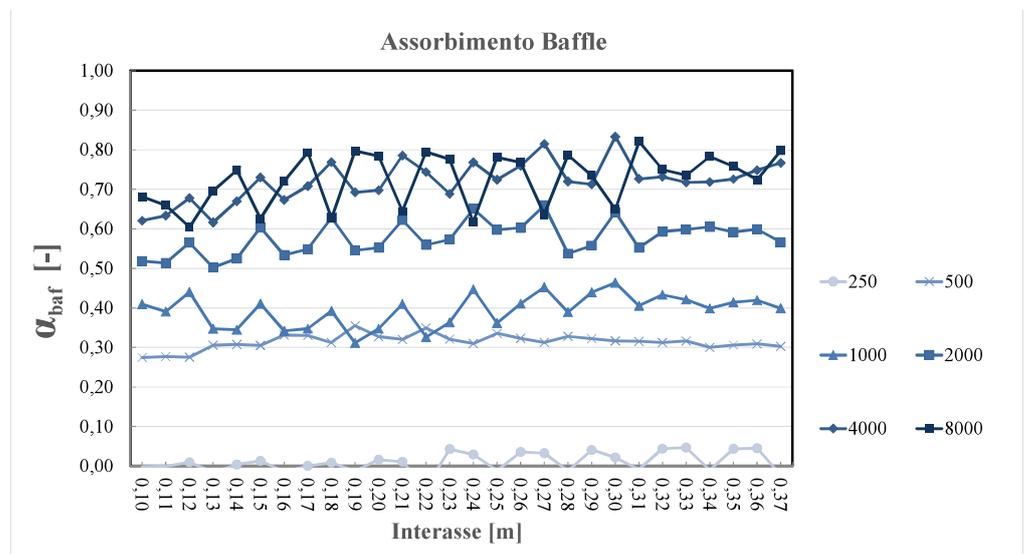


Fig 5.4.3.2.D
Grafico dell'assorbimento acustico unitario della superficie dei baffles per bande di ottava ed in ordinata i valori di lunghezza dell'interasse delle prove con conformazione B



Il decremento dell'assorbimento, come nelle prove A, pare avere un andamento lineare tra le prove con un a' intorno al valore di 1: da B4 a B8,

con $0,88 > a' > 1,15$;

$0,13 > i > 0,17$.

Nel secondo grafico gli andamenti appaiono più lineari per via dello scostamento sempre maggiore rispetto a valori bassi di a' .

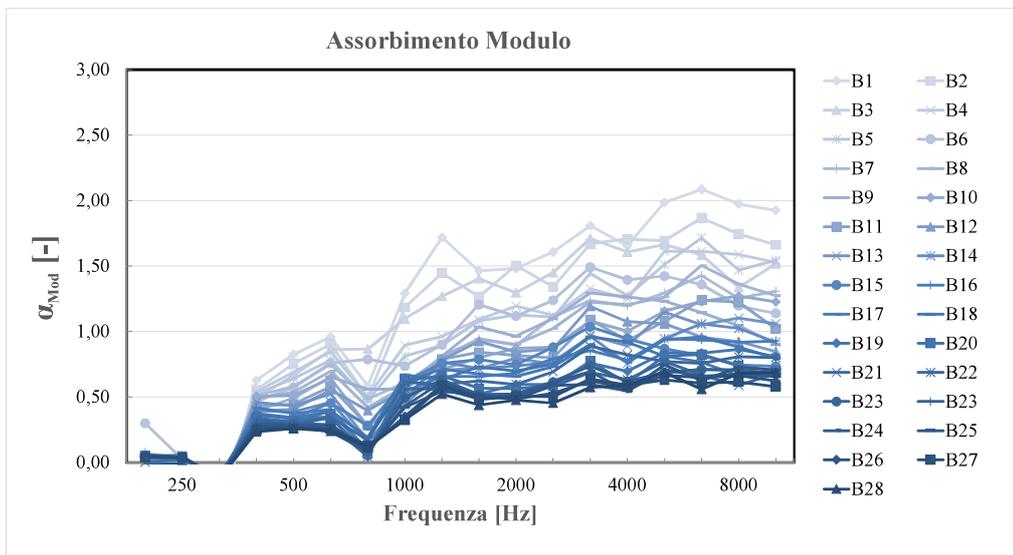
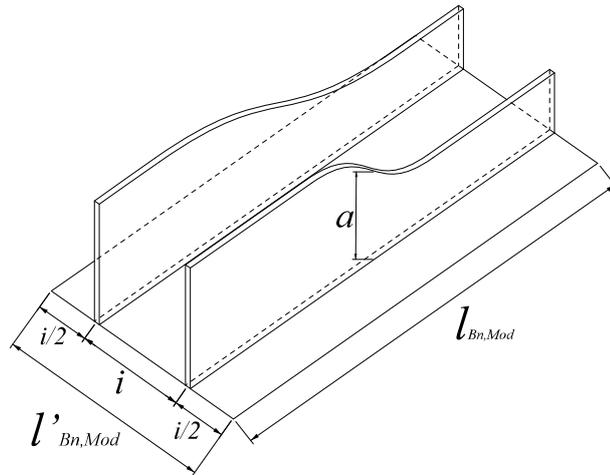


Fig 5.4.3.2.E
Grafico dell'assorbimento acustico di modulo delle prove con conformazione B

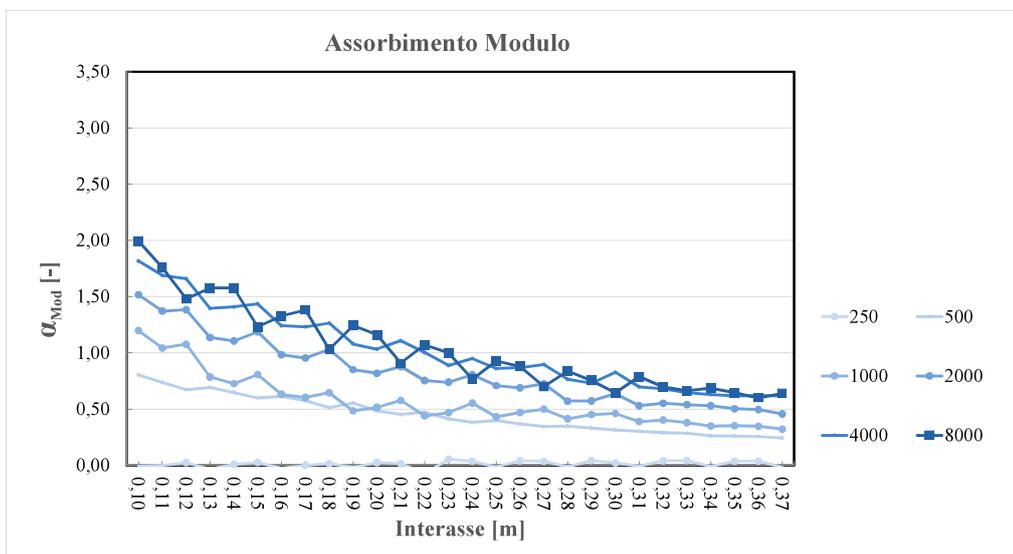


Fig 5.4.3.2.F
Grafico dell'assorbimento acustico di modulo per bande di ottava ed in ordinata i valori di lunghezza dell'interasse delle prove con conformazione B

Fig 5.4.3.3.1,2
 Camera riverberante
 con i baffle
 in conformazione C
 posti verticalmente con
 organizzazione casuale per



5.4.3.3 Conformazione C

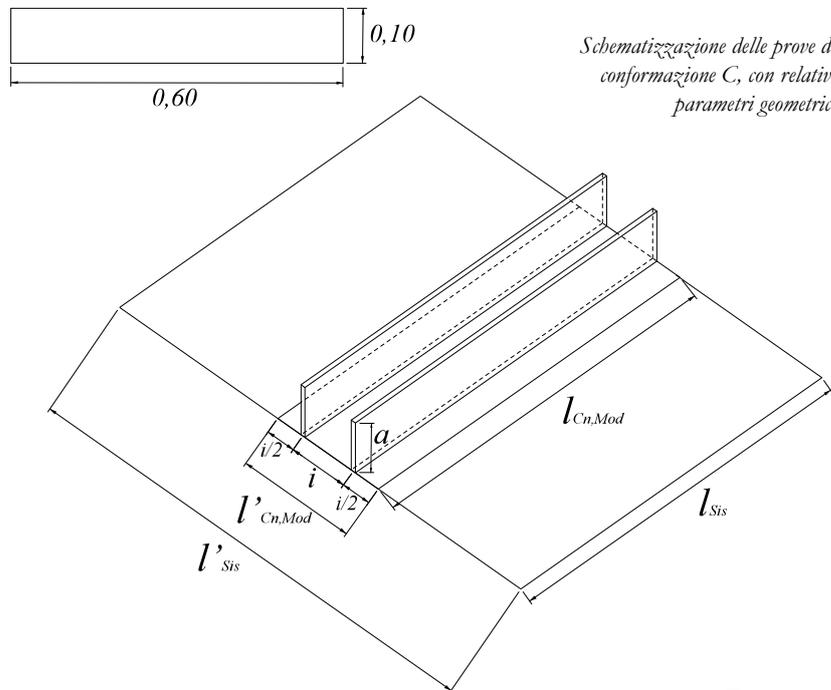


Fig 5.4.3.3.3
 Camera riverberante
 con i baffle
 in conformazione C
 posti con interasse minimo,
 10,25 cm



Fig 5.4.3.3.4
 Camera riverberante
 con i baffle
 in conformazione C
 posti con interasse massimo,
 37,25 cm



Interasse

<u>0.10</u>	<u>0.11</u>	<u>0.12</u>	<u>0.13</u>	<u>0.14</u>	<u>0.15</u>	<u>0.16</u>	<u>0.17</u>	<u>0.18</u>	<u>0.19</u>	<u>0.20</u>	<u>0.21</u>	<u>0.22</u>	<u>0.23</u>	<u>0.24</u>	<u>0.25</u>	<u>0.26</u>	<u>0.27</u>	<u>0.28</u>	<u>0.29</u>	<u>0.30</u>	<u>0.31</u>	<u>0.32</u>	<u>0.33</u>	<u>0.34</u>	<u>0.35</u>	<u>0.36</u>	<u>0.37</u>
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27	C28

Prova

La distribuzione degli assorbimenti appare anche in questo caso proporzionale alle prove A, con una variabilità, questa volta, molto più accentuata attorno alle 8000 Hz. Nel grafico che ha in ordinata gli interassi si può notare una maggior corrispondenza con le prove B.

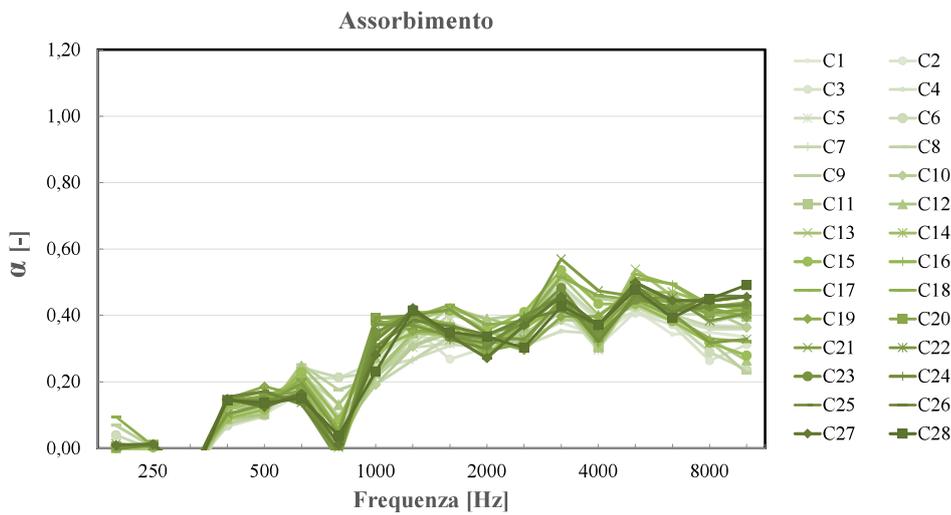
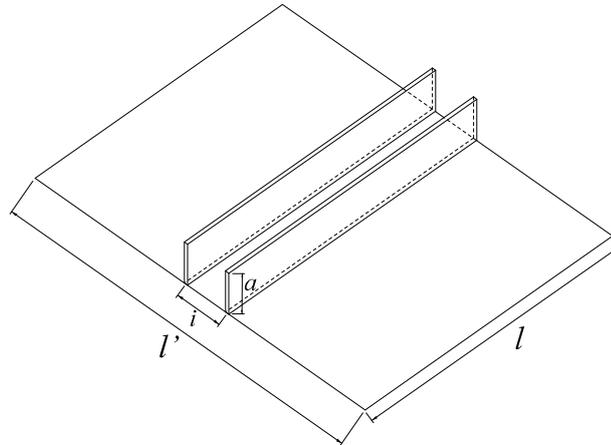


Fig 5.4.3.3.A
Grafico dell'assorbimento acustico delle prove con conformazione C

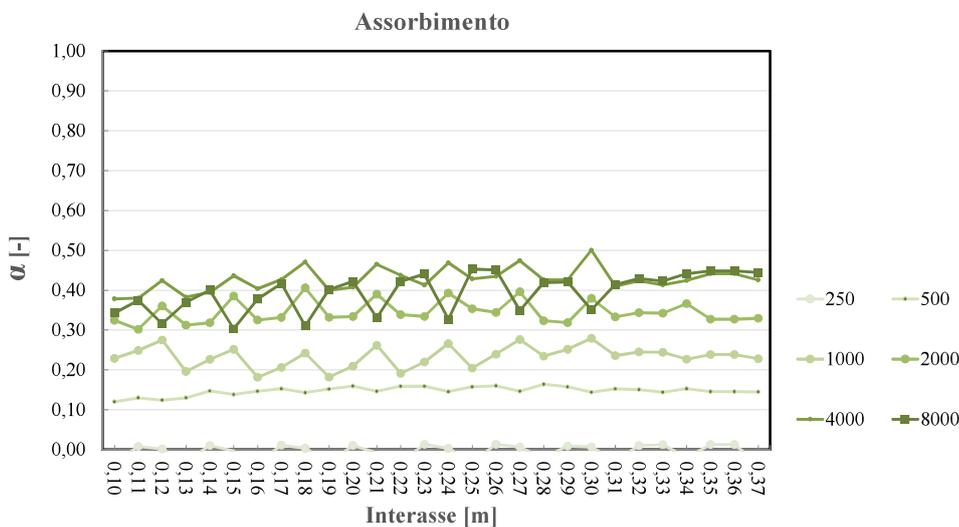
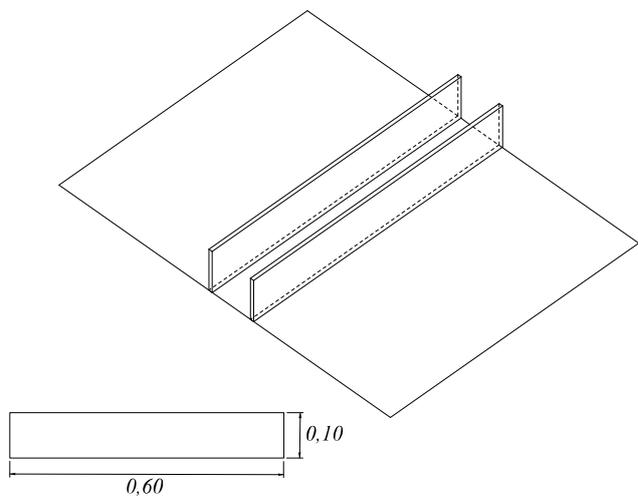


Fig 5.4.3.3.B
Grafico dell'assorbimento acustico per bande di ottava ed in ordinata i valori di lunghezza dell'interasse delle prove con conformazione C



In questa serie di prove, nell'assorbimento per unità di superficie si vedono i più alti valori, dovuti all'area ridotta dei pannelli.

Fig 5.4.3.3.C
Grafico dell'assorbimento acustico unitario della superficie dei baffles delle prove con conformazione C

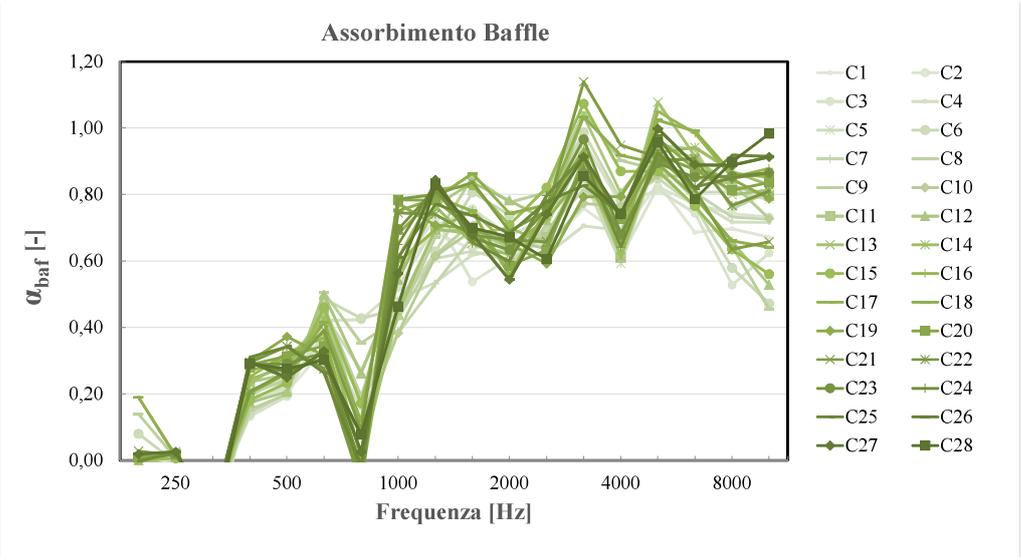
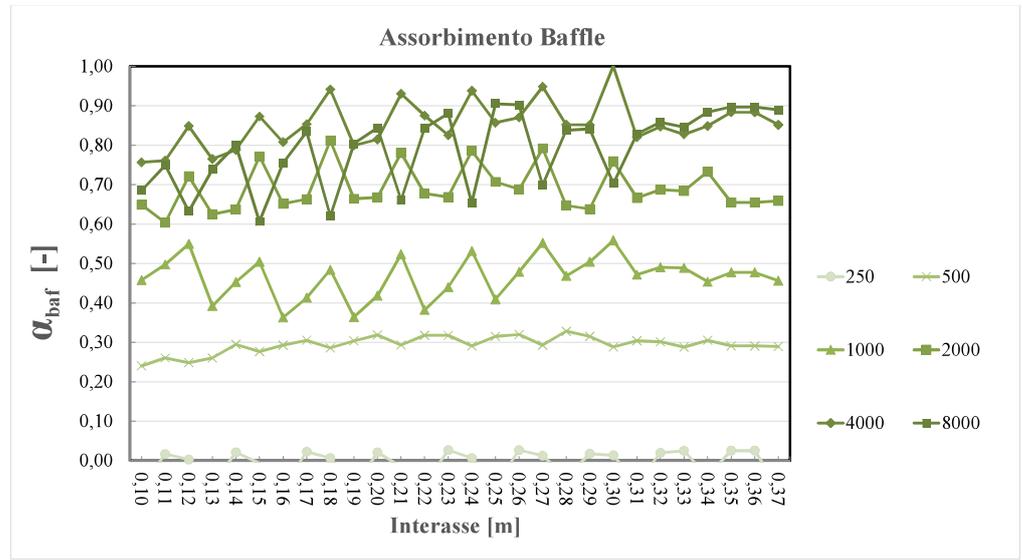


Fig 5.4.3.3.D
Grafico dell'assorbimento acustico unitario della superficie dei baffles per bande di ottava ed in ordinata i valori di lunghezza dell'interasse delle prove con conformazione C



In questo caso i valori di a' sono uguali o superiori a 1.

Possiamo anche qui vedere un decremento delle prestazioni assorbenti del modulo progressivo, decremento che diventa pressoché assente superata la soglia di $a' \geq 3$, come apprezzabile più chiaramente in Fig. 5.4.3.3.F.

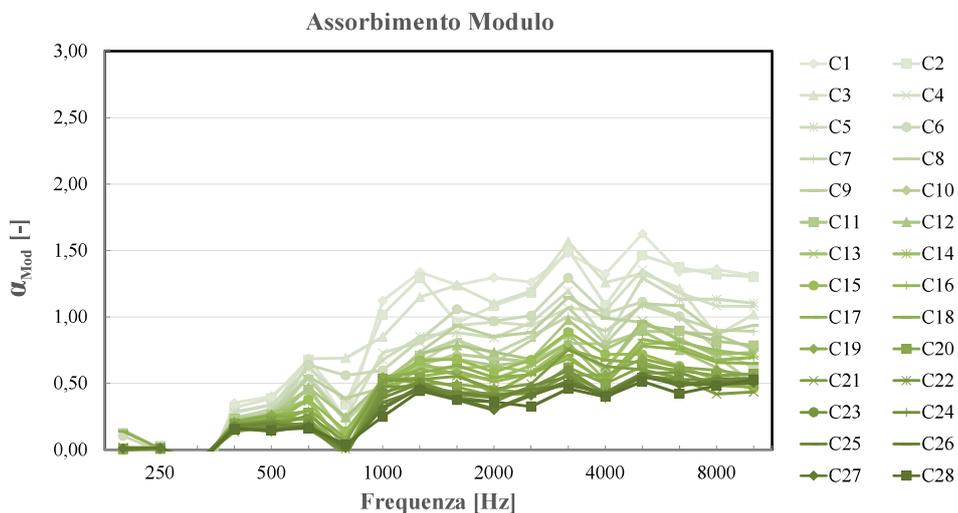
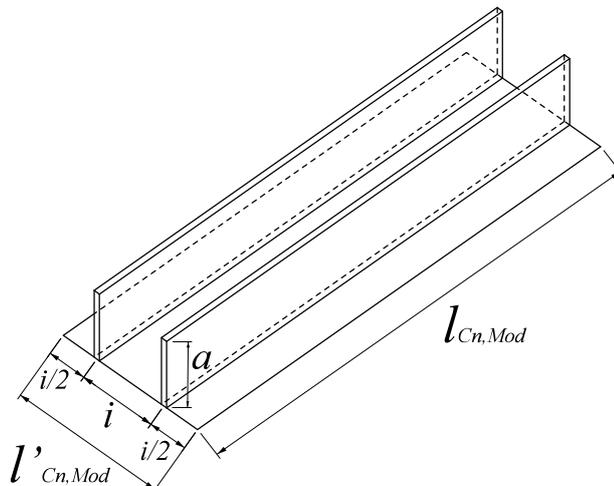


Fig 5.4.3.3.E
Grafico dell'assorbimento acustico di modulo delle prove con conformazione C

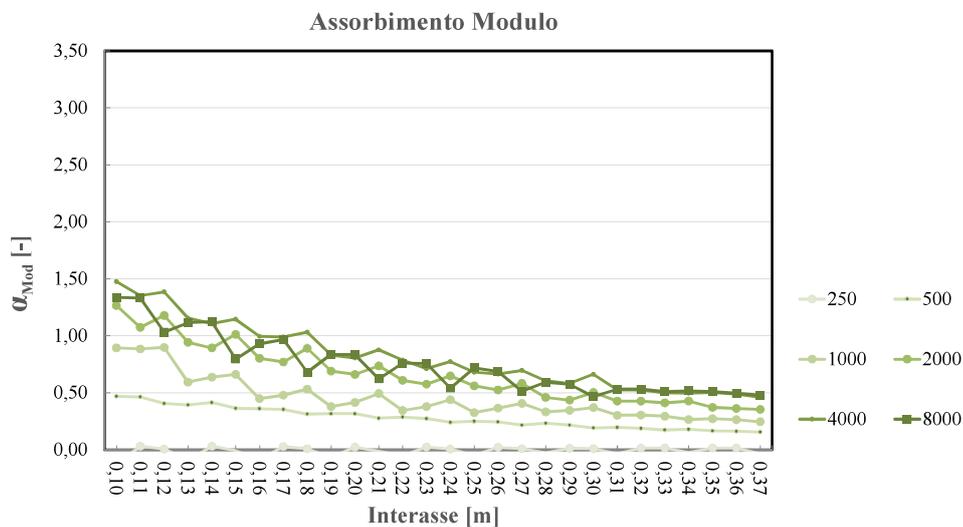
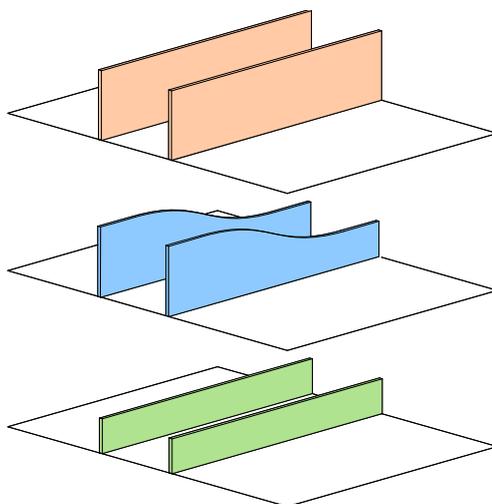


Fig 5.4.3.3.F
Grafico dell'assorbimento acustico di modulo per bande di ottava ed in ordinata i valori di lunghezza dell'interasse delle prove con conformazione C

5.5.4 Confronto delle conformazioni

Fig 5.6.4.1
Schema delle configurazioni
di sistema dei baffles nelle
conformazioni di A, B, C



Qui di seguito i grafici di confronto dell'assorbimento di sistema in bande di ottava delle tre diverse conformazioni, con in ordinata gli interessi.

Possiamo vedere una corrispondenza dei picchi e delle valli nei valori di assorbimento dovuti agli effetti di risonanza.

Fig 5.5.4.A
Grafico
dell'assorbimento
acustico a 500 Hz
in ordinata i valori
di lunghezza
dell'interasse
delle prove con
conformazione
A, B, C

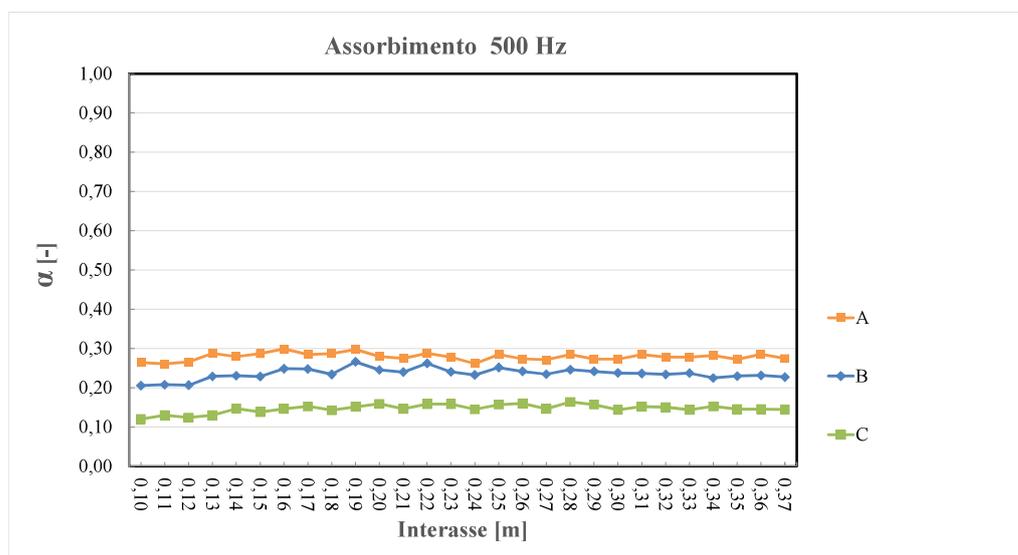
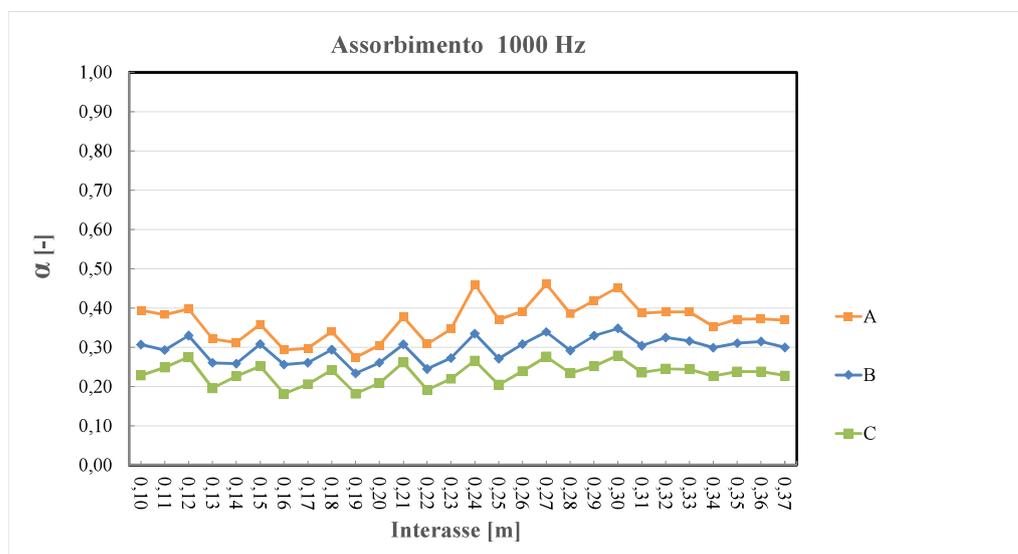


Fig 5.5.4.B
Grafico
dell'assorbimento
acustico a 1000 Hz
in ordinata i valori
di lunghezza
dell'interasse
delle prove con
conformazione
A, B, C



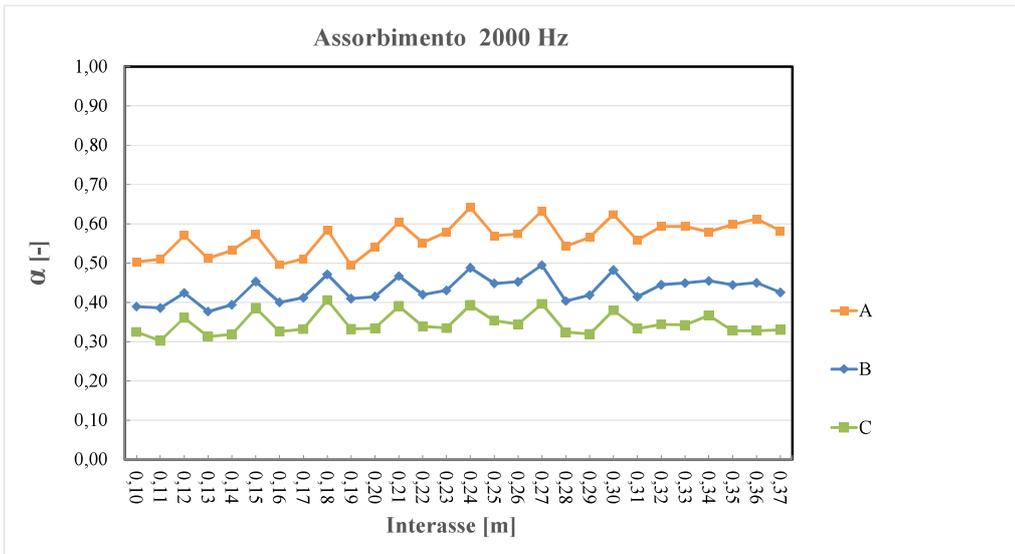


Fig 5.5.4.C
Grafico dell'assorbimento acustico a 2000 Hz in ordinata i valori di lunghezza dell'interasse delle prove con conformazione A, B, C

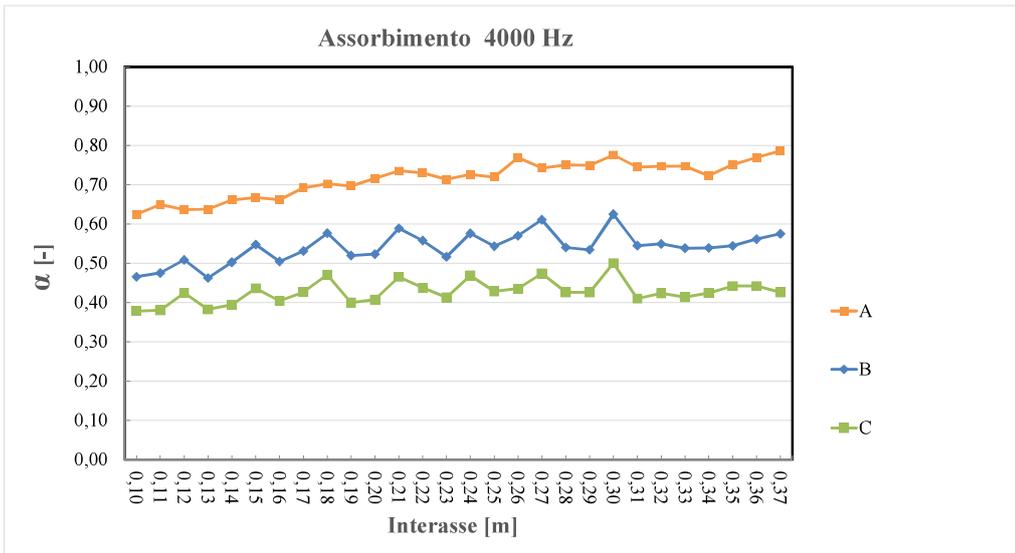


Fig 5.5.4.D
Grafico dell'assorbimento acustico a 4000 Hz in ordinata i valori di lunghezza dell'interasse delle prove con conformazione A, B, C

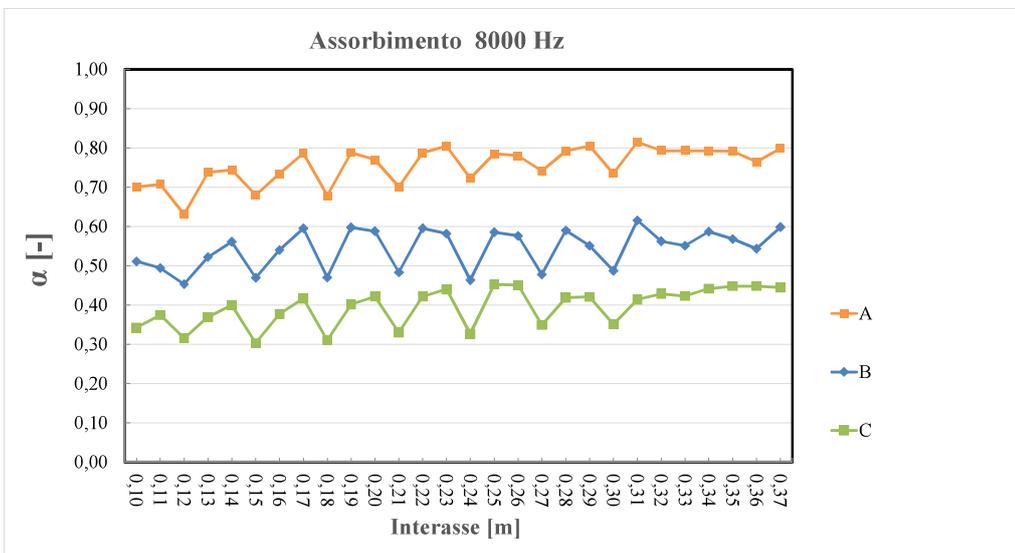
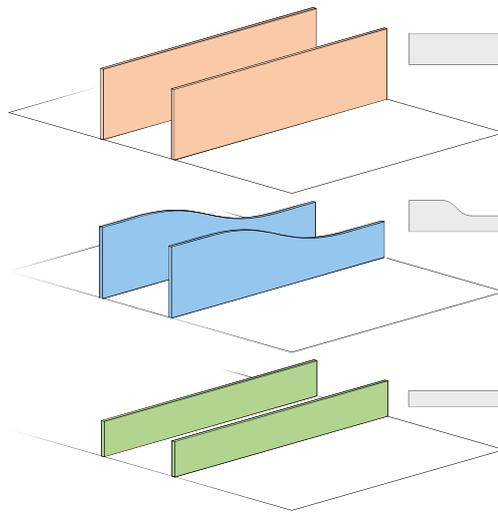


Fig 5.5.4.E
Grafico dell'assorbimento acustico a 8000 Hz in ordinata i valori di lunghezza dell'interasse delle prove con conformazione A, B, C

Fig 5.5.4.2
Schema delle configurazioni di sistema e delle superfici di riferimento dei baffles nelle conformazioni di A, B, C



I grafici di confronto dell'assorbimento di superficie unitaria in bande di ottava delle tre diverse conformazioni confermano la corrispondenza dei picchi e delle valli nei valori di assorbimento dovuti agli effetti di risonanza, con un evidente scostamento dei valori del gruppo C, dovuto alla superficie ridotta in proporzione agli interassi di prova, scostamento che si riduce per le frequenze attorno agli 8000 Hz, dove è preponderante la rugosità del materiale.

Fig 5.5.4.F
Grafico dell'assorbimento acustico della superficie dei baffles a 500 Hz in ordinata i valori di lunghezza dell'interasse delle prove con conformazione A, B, C

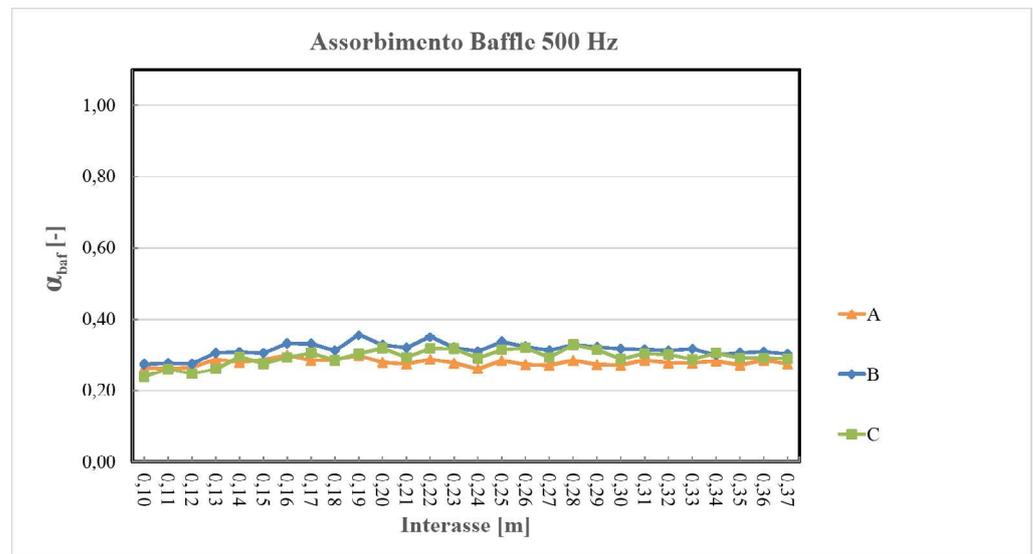
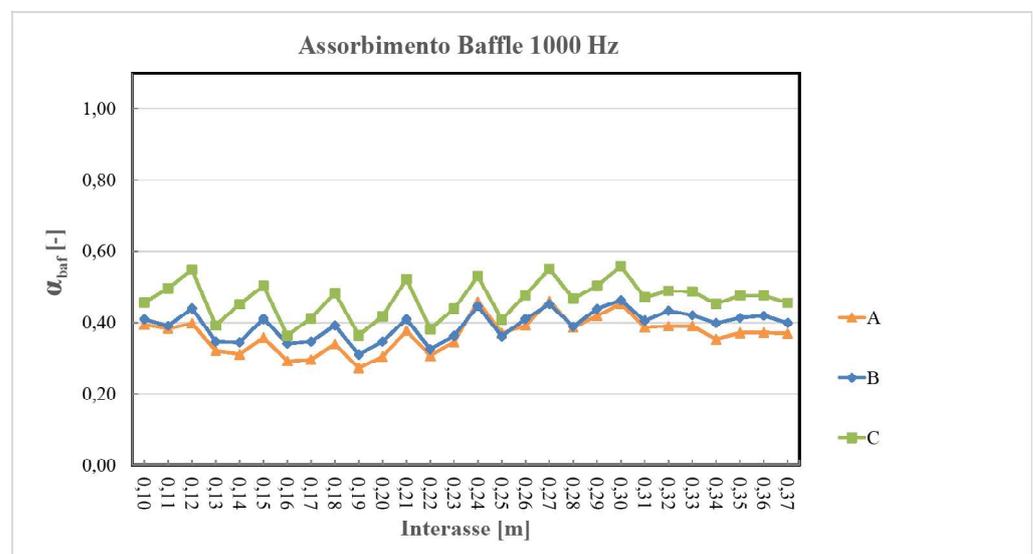


Fig 5.5.4.G
Grafico dell'assorbimento acustico della superficie dei baffles a 1000 Hz in ordinata i valori di lunghezza dell'interasse delle prove con conformazione A, B, C



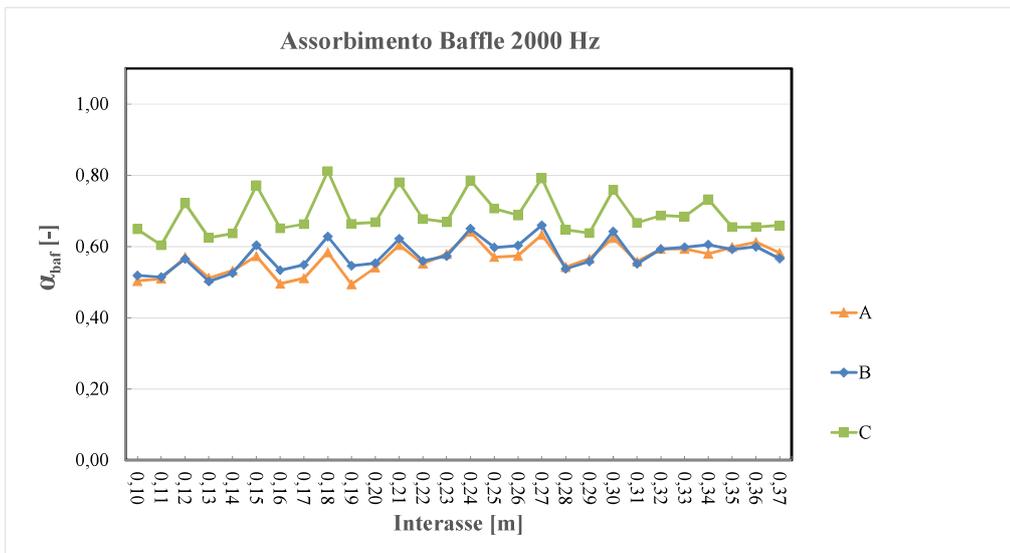


Fig 5.5.4.H
Grafico dell'assorbimento acustico della superficie dei baffles a 2000 Hz in ordinata i valori di lunghezza dell'interasse delle prove con conformazione A, B, C

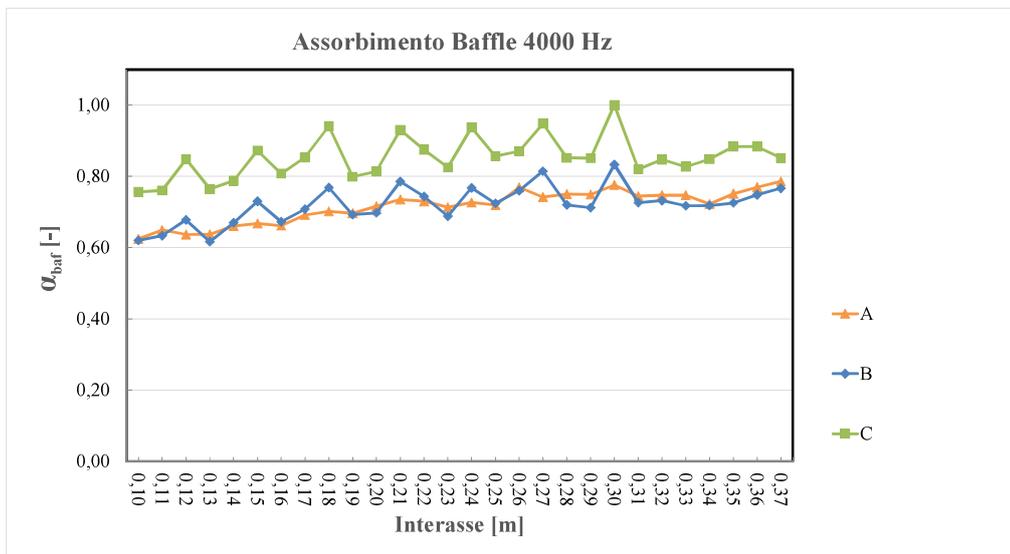


Fig 5.5.4.I
Grafico dell'assorbimento acustico della superficie dei baffles a 4000 Hz in ordinata i valori di lunghezza dell'interasse delle prove con conformazione A, B, C

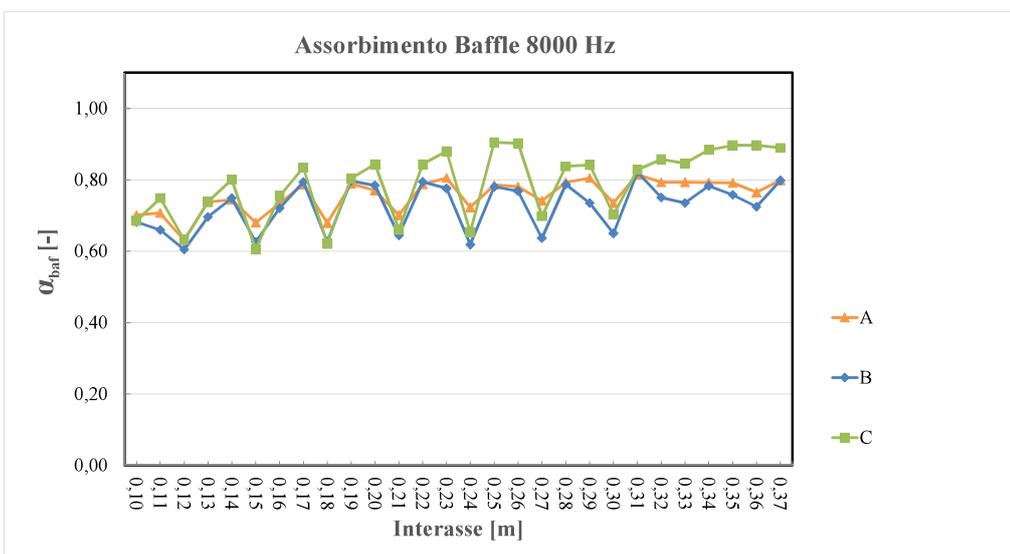
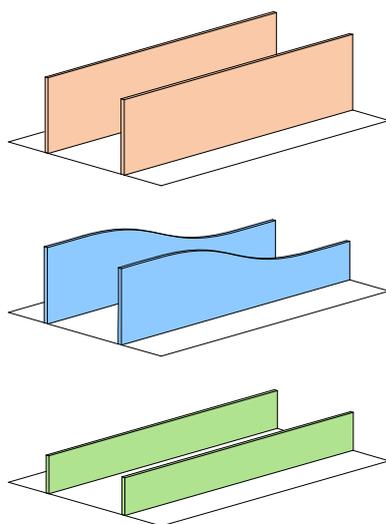


Fig 5.5.4.L
Grafico dell'assorbimento acustico della superficie dei baffles a 8000 Hz in ordinata i valori di lunghezza dell'interasse delle prove con conformazione A, B, C

Fig 5.5.4.2
 Schema delle configurazioni
 di modulo nelle conformazioni
 di baffle A, B, C



Nei grafici di confronto dell'assorbimento di modulo in bande di ottava delle tre diverse conformazioni si può notare una proporzionalità tra superficie e assorbimento e la già vista corrispondenza di picchi e valli dovuta agli effetti di risonanza. È però il caso di sottolineare come tali effetti tendano ad essere via via meno presenti, fino a non essere più rilevanti, mantenendo quindi un comportamento sostanzialmente invariante, per interassi superiori a 0,27 m, almeno nello spettro di frequenze oggetto di analisi.

Fig 5.5.4.M
 Grafico
 dell'assorbimento
 acustico di modulo
 a 500 Hz
 in ordinata i valori
 di lunghezza
 dell'interasse
 delle prove con
 conformazione
 A, B, C

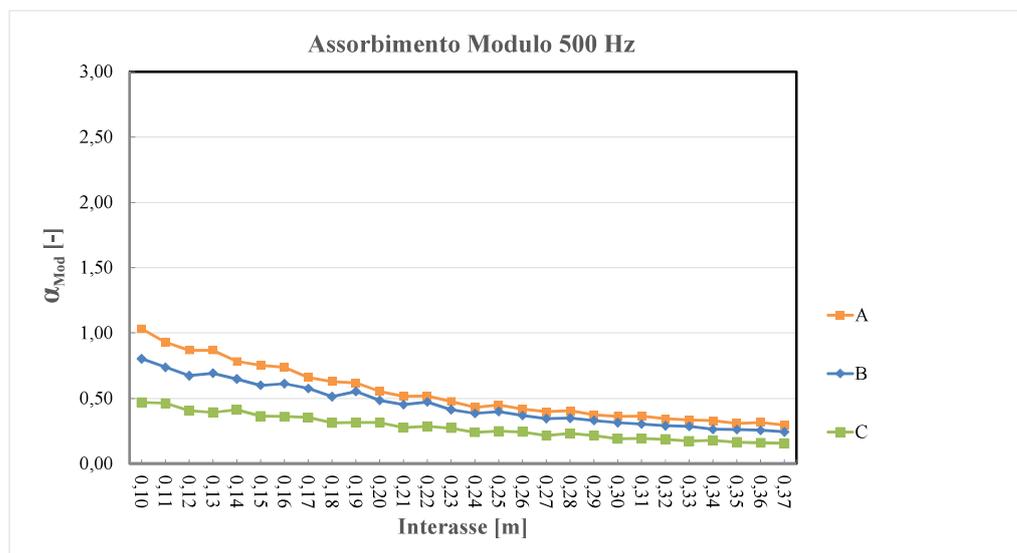
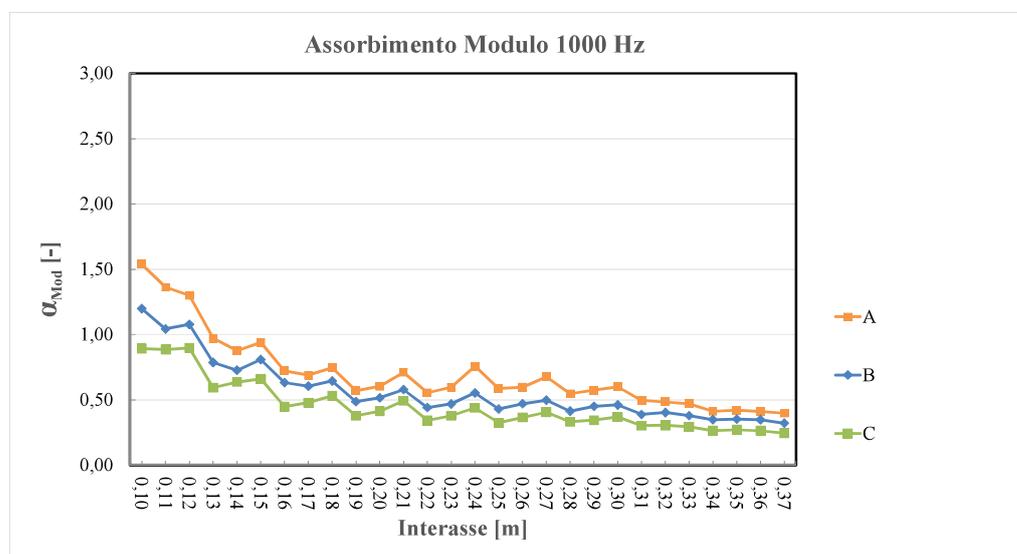


Fig 5.5.4.N
 Grafico
 dell'assorbimento
 acustico di modulo
 a 1000 Hz
 in ordinata i valori
 di lunghezza
 dell'interasse
 delle prove con
 conformazione
 A, B, C



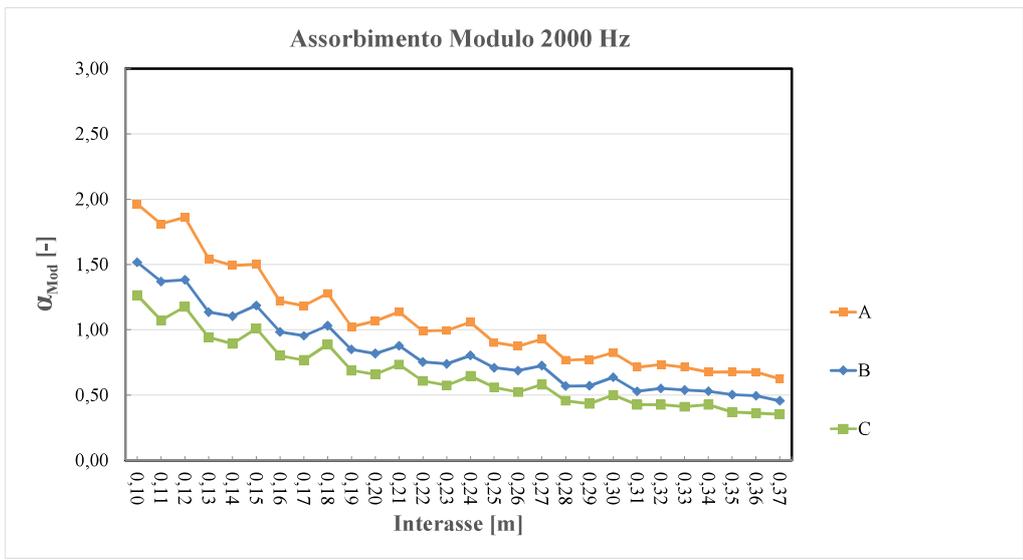


Fig 5.5.4.O
Grafico dell'assorbimento acustico di modulo a 2000 Hz in ordinata i valori di lunghezza dell'interasse delle prove con conformazione A, B, C

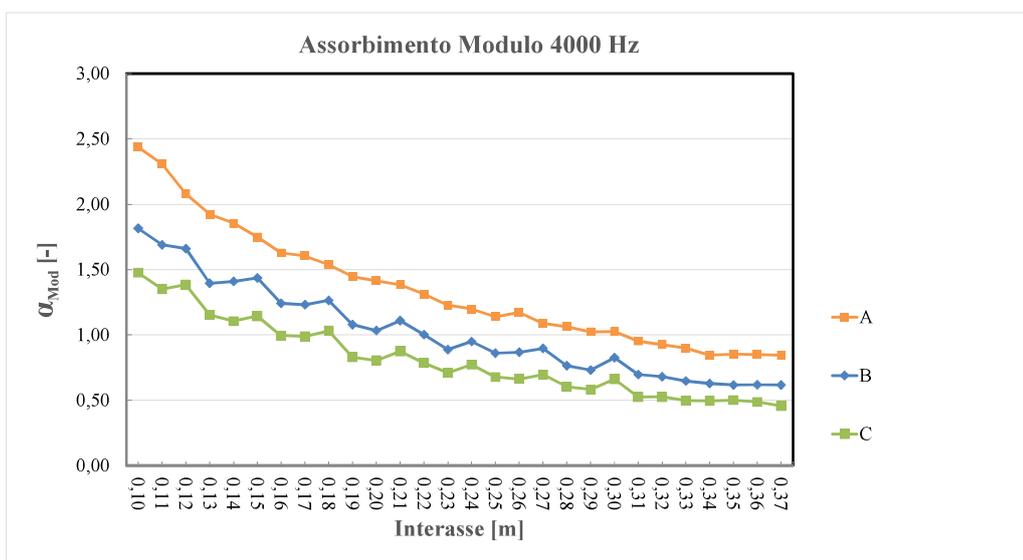


Fig 5.5.4.P
Grafico dell'assorbimento acustico di modulo a 4000 Hz in ordinata i valori di lunghezza dell'interasse delle prove con conformazione A, B, C

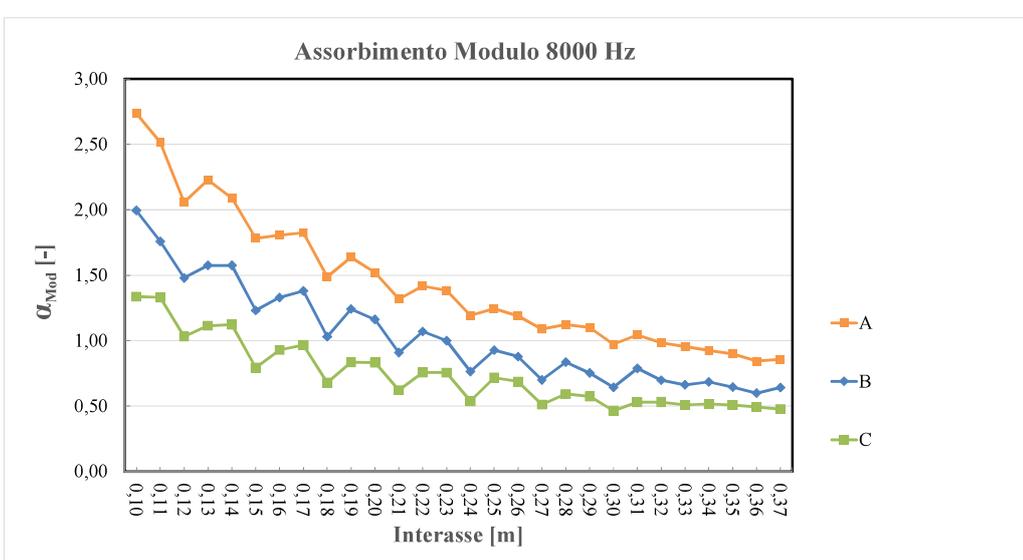
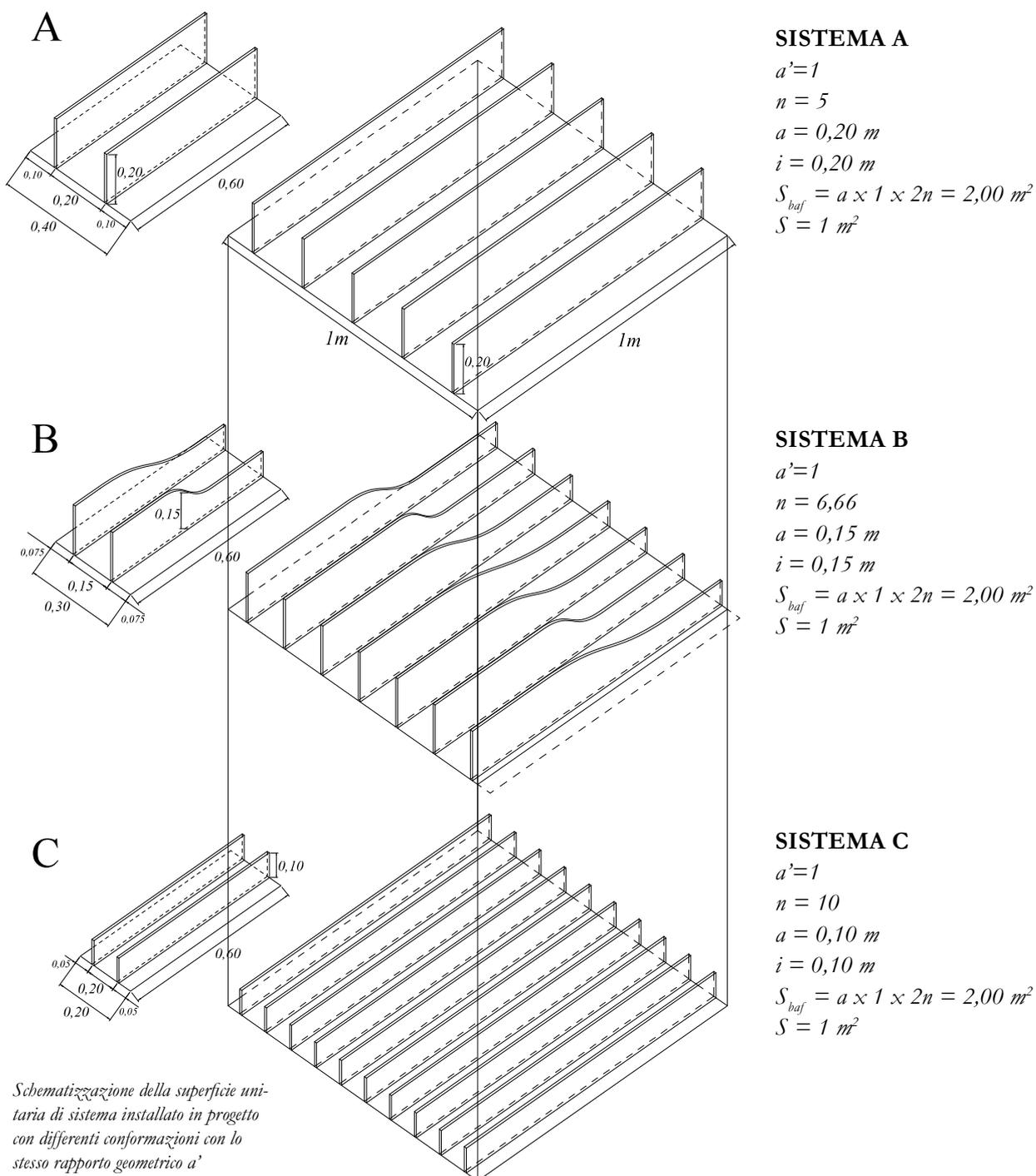


Fig 5.5.4.Q
Grafico dell'assorbimento acustico di modulo a 8000 Hz in ordinata i valori di lunghezza dell'interasse delle prove con conformazione A, B, C

5.6.4.1 Confronto delle conformazioni in base ai valori di a'

Al fine di isolare la componente geometrica che diverrà il principale parametro progettuale, sono quindi stati confrontati i parametri acustici dei moduli con il medesimo rapporto geometrico a' .

Imponendo tale valore adimensionale come parametro e variabile possiamo circoscrivere l'analisi all'incertezza della correlabilità tra assorbimento e dimensione dei baffe dettata dalla variazione di profondità del singolo baffe (a) e dell'interasse (i).



I sistemi correlati avranno quindi al loro interno una rispettiva superficie unitaria degli elementi di pari valore ma variabile numero di moduli inseriti nella superficie medesima.

Questo processo di ricerca di correlazione vuole indagare la variabilità dell'assorbimento acustico del sistema baffle nel momento in cui esso, esattamente come si comporta nel progetto, seppur mantenendo le proporzioni geometriche, varia la dimensione degli elementi e degli interassi al diminuire della distanza dalla sorgente e nelle due sezioni descritte nel paragrafo 5.3.3.

Qui di seguito i grafici di assorbimento nelle cui ordinate è impostato il rapporto di a' , per semplicità d'esposizione, i valori considerati per B e C nelle corrispondenze di a' che non sono state misurate derivano dalla media dei valori immediatamente superiori ed inferiori:

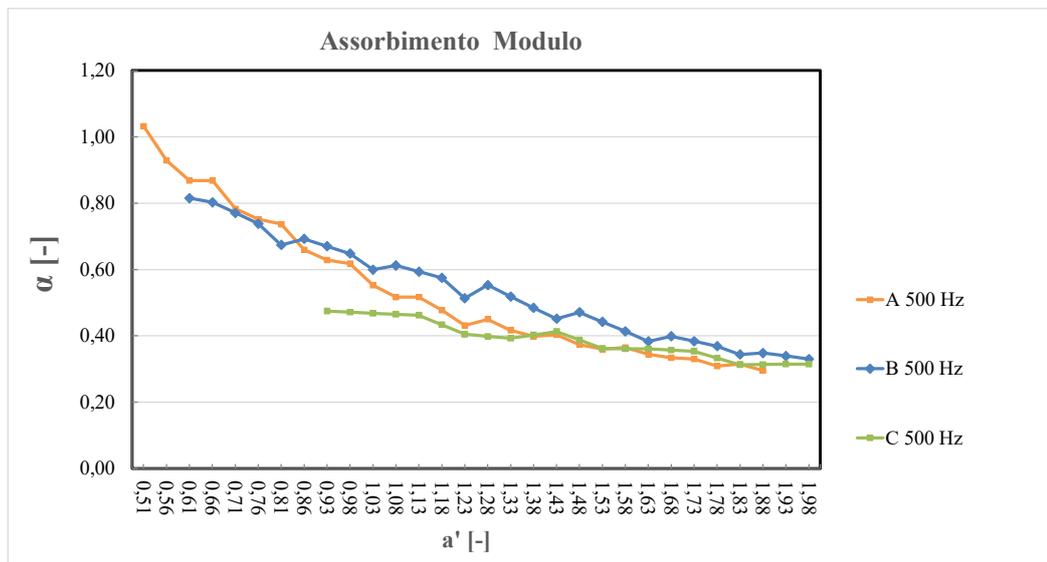


Fig 5.6.4.1.A
Grafico dell'assorbimento acustico di modulo a 8000 Hz in ordinata i valori a' delle prove con conformazione A, B, C

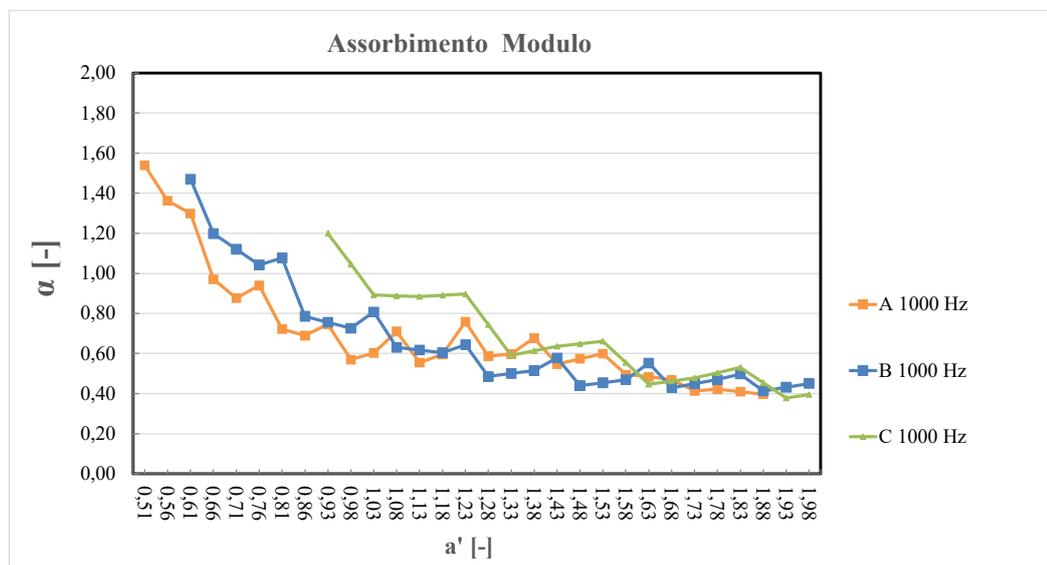


Fig 5.6.4.1.B
Grafico dell'assorbimento acustico di modulo a 8000 Hz in ordinata i valori a' delle prove con conformazione A, B, C

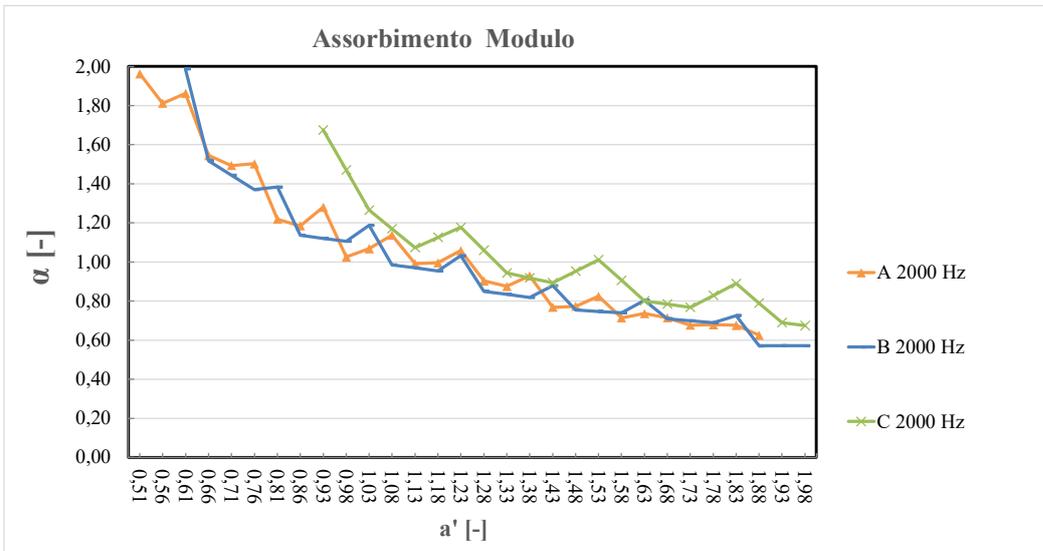


Fig 5.4.3.1.C
Grafico dell'assorbimento acustico di modulo a 2000 Hz in ordinata i valori a' delle prove con conformazione A, B, C

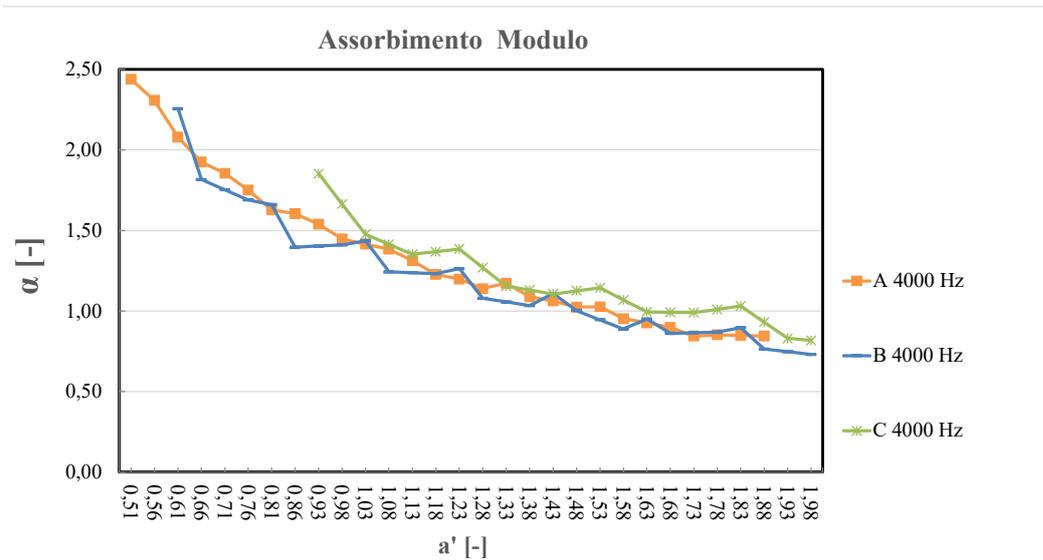


Fig 5.4.3.1.D
Grafico dell'assorbimento acustico di modulo a 4000 Hz in ordinata i valori di a' delle prove con conformazione A, B, C

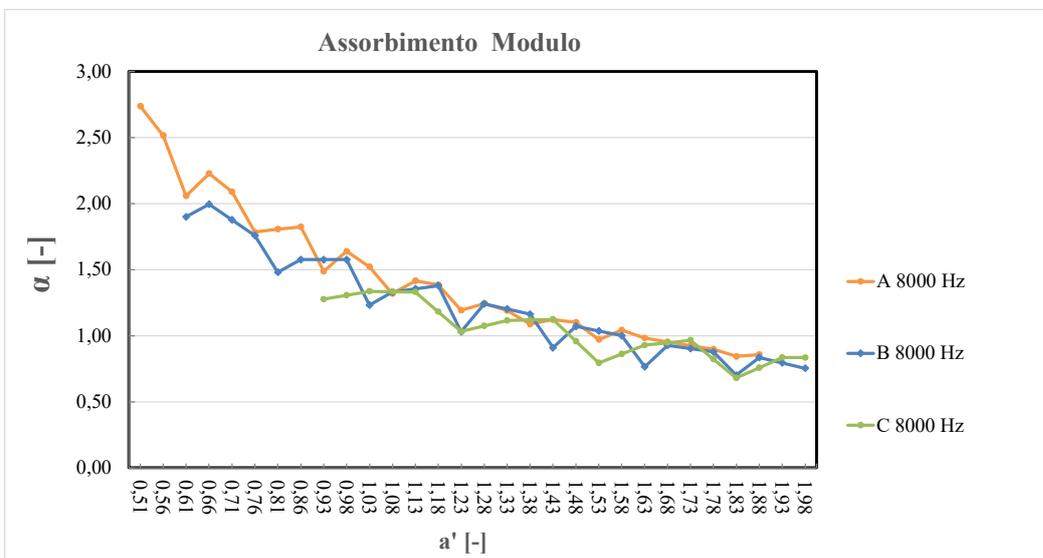


Fig 5.4.3.1.E
Grafico dell'assorbimento acustico di modulo a 8000 Hz in ordinata i valori a' delle prove con conformazione A, B, C

Possiamo notare come al decrescere del valore di a' , quindi, incrementando il numero di elementi (correlati) per unità di superficie di sistema, ci sia una maggiore discrepanza tra i valori di assorbimento di geometrie analoghe.

Questa discrepanza è da attribuirsi a più fattori:

- L'effettivo decremento prestazionale si verifica nell'unità di superficie dei baffles all'aumentare degli elementi sulla superficie di sistema.
- Effetti di risonanza che agiscono su differenti frequenze in relazione ai differenti interassi.
- Fenomeni vibrazionali degli elementi di diversa dimensione, poiché vincolati ad incastro.

5.6 Campi di validità qualitativi

Alla luce delle precedenti considerazioni, che forniscono una base per un ampliamento d'indagine sperimentale o per la creazione di un modello matematico, possiamo definire dei range di incertezza del dato in relazione alla geometria che il modello del sistema di correzione acustica inserito in ODEON presenterà.

Come anticipato, i valori di a' presenti in progetto corrispondono a:

- 1 (geometria analoga alla prova 2, 5 elementi) per la parte inferiore.
- 0,5 (geometria analoga alla PROVA 1, 9 elementi) per la parte superiore dei baffles.

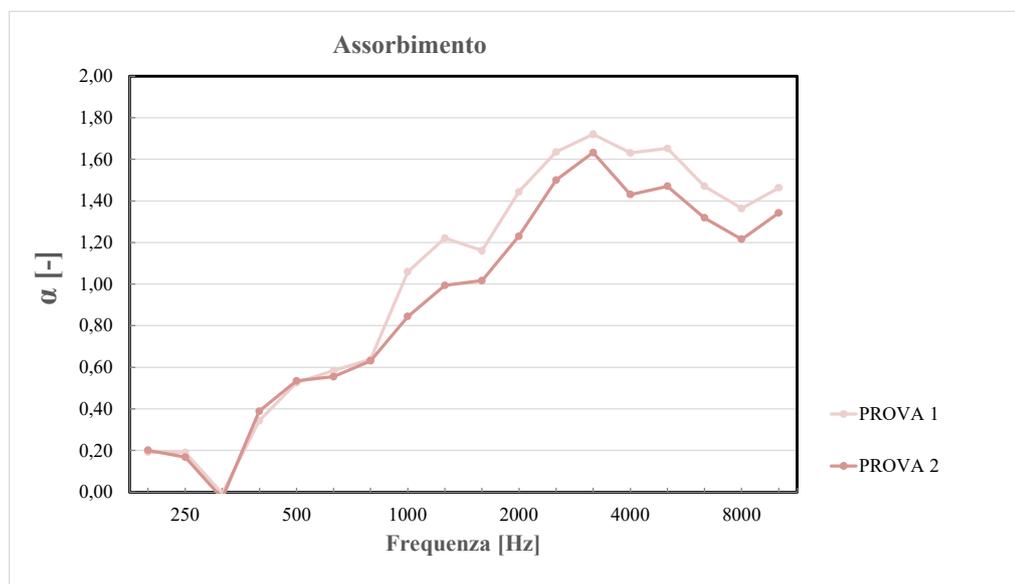
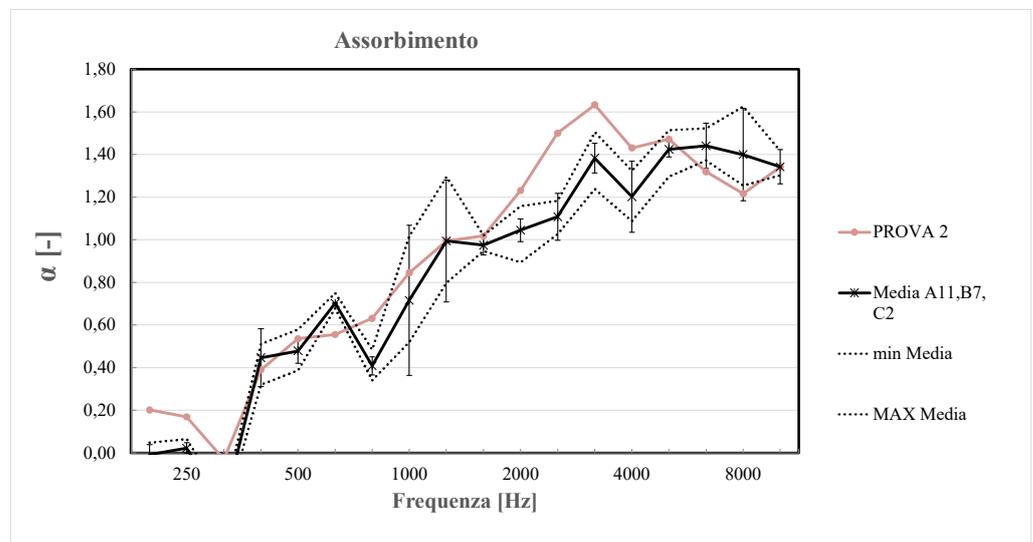


Fig 5.6.A
Grafico
dell'assorbimento
acustico di Sistema
delle prove 1 e 2

Verranno ora analizzati i valori dati dall'assorbimento dei sistemi correlati, basati cioè sull'assorbimento di modulo esteso all'area di sistema, rispetto al sistema acustico misurato nella PROVA 2 che sarà il riferimento per la definizione dei valori di assorbimento del sistema acustico nel modello nella simulazione acustica, nella sezione la cui geometria avrà il fattore di forma a' del valore di 1 (PROVE A11, B7, C2).

Potremmo così definire il grado di incertezza nella valutazione degli assorbimenti del sistema in bande di ottava per quelle porzioni con interasse e larghezza dei baffles proporzionalmente diversi ma con medesimo fattore di forma:

Fig 5.6.4.1.B
Grafico
dell'assorbimento
acustico di Sistema
correlato dai valori
di assorbimento di
modulo delle prove
A11, B7 e C2



Nella porzione il cui fattore di forma sarà $a'=0,5$, i dati di riferimento saranno quelli relativi alla PROVA 1. Per quanto riguarda i coefficienti di scattering, saranno rispettivamente 0,7 per $a'=0,5$ e 0,6 per $a'=1$

5.7 Simulazione acustica di progetto

5.7.1 Simulazione acustica del sistema di correzione composto da soli baffles

Creato il volume che definirà le superfici nella simulazione di progetto (Fig. 5.3.1.22) e definiti i coefficienti di assorbimento e scattering occorre trasferire la forma nello spazio di lavoro ODEON.

La mesh creata su Grasshopper subirà la riduzione del modificatore "Remesh" attraverso Blender per poi essere importata su Sketchup e creare attraverso il plugin il file .par che fornirà ad ODEON le geometrie.

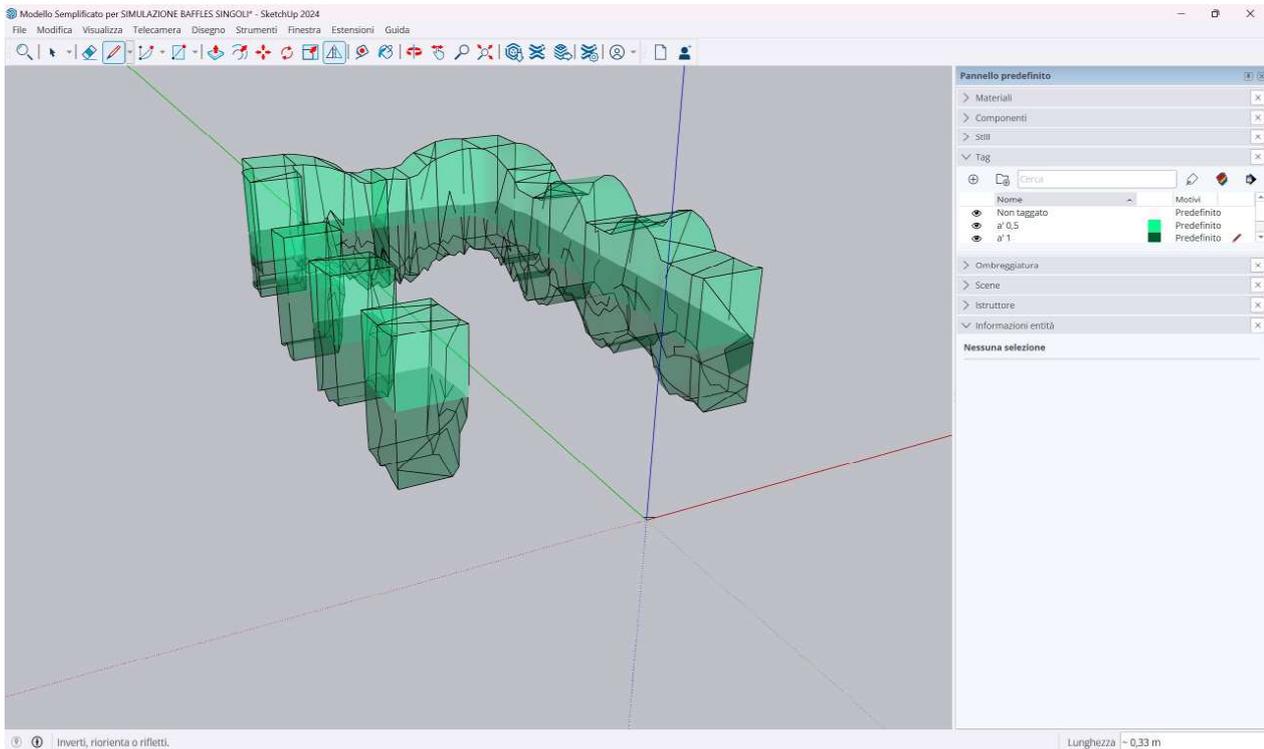
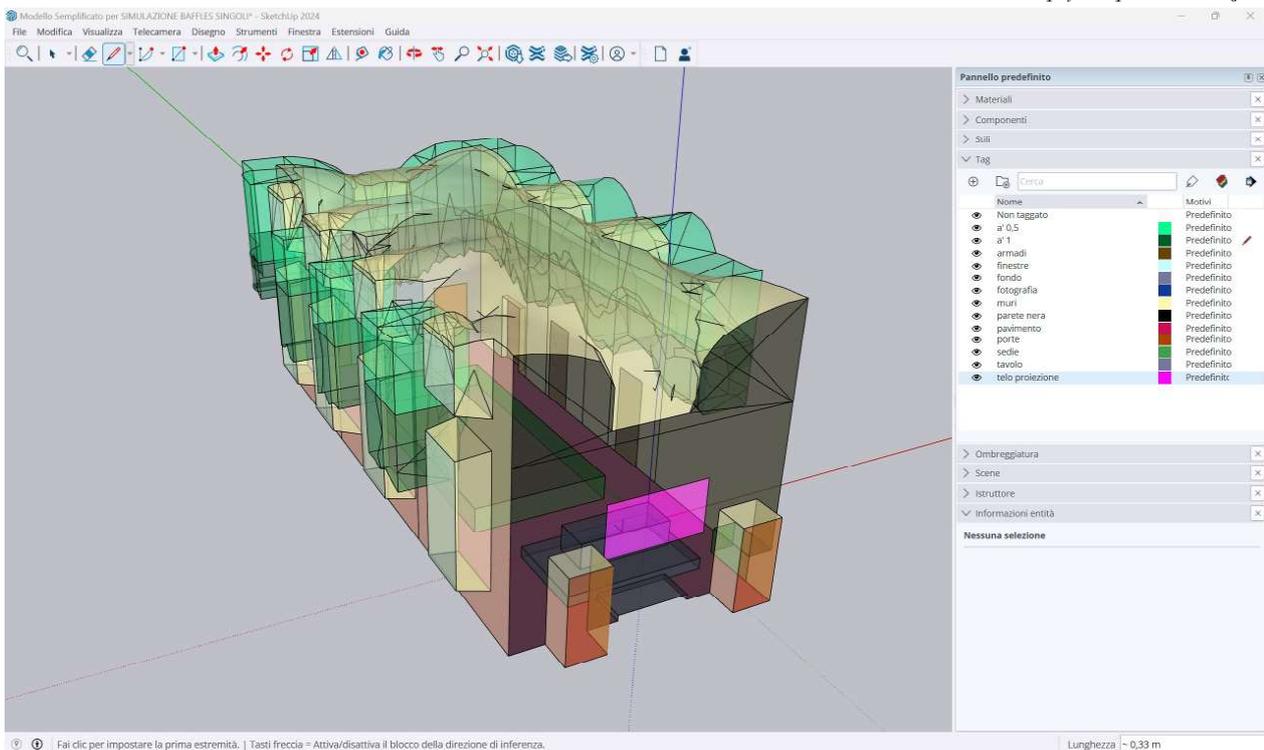


Fig. 5.7.1
Modello del volume del sistema
acustico semplificato per la
simulazione

Il volume è stato suddiviso in due sezioni, assegnando loro due differenti layer, cui sono stati assegnati corrispondenti coefficienti di assorbimento.

Il volume fuoriesce dai confini della stanza, ma dal punto di vista della simulazione acustica non ha importanza, purché le sue superfici all'interno non siano permeabili ai raggi utilizzati dal software di calcolo.

Fig. 5.7.2
Modello completo con volume del sistema acustico
semplificato per la simulazione



	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	$\alpha(w)$	Class
a' 0,5	0.11350	0.11350	0.11350	0.49310	0.82350	0.95000	0.95000	0.95000	0.40(MH)	D
a' 1	0.01000	0.01000	0.12530	0.48440	0.95000	0.95000	0.95000	0.95000	0.45(MH)	D

Fig. 5.7.3

Schermate ricomposte in schema dello spazio di lavoro ODEON, Valori di assorbimento della prova dei layers assegnati alle due zone del sistema acustico.

I coefficienti di assorbimento corrispondono a quelli di PROVA 1 e PROVA 2.

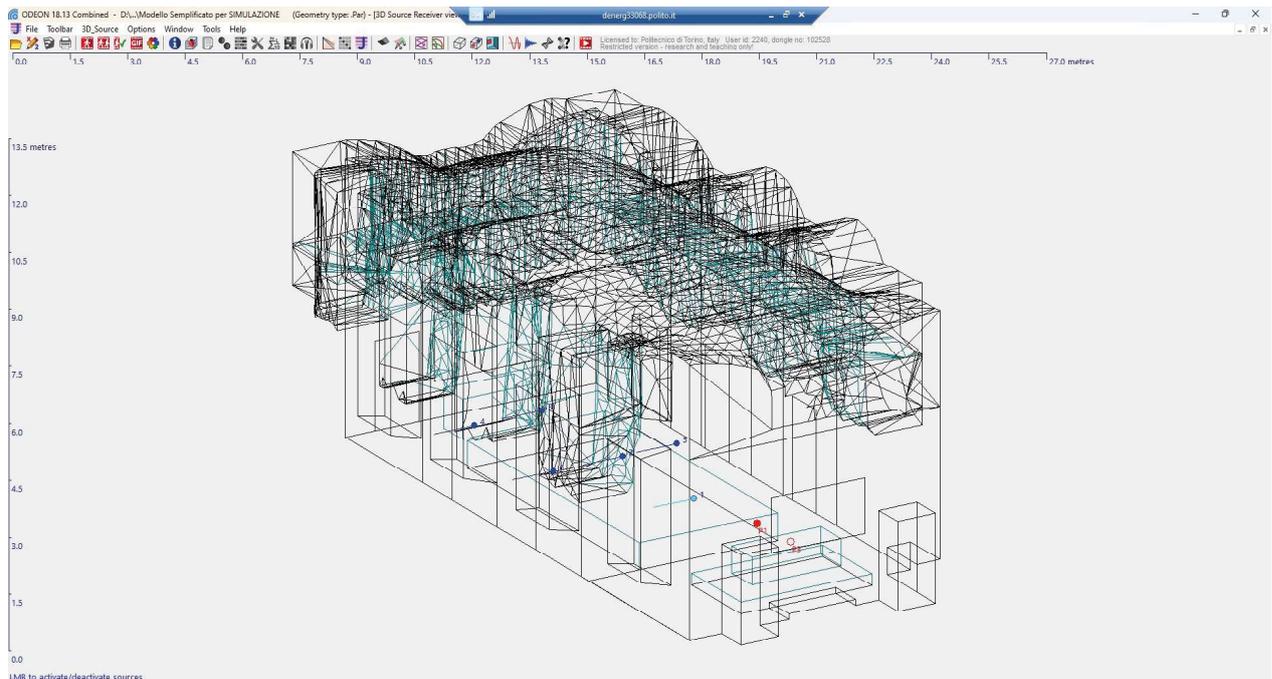


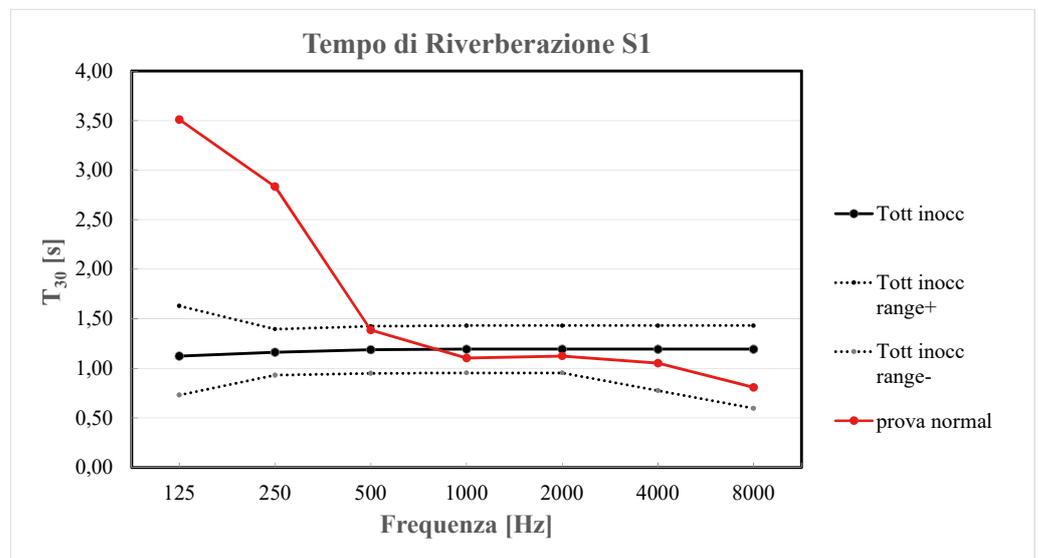
Fig. 5.7.4

Schermata spazio di lavoro ODEON
Modello del volume del sistema acustico semplificato per la simulazione

La simulazione ha mostrato tuttavia risultati insoddisfacenti per quanto riguarda frequenze basse e medio basse, necessita quindi di un'integrazione prestazionale in quella zona dello spettro.

Fig. 5.7.A

Grafico del tempo di riverberazione T_{30} con i risultati delle simulazioni relativo alla Sorgente 1



5.7.1 Simulazione acustica del sistema di correzione composto da baffles e pannelli integrati.

Per fornire l'apporto assorbente alle basse frequenze si è proceduto nel posizionare il sistema di pannelli integrati alla muratura nella parete di fondo, la parete sud ovest, e quella retrostante il palco, la parete nord est.

Il prodotto scelto si chiama BASWA Phon Classic Top.

Tra le misure disponibili, per i suoi requisiti acustici, è stato selezionato il tipo con spessore 70 mm, posizionabile a contatto con la parete esistente.

BASWA Phon Classic Top 70mm

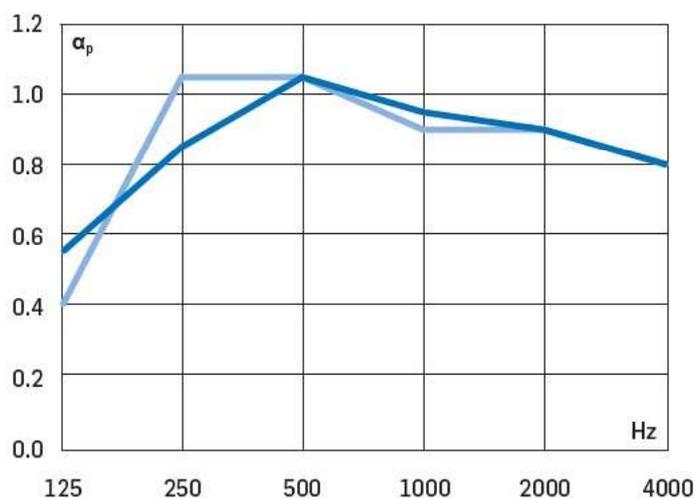


Fig. 5.7.4
Coefficients di assorbimento
acustico in bande di ottava di
BASWA Phon Classic Top
70 mm A Type
www.baswa.com

System	BASWA Phon Classic Top 70 mm	
	Typ A	Typ E-200
Mounting Method	Typ A	Typ E-200
α_w	0.90 (L)	0.95
NRC	1.00	0.95
Absorption Class	A	A
Hz	α_p	α_p
125	0.40	0.55
250	1.00	0.85
500	1.00	1.00
1000	0.90	0.95
2000	0.90	0.90
4000	0.85	0.80



Fig. 5.7.5
Coefficients di assorbimento
acustico in bande di ottava e
campione di BASWA Phon
Classic Top 70 mm A Type
www.baswa.com



Fig. 5.7.6
 Park Pavilion, De Hoge
 Veluwe National Park,
 2019 Otterlo, Paesi Bassi.
 La superficie voltata è stata
 dotata dei dispositivi Baswa.
 Domus, Gennaio 2020
 www.baswa.com

Il posizionamento del sistema acustico dei baffles, sovrapposto a quello dei pannelli integrati, consentirà l'assorbimento e lo scattering alle frequenze medie e medio alte da quest'ultimo, le frequenze più basse, giungeranno invece oltre, fino ad'interfacciarsi con la parete che ospita i pannelli integrati.

Per la natura stessa del metodo ray tracing, non si potrà definire una trasparenza della superficie secondo determinate frequenze.

Ciò che si è scelto di fare è stato suddividere il sistema baffles in ulteriori due layer, che, collocati in corrispondenza delle zone dove esso è montato sul sistema acustico integrato, ne ridefiniscono le performance alle basse frequenze dovutamente all'apporto di quest'ultimo.

Nella seguente tabella, i coefficienti di assorbimento dei layer aggiunti, dove il layer "fondo" si riferisce alle pareti nord est e sud ovest dell'astanza, dove è stato applicato il materiale Baswa.

a' 0,5 fondo e a' 1 fondo corrispondono alla porzione di layer montata su sistema Baswa.

Fig. 5.7.3
 Schermate ricomposte in schema dello spazio
 di lavoro ODEON, Valori di assorbimento
 della prova dei layers assegnati alle due zone
 del sistema acustico ed alle pareti nord est e
 sud ovest trattate con Baswa

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	$\alpha(w)$	Class
a' 0,5	0.11350	0.11350	0.11350	0.49310	0.82350	0.95000	0.95000	0.95000	0.40(MH)	D
a' 1	0.01000	0.01000	0.12530	0.48440	0.95000	0.95000	0.95000	0.95000	0.45(MH)	D
a' 0,5 fondo	0.30000	0.40000	0.95000	0.95000	0.95000	0.95000	0.95000	0.95000	0.95000	A
a' 1 fondo	0.30000	0.40000	0.95000	0.95000	0.95000	0.95000	0.95000	0.95000	0.95000	A
fondo	0.30000	0.40000	0.95000	0.95000	0.90000	0.90000	0.85000	0.78000	0.95000	A

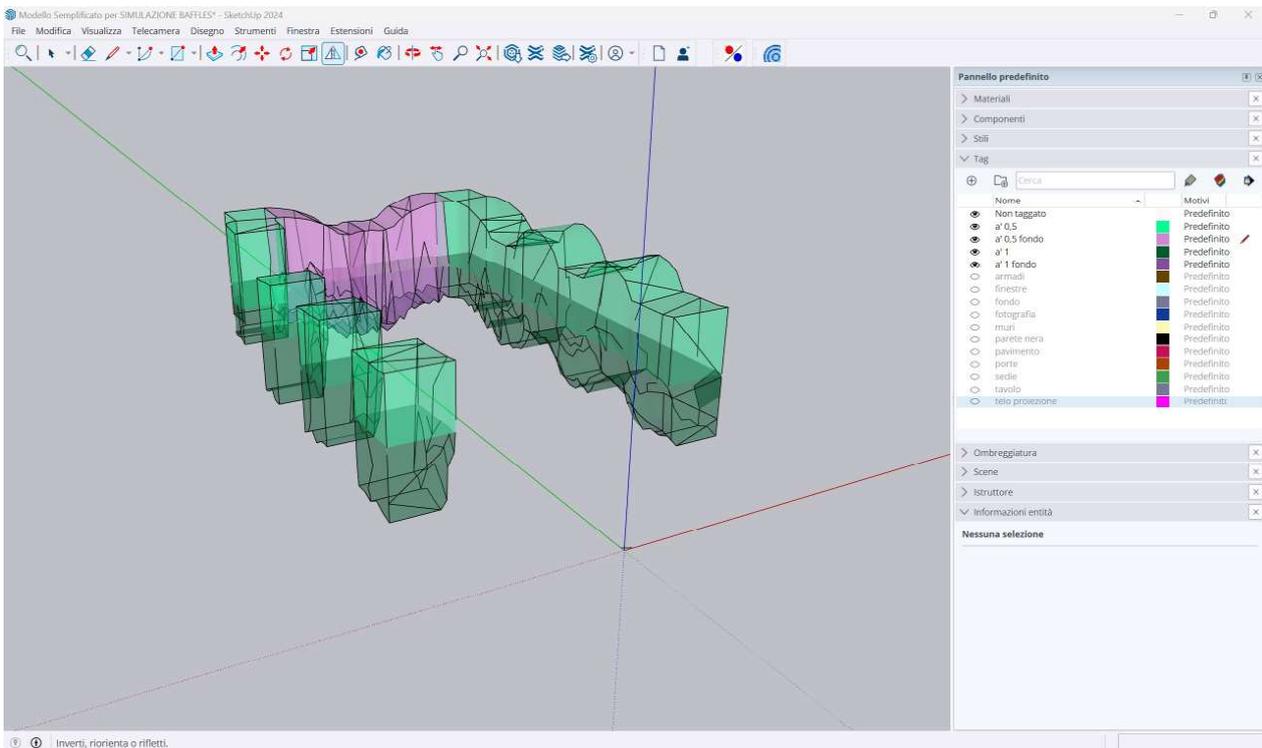
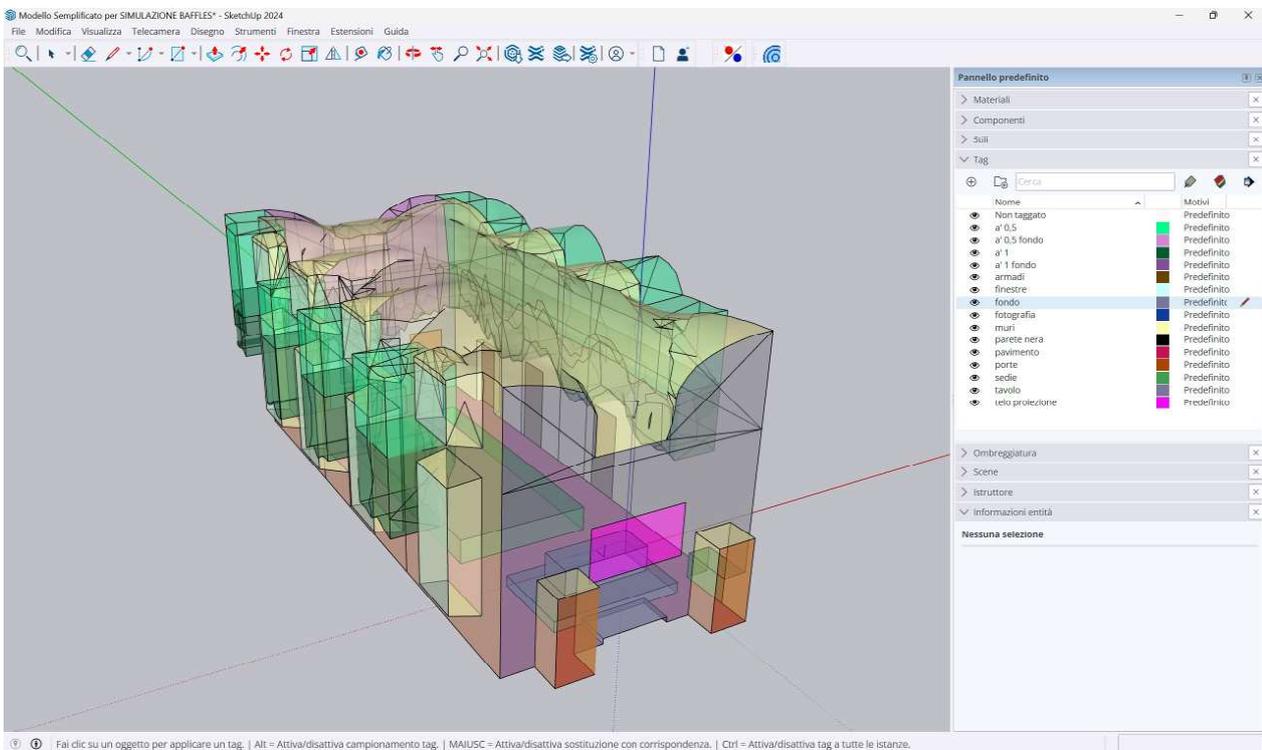


Fig 5.7.1
 Modello del volume del sistema acustico
 semplificato per la simulazione, con la
 separazione dei layers rispetto alla zona di
 montaggio

Fig 5.7.1
 Modello completo con volume del sistema acustico
 semplificato per la simulazione, con la separazione dei
 layers rispetto alla zona di montaggio



Di seguito i grafici e le mappe acustiche dei parametri simulati:

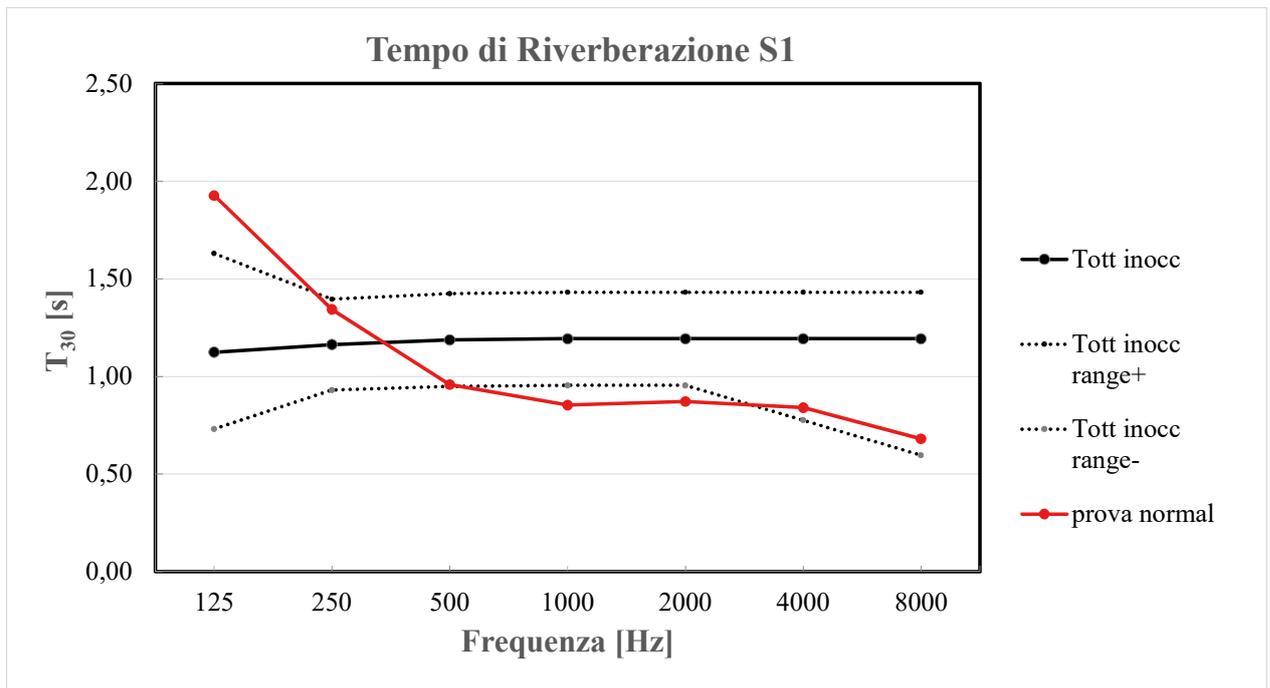
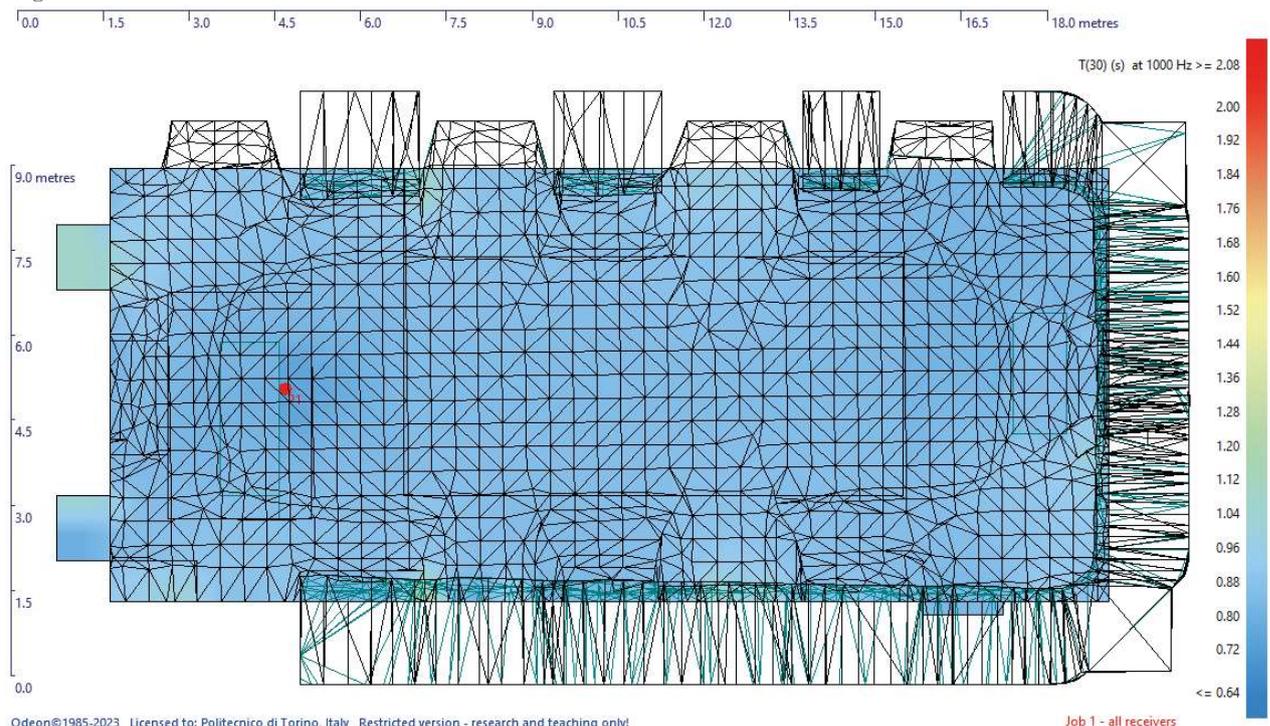


Fig 5.7.A2
Grafico del tempo di riverberazione T_{30} con i risultati delle simulazioni relativo alla Sorgente 1

Il grafico mostra tempi di riverberazione per la Sorgente 1 che rientrano nel limite degli ottimali nella fascia medio bassa, ad esclusione delle frequenze al di sotto dei 200 Hz, sulle quali occorrerebbe intervenire con una correzione mirata. Nella zona delle frequenze medio alte si hanno risultati lievemente al di sotto dei valori ottimali, un compromesso necessario in favore dei risultati riguardanti l'indice di chiarezza e dello STI, visibili nelle pagine seguenti. La mappa acustica mostra i valori di T_{30} nella sala alla frequenza di 1000Hz.

Fig 5.7.MA2
Mappa acustica del tempo di riverberazione T_{30} per la Sorgente 1



Odeon©1985-2023 Licensed to: Politecnico di Torino, Italy Restricted version - research and teaching only!

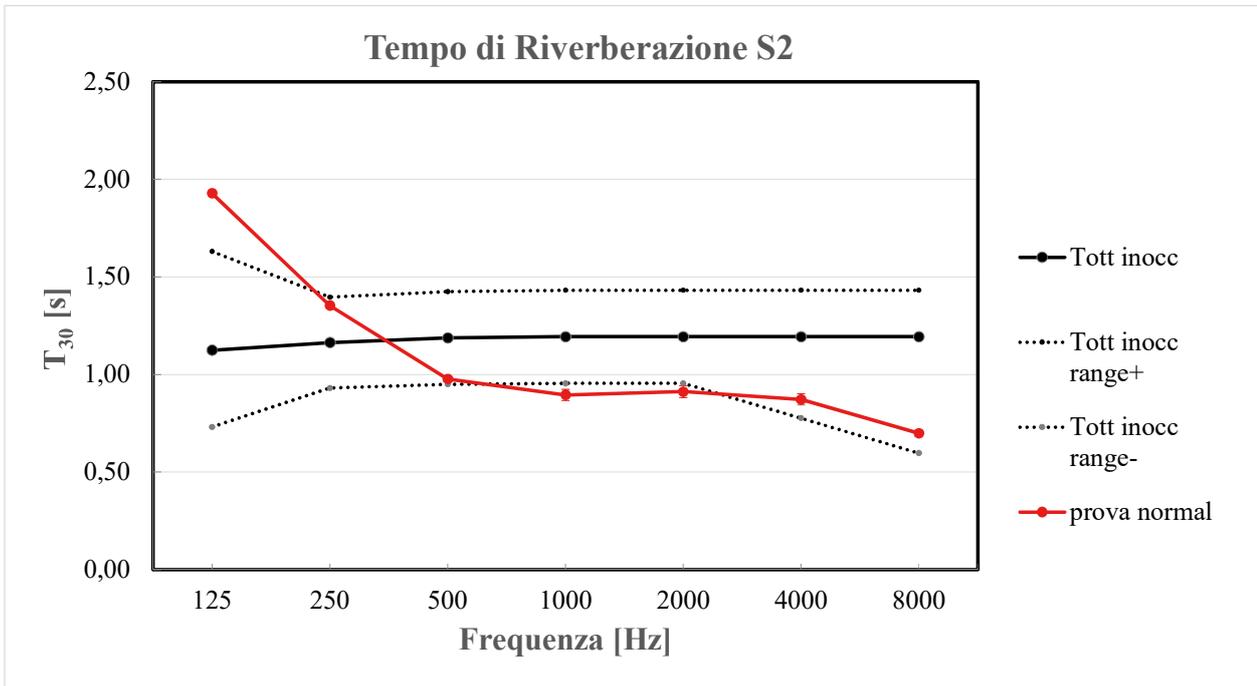
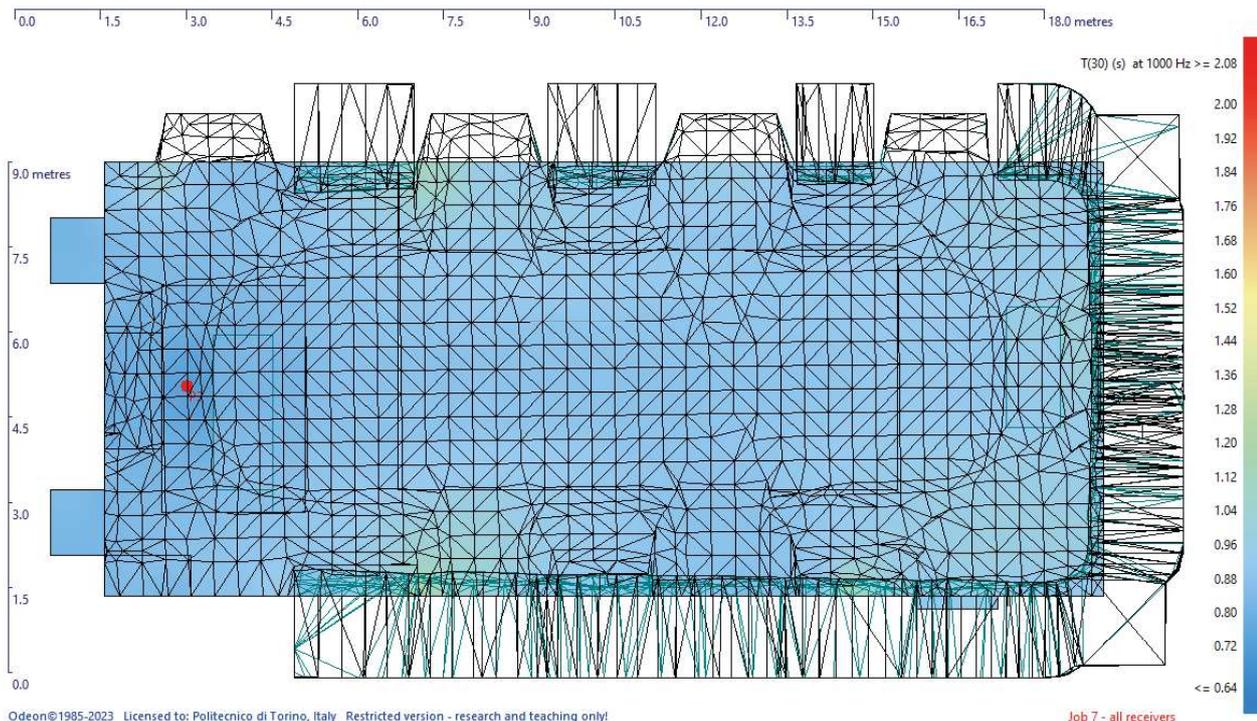


Fig 5.7.A3
Grafico del tempo di riverberazione T_{30} con i risultati delle simulazioni relativo alla Sorgente 2

Per la Sorgente 2 riscontriamo circa gli stessi valori, con una minore discrepanza nelle frequenze medio alte dei valori ottimali.

La mappa acustica alla frequenza di 1000 Hz mostra tempi leggermente inferiori nei pressi della parete sud ovest, la più distante dal palco.

Fig 5.7.MA3
Mappa acustica del tempo di riverberazione T_{30} per la Sorgente 1



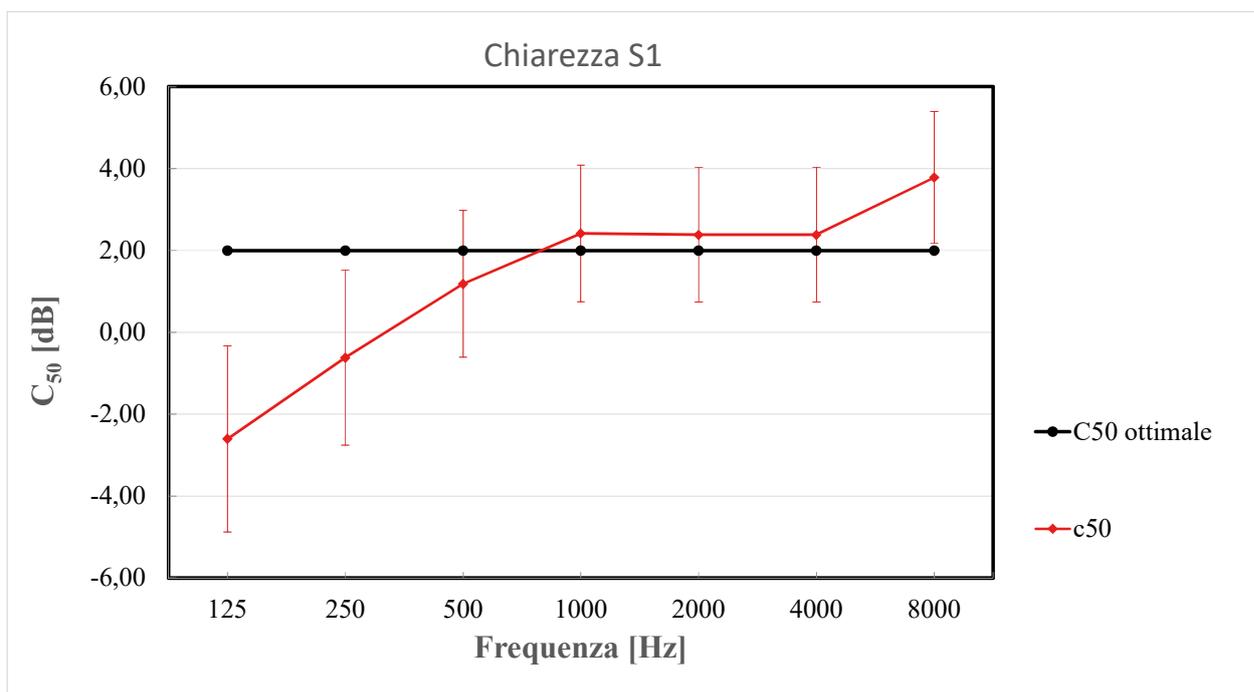


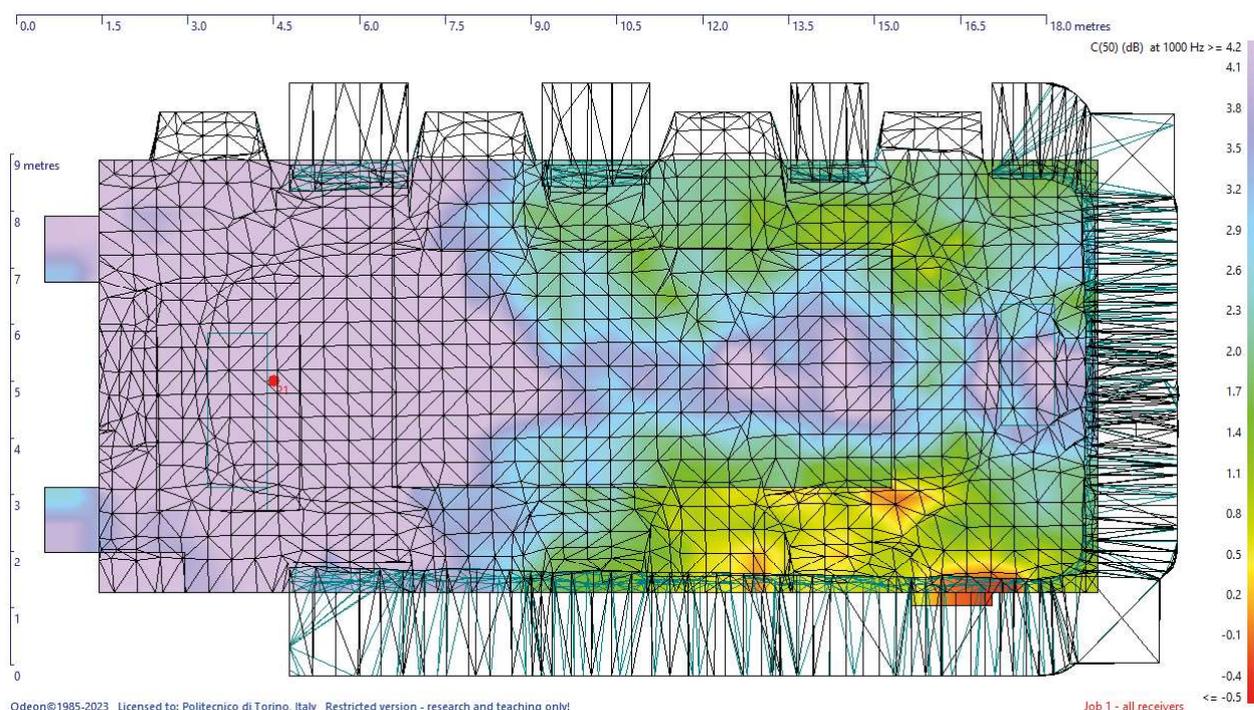
Fig 5.7.B1
Grafico del tempo di riverberazione C_{50} con i risultati delle simulazioni relativo alla Sorgente 1

L'indice di chiarezza C_{50} per la Sorgente 2 mostra nel grafico valori medi ottimali nelle frequenze medie, in relazione alla deviazione standard della media dei ricevitori ottimali, ed al di sopra a partire dai 1000 Hz.

Riscontriamo anche qui criticità alle basse frequenze.

La mappa acustica (1000 Hz) mostra una buona distribuzione della chiarezza nella zona centrale della platea, che decresce ai lati e allontanandosi dalla Sorgente anche in virtù delle riflessioni laterali.

Fig 5.7.MB1
Mappa acustica dell'indice di chiarezza C_{50} per la Sorgente 1



Odeon©1985-2023 Licensed to: Politecnico di Torino, Italy Restricted version - research and teaching only!

Job 1 - all receivers

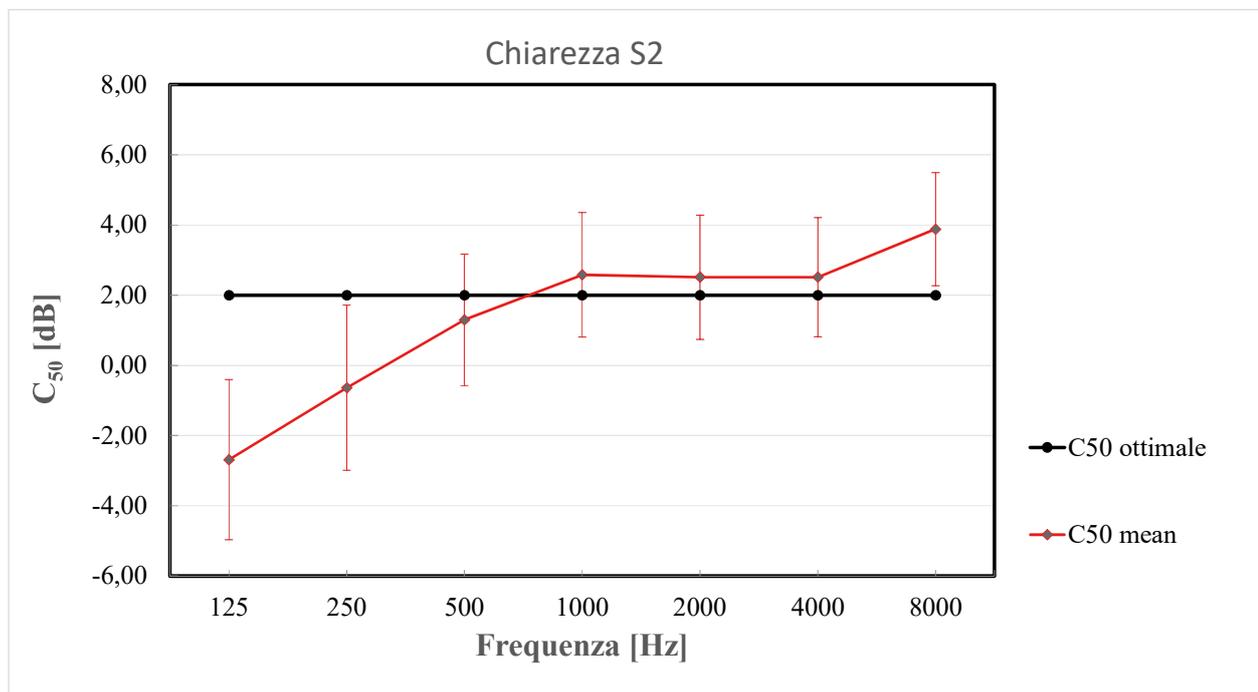
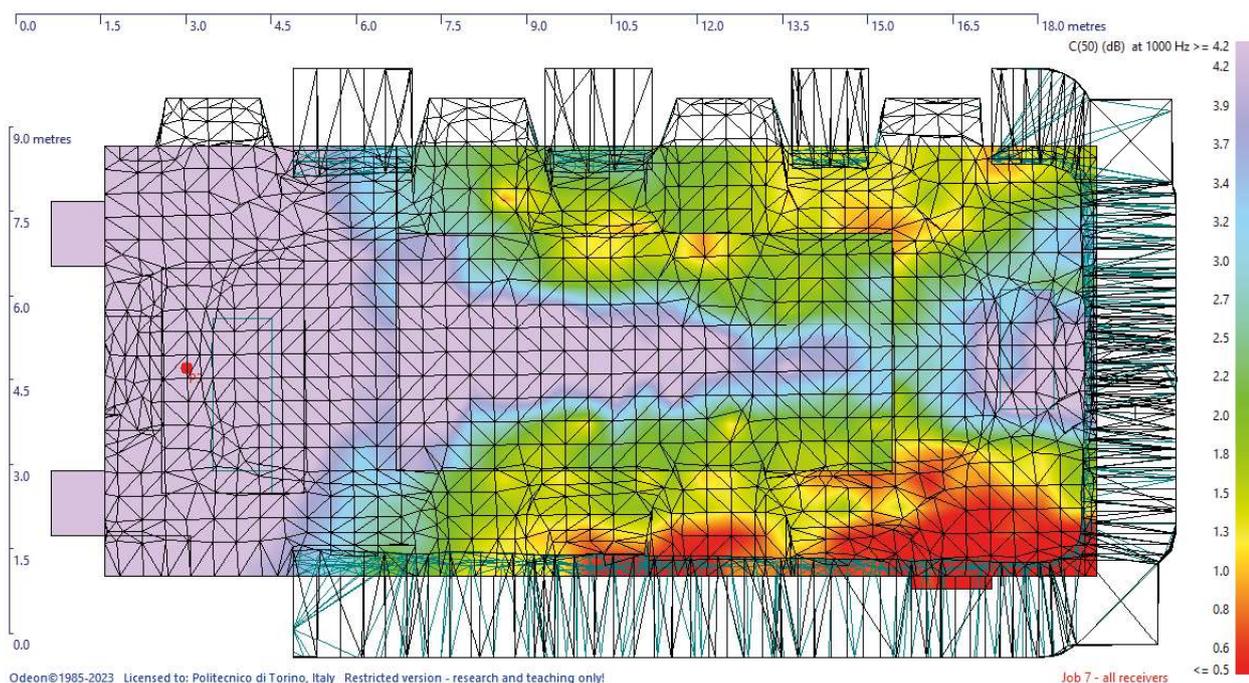


Fig 5.7.B2
Grafico del tempo di riverberazione C_{50} con i risultati delle simulazioni relativo alla Sorgente 2

Anche qui, per la Sorgente 2 si può notare una corrispondenza con i risultati della Sorgente 1, con una maggiore avvicinamento ai valori ottimali nelle medio basse e basse frequenze.

La mappa acustica alla frequenza di 1000 Hz mostra differenze dell'indice più accentuate tra la zona centrale e quelle laterali della platea.

Fig 5.7.MB2
Mappa acustica dell'indice di chiarezza C_{50} per la Sorgente 1



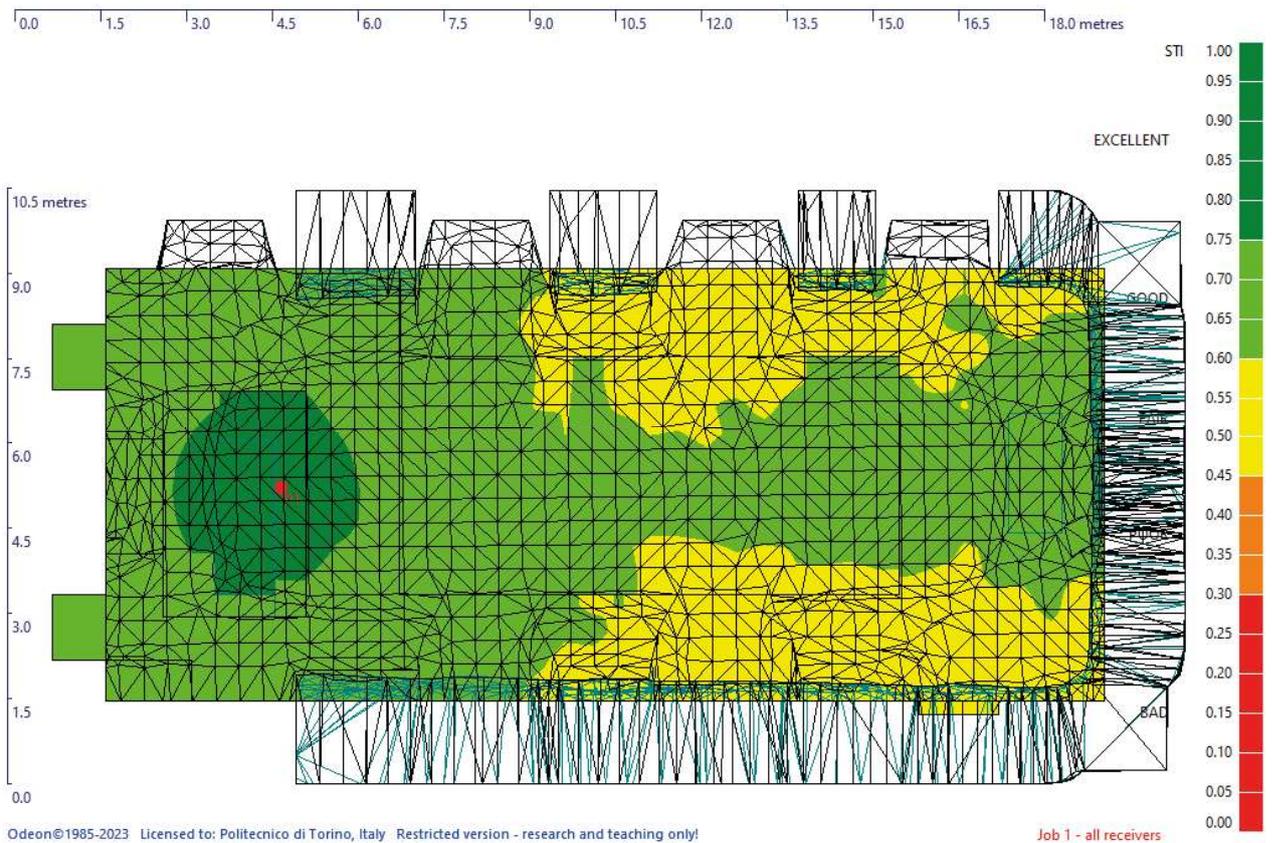
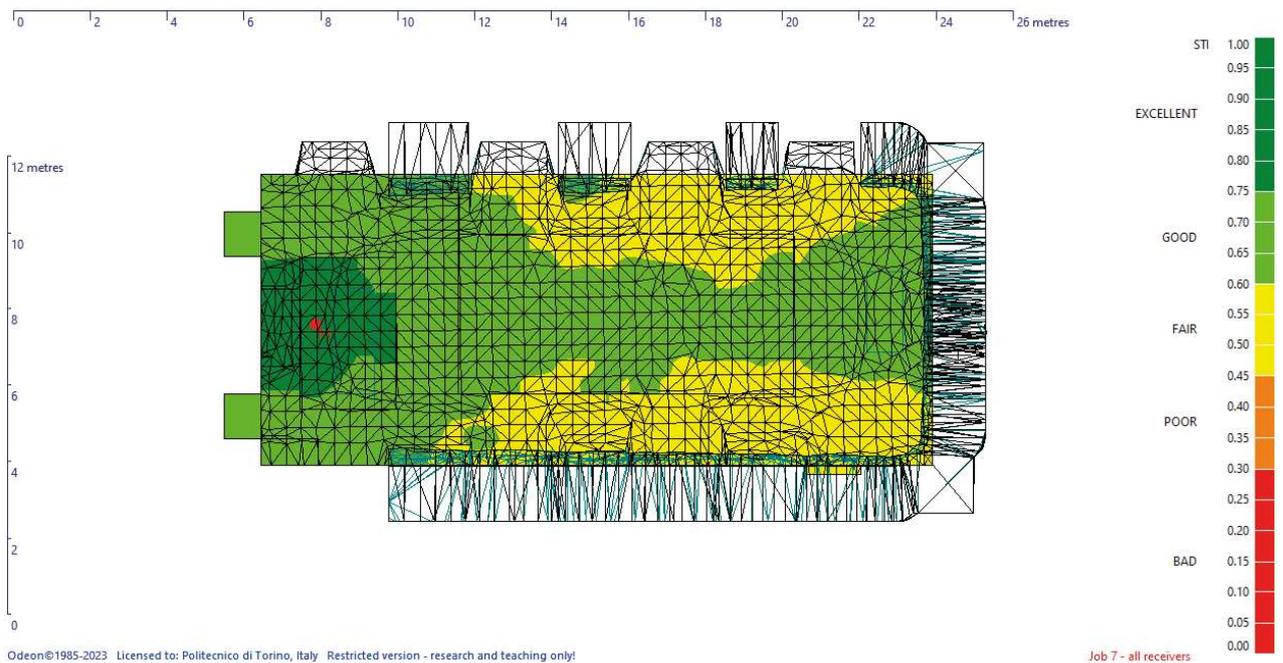


Fig 5.7.M3
Mappa acustica dell'indice di chiarezza C50 per la Sorgente 1

Le mappe acustiche dello STI (Sorgente 1 sopra, Sorgente 2 sotto) mostrano valori buoni nella zona centrale della platea, similmente agli indici di chiarezza, valori che rientrano nel range di accettabilità per quanto riguarda i limiti laterali della platea, superata la distanza di circa 4 m dalla sorgente

Fig 5.7.M3
Mappa acustica dell'indice di chiarezza C50 per la Sorgente 1



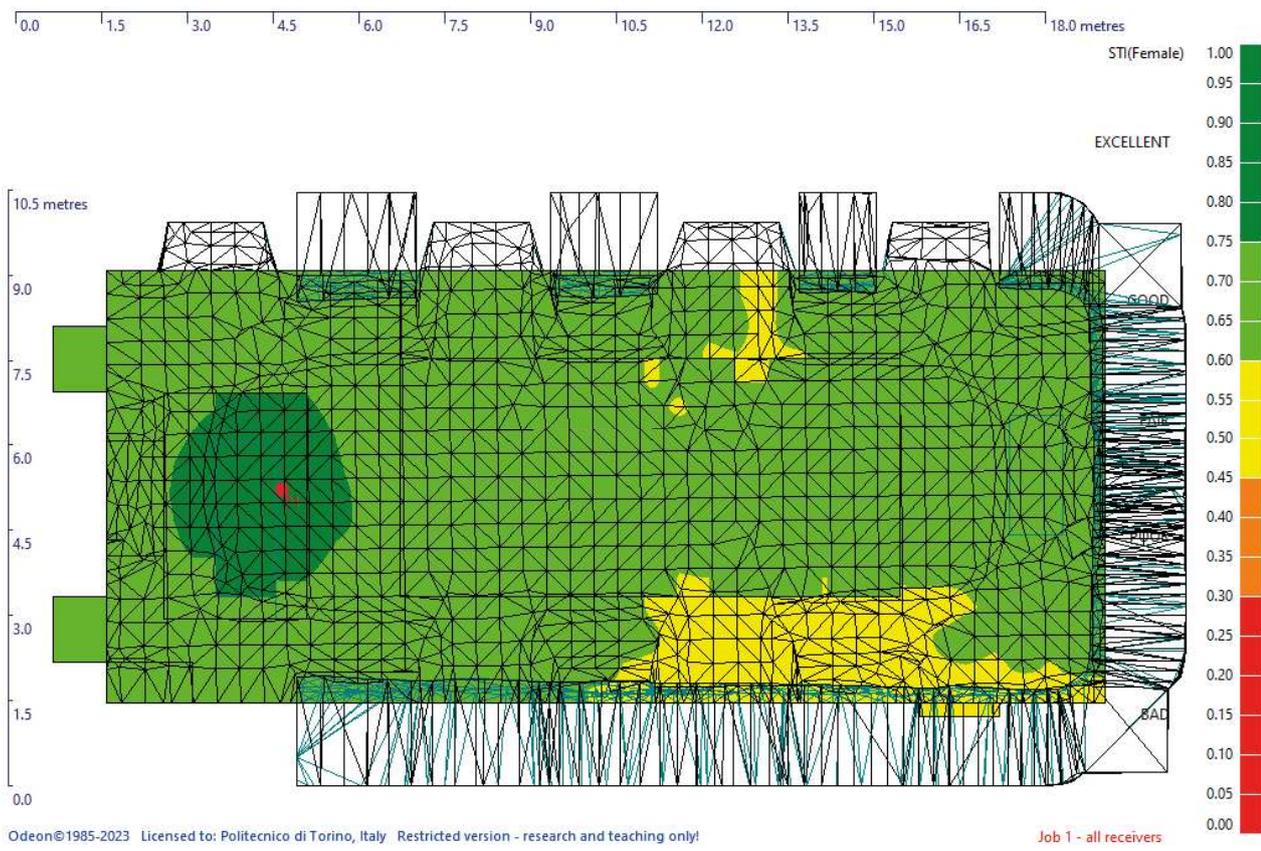
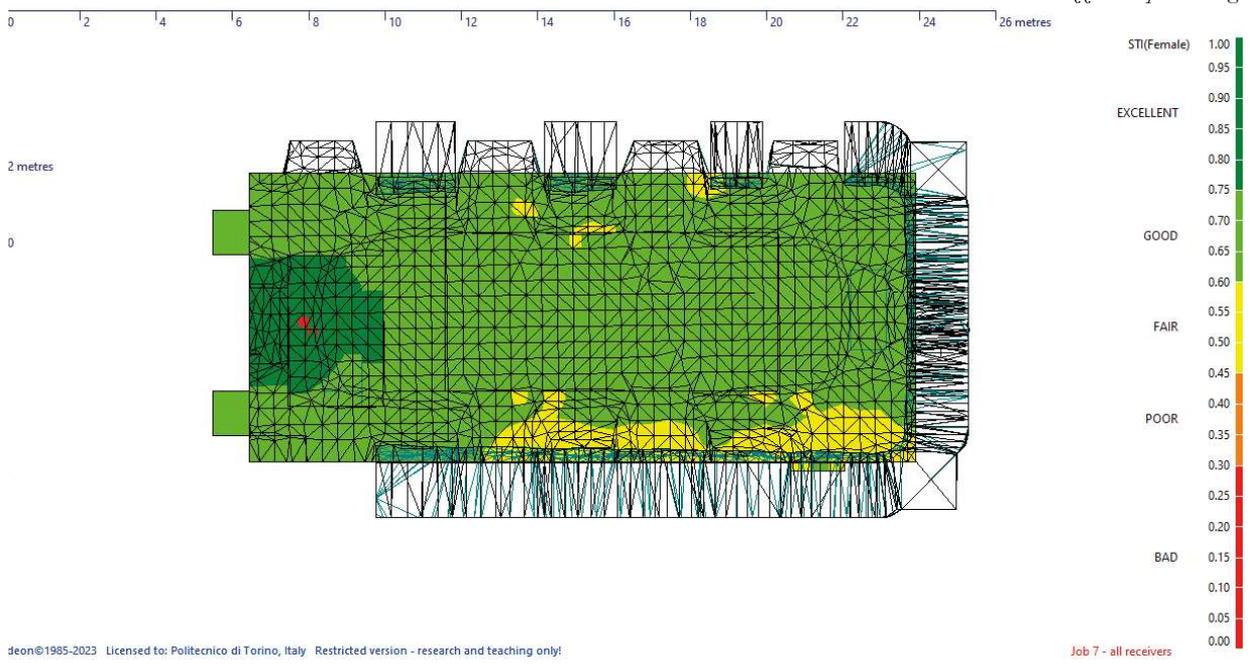


Fig 5.7.M3
Mappa acustica dell'indice di chiarezza C50 per la Sorgente 1

Le mappe acustiche dello STI ponderato per la voce femminile (Sorgente 1 sopra, Sorgente 2 sotto) mostra valori buoni su quasi tutta la superficie della platea, con leggere diminuzioni nelle aree laterali, specialmente in prossimità della parete nord ovest.

Fig 5.7.M3
Mappa acustica dell'indice di chiarezza C50 per la Sorgente 1



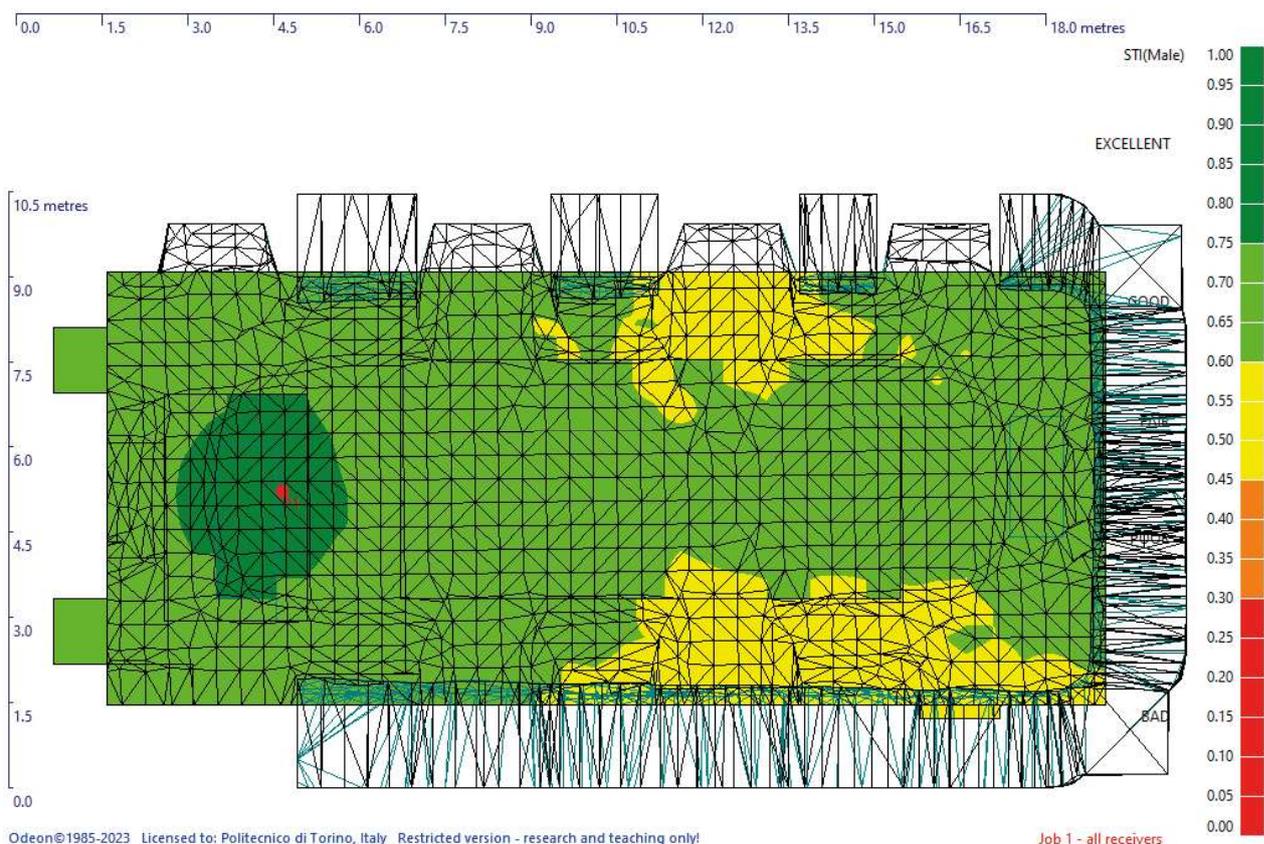
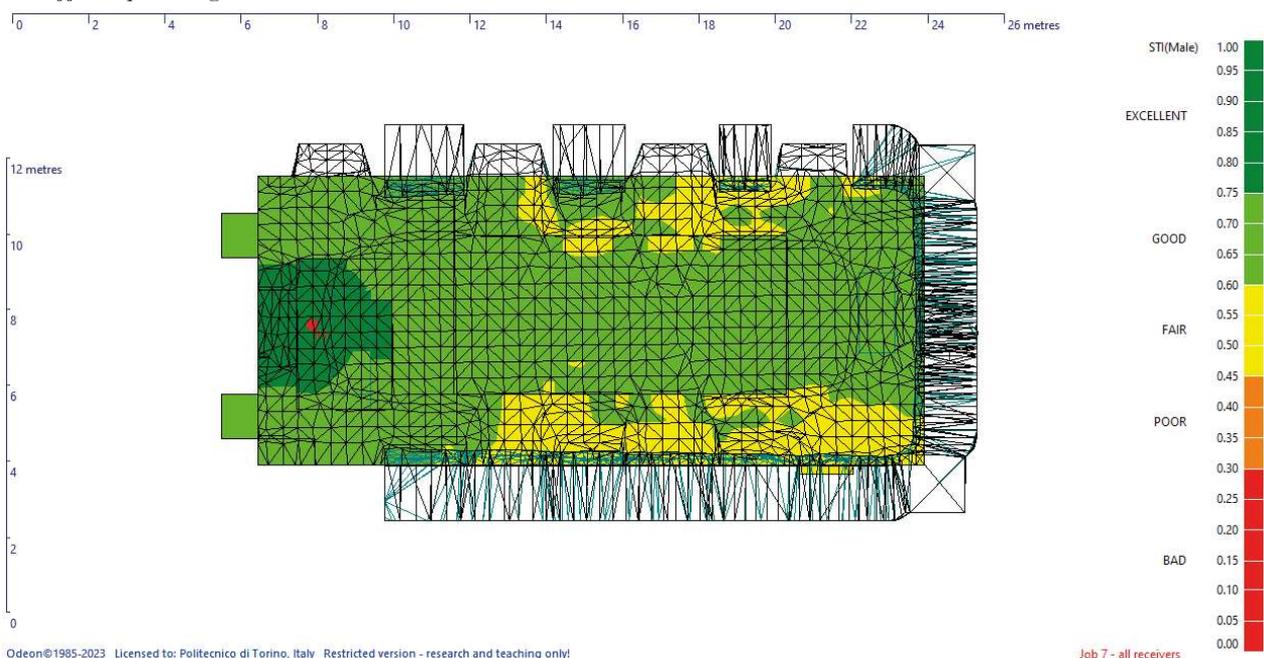


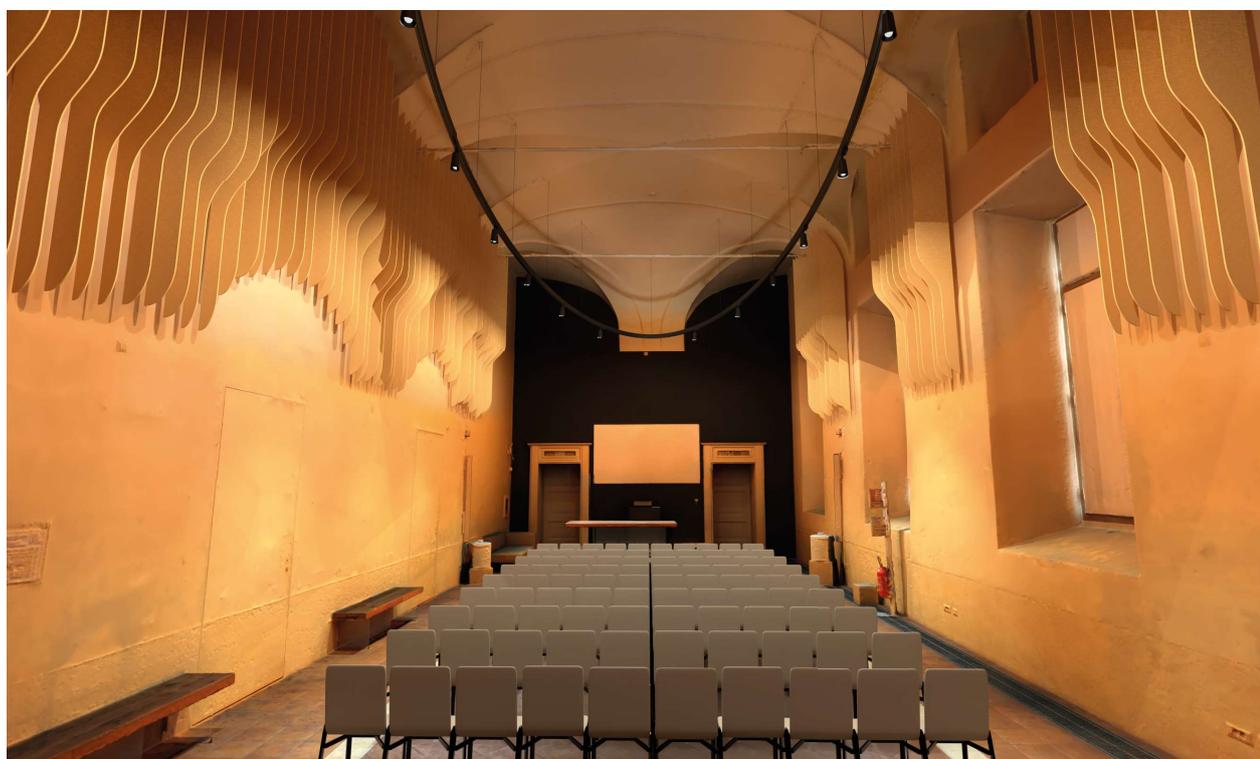
Fig 5.7.M3
 Mappa acustica dell'indice di
 chiarezza C50 per la Sorgente 1

Le mappe acustiche dello STI ponderato per la voce maschile (Sorgente 1 sopra, Sorgente 2 sotto) mostrano diminuzioni più rilevanti nelle aree laterali, questa volta, soprattutto per la Sorgente 2 anche nei pressi della parete sud est.

Fig 5.7.M3
 Mappa acustica dell'indice di
 chiarezza C50 per la Sorgente 1



5.7 Render di progetto



*Fig 5.7.R1
Veduta della sala*

*Fig 5.7.R1
Veduta della sala dal palco*

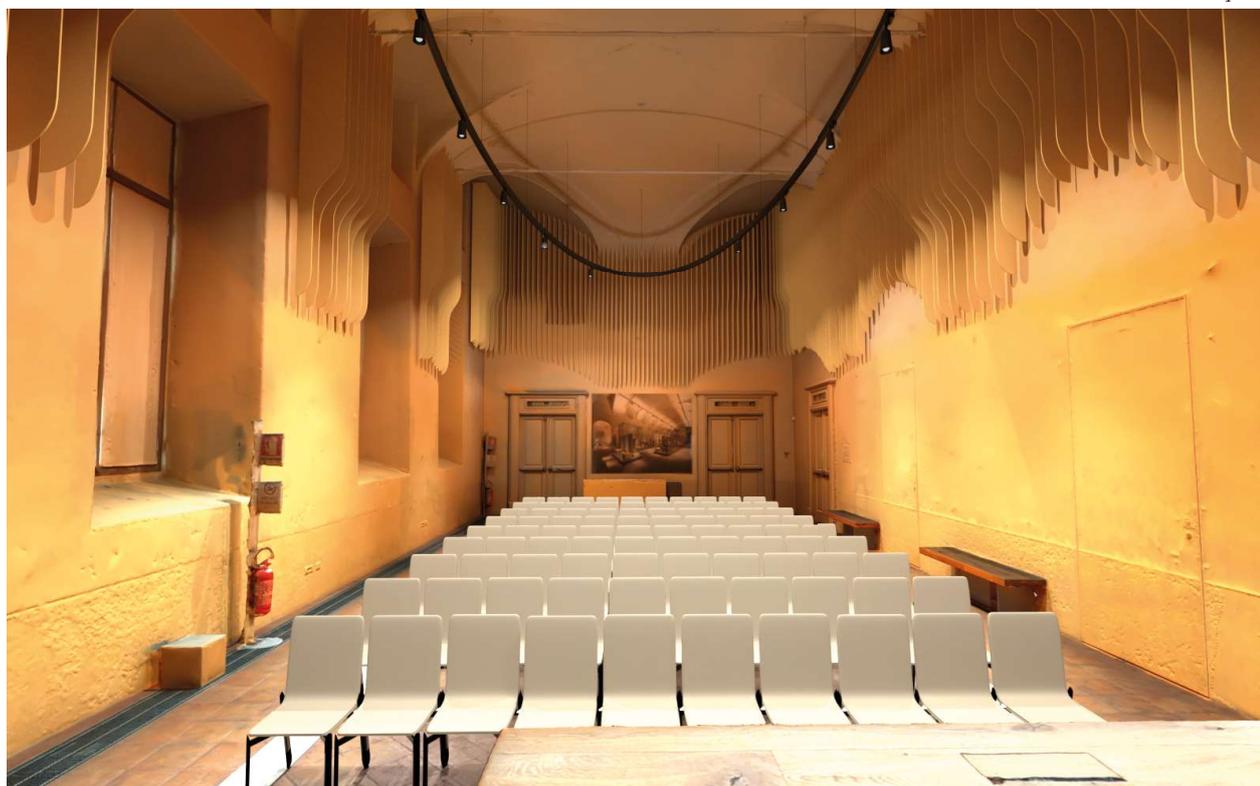




Fig 5.7.R3
Veduta della sala ai piedi del palco

I Renders sono stati realizzati a partire dal modello ottenuto da Metashape, importando su rhinoceros il file .obj con relativo .mtl ed elaborando viste ed illuminazione su V-Ray for Rhino.

Nessuna postproduzione è stata effettuata sulle immagini.



Fig 5.7.R4
Veduta della sala, angolo d'ingresso

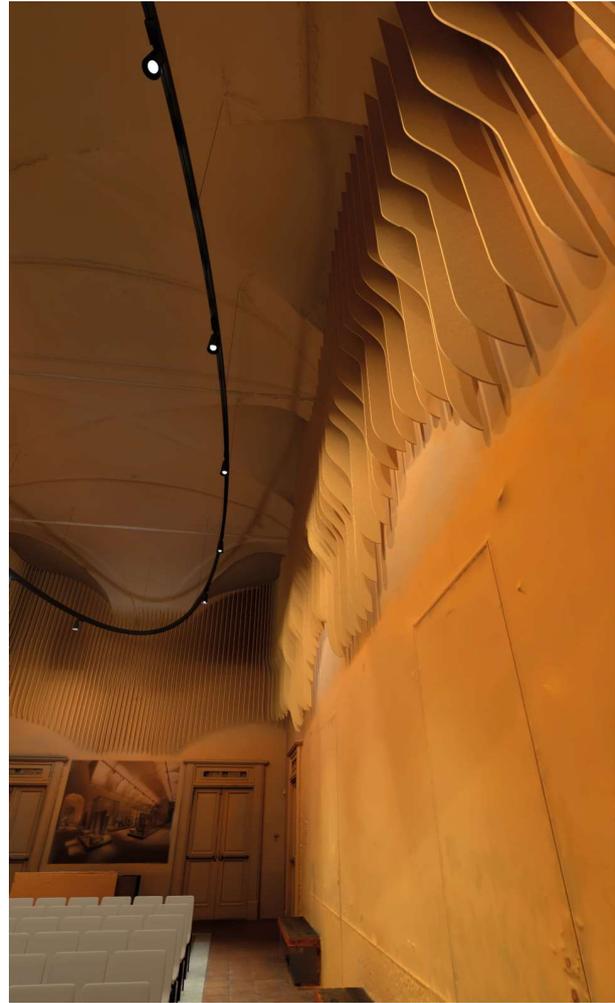


Fig 5.7.R5
Veduta della sala dal corridoio a fianco delle sedute

Bibliografia

D’Orazio, D. (2020) La Qualità Acustica In Ambienti Scolastici Secondo La Uni 11532-2:2020 Parte Ii - La Distribuzione Spaziale Dell’energia Sonora. neo-Eubios 74

Rosales, C. (2023) Spatial Transparency In Architecture. Routledge
605 Third Avenue, New York, NY 10158

Planning documents for BASWA Phon acoustic systems Edition 2024

Domus. Gennaio 2020. N. 1042

Sitografia

https://www.archdaily.com/396462/bakery-paulo-merlini-arquitectura?ad_medium=gallery

<https://artslife.com/2019/06/10/la-fenomenologia-della-visione-in-franco-grignani/>

https://dezwartehond.nl/wp-content/uploads/2021/01/Park-Paviljoen_Domus-1042.pdf

<https://www.3dwasp.com/blog/page/18/>

Conclusioni 6

6.0 Sintesi del lavoro svolto

Questo studio ha affrontato la problematica delle condizioni acustiche insufficienti della sala conferenze del Museo Egizio di Torino, un ambiente caratterizzato da un tempo di riverberazione eccessivo e una scarsa intelligibilità del parlato. L'approccio adottato per la correzione acustica ha combinato una diagnosi iniziale basata su rilievi acustici e architettonici in situ, l'uso di software di simulazione e rappresentazione avanzate e la progettazione parametrica di interventi correttivi.

Il progetto ha previsto l'uso di materiali fonoassorbenti in una configurazione il cui scopo era sfruttare tutte le potenzialità, massimizzandone le prestazioni acustiche attraverso la configurazione studiata. Questa scelta ha permesso di valorizzare le caratteristiche intrinseche del materiale, ottimizzandone l'efficacia nella riduzione del tempo di riverberazione e nell'aumento dell'intelligibilità del parlato, con un focus sul rispetto delle caratteristiche storiche dell'edificio.

Attraverso un processo iterativo di simulazione e ottimizzazione, è stato possibile definire un layout che riduce il tempo di riverberazione a livelli compatibili con le norme UNI 11532:2020 e migliora l'indice STI, offrendo, nei suoi limiti, un notevole miglioramento allo scopo di una comunicazione efficace per eventi pubblici e conferenze.

Questa metodologia, basata su un approccio performance-based, non solo ha risolto il problema specifico, ma ha dimostrato la replicabilità e la scalabilità del metodo in contesti analoghi, ponendo le basi per futuri interventi di riqualificazione acustica in edifici storici.

6.1 Risultati raggiunti

Il lavoro svolto ha portato a risultati significativi, grazie a un approccio multidisciplinare che ha unito analisi acustiche, progettazione parametrica e rilievo architettonico.

Rilievo architettonico.

Il rilievo della sala conferenze, oltre a costituire un importante contributo al patrimonio informativo sui beni storici, ha rappresentato una fase essenziale del progetto. È stato condotto utilizzando tecniche avanzate di misurazione e modellazione 3D, le cui criticità sono emerse fornendo occasione di risoluzione.

Lo studio ha permesso di ottenere una rappresentazione fedele delle geometrie e delle proporzioni dell'ambiente, e texture ponendo le basi per la definizione di soluzioni compatibili con il contesto esistente, facilitando un'integrazione il quanto più possibilmente armoniosa tra gli interventi proposti e le caratteristiche storiche della sala, e per uno studio acustico accurato la cui trasfigurazione del modello per renderlo conforme al grado di dettaglio richiesto dall'operatività delle simulazioni acustiche ha fatto emergere le criticità relative alla ridefinizione di quest'ultimo.

Miglioramenti acustici

L'intervento ha migliorato significativamente le condizioni acustiche, come dimostrato dai risultati delle simulazioni e delle misurazioni finali:

- **Tempo di riverberazione (T_R):**
È stato ridotto a livelli compatibili con le normative per spazi destinati al parlato.
- **Intelligibilità del parlato (STI):**
L'indice è stato migliorato, raggiungendo valori che garantiscono una comunicazione efficace.
- **Chiarezza sonora (C50):**
È stato registrato un miglioramento nella distinzione tra suono diretto e riflesso, rendendo il parlato comprensibile anche per chi si trova nelle aree più lontane dal punto di emissione.
- **Valorizzazione del materiale fonoassorbente:**
I pannelli utilizzati sono stati progettati e disposti nell'ottica di una ricerca di sincretismo tra il massimo rendimento prestazionale delle loro proprietà fonoassorbenti e la coerenza formale del concept.
- **Equilibrio con il contesto**
La configurazione del sistema acustico è stata ottimizzata per intervenire sulle frequenze critiche per il parlato, migliorando l'efficacia dell'assorbimento acustico in un approccio che tenta di coniugare la trasparenza -intesa come spaziale, nel rispetto del contesto architettonico- alla presenza dell'oggetto che vuole raccontare sé stesso e il relativo processo tecnologico generativo.

6.3 Implicazioni e contributi

L'intervento, pur focalizzandosi su un caso specifico, offre alcune considerazioni che possono risultare utili per futuri sviluppi nel campo della progettazione acustica, in particolare in contesti con vincoli storici e architettonici significativi. L'analisi ha mostrato come sia possibile intervenire in un'ottica di equilibrio tra esigenze funzionali e rispetto

per le caratteristiche originarie dello spazio. Questo aspetto sottolinea il potenziale di applicazione in altri edifici storici, dove le soluzioni tecniche devono essere integrate con attenzione alle preesistenze.

L'esperienza, nell'ottica dell'utilizzo dei materiali fonoassorbenti disposti come baffles, può contribuire a riflessioni più ampie sull'uso dei materiali esistenti e sulla loro efficienza se utilizzati in questo assetto, suggerendo la possibilità di ulteriori studi su come migliorare le prestazioni attraverso configurazioni specifiche o nuovi approcci progettuali.

La scelta di interventi non invasivi si colloca all'interno di un contesto più ampio di compatibilità con i vincoli storici e di sostenibilità, un tema sempre più centrale nella progettazione contemporanea. Sebbene i risultati siano soddisfacenti per il caso trattato, lasciano aperte opportunità di perfezionamento. Ad esempio, potrebbero essere esplorate configurazioni alternative in situazioni con maggiore densità di pubblico o condizioni acustiche più complesse. È importante, inoltre, considerare un monitoraggio a lungo termine delle soluzioni adottate, per valutarne l'efficacia nel tempo e per comprendere meglio l'impatto di eventuali modifiche d'uso degli spazi.

L'approccio metodologico utilizzato, che combina rilievo architettonico, analisi acustica e simulazioni, ha dimostrato la sua utilità e potrebbe essere ulteriormente sviluppato per affrontare contesti con vincoli differenti o esigenze tecniche più stringenti.

6.4 Limiti e sviluppi futuri

Nonostante i risultati significativi nell'ottimizzazione acustica della sala conferenze, il lavoro non è esente da limiti che meritano un'analisi critica. Tali aspetti possono fornire utili indicazioni per futuri sviluppi e approfondimenti metodologici.

Un primo limite riguarda l'accuratezza delle simulazioni acustiche, che, pur essendo uno strumento potente per la progettazione, si basano su modelli teorici che semplificano la complessità reale degli spazi, specialmente per quanto riguarda il comportamento del sistema alle basse frequenze, per un puro fattore di scala nel caso delle misurazioni in camera riverberante e del ray tracing, come modello di calcolo per la simulazione.

Un altro limite è emerso nella gestione della trasposizione del modello ottenuto tramite scansione laser al modello destinato alla simulazione acustica: non è stato possibile definire quantitativamente la metodologia, che richiederebbe uno studio approfondito in grado di interoperare con i programmi di riferimento prima nell'elaborazione della nuvola di punti e successivamente nella definizione delle geometrie adatte agli algoritmi

di simulazione.

Questo suggerisce la necessità e la possibilità di sviluppare flussi di lavoro più integrati, che analizzino e possano quantificare l'intervento discrezionale umano che si inserisce tra rilievo, modellazione e simulazione.

Dal punto di vista della metodologia progettuale, la traduzione di un parametro fisico complesso come il comportamento dell'energia sonora in puramente geometrico lascia ampio spazio ad approfondimenti in relazione a conformazioni seriali come i baffles. Lo studio si è posto come sperimentale, ed è una possibile strada per definire modelli matematici accurati che possano indagare le interrelazioni tra i dati geometrico-proporzionali, dimensionali, quantitativi di un sistema acustico così configurato e quelli del materiale fonoassorbente utilizzato, nella sua composizione, installazione. Prove in un grande ambiente, con un grande numero di elementi apponibili, testando diversi materiali, anche combinandoli e con sorgenti orientabili possono essere alcuni degli esempi.

Infine, un limite metodologico riguarda l'adattabilità del modello progettuale ad altri contesti. Sarebbe interessante testare l'approccio in spazi con geometrie più irregolari, condizioni acustiche più complesse o vincoli architettonici ancora più stringenti. Questo permetterebbe di valutare la flessibilità del metodo e di identificare eventuali adattamenti necessari.

ndici

7.1 Prove 0-3



PROVA 0,1				PROVA 1				PROVA 2				PROVA 3			
M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA
0,148	0,148	0,138	0,144	0,192	0,192	0,192	0,192	0,201	0,201	0,203	0,202	0,191	0,184	0,193	0,189
0,161	0,161	0,158	0,160	0,190	0,192	0,190	0,191	0,168	0,169	0,170	0,169	0,156	0,152	0,158	0,155
0,011	0,011	0,010	0,011	0,010	0,007	0,004	0,007	0,030	0,029	0,030	0,030	0,046	0,044	0,041	0,044
0,331	0,331	0,329	0,331	0,345	0,342	0,344	0,344	0,392	0,391	0,385	0,389	0,399	0,399	0,399	0,399
0,284	0,284	0,281	0,283	0,525	0,527	0,527	0,526	0,538	0,535	0,532	0,535	0,431	0,432	0,432	0,432
0,299	0,299	0,299	0,299	0,583	0,583	0,584	0,583	0,554	0,556	0,555	0,555	0,406	0,405	0,406	0,406
0,175	0,175	0,180	0,177	0,640	0,637	0,638	0,638	0,629	0,631	0,634	0,631	0,442	0,440	0,444	0,442
0,576	0,576	0,576	0,576	1,060	1,059	1,059	1,059	0,846	0,844	0,844	0,845	0,620	0,616	0,619	0,618
0,506	0,506	0,505	0,506	1,219	1,222	1,222	1,221	0,991	0,996	0,997	0,994	0,851	0,850	0,848	0,849
0,628	0,628	0,628	0,628	1,162	1,160	1,160	1,161	1,018	1,018	1,018	1,018	0,843	0,844	0,844	0,844
0,707	0,707	0,707	0,707	1,443	1,444	1,444	1,444	1,229	1,231	1,232	1,231	0,953	0,959	0,957	0,956
0,776	0,776	0,776	0,776	1,637	1,634	1,636	1,636	1,496	1,502	1,502	1,500	1,101	1,100	1,109	1,103
0,992	0,992	0,993	0,992	1,721	1,721	1,720	1,721	1,632	1,634	1,633	1,633	1,188	1,200	1,194	1,194
0,774	0,774	0,773	0,774	1,632	1,632	1,628	1,631	1,435	1,430	1,428	1,431	1,037	1,040	1,040	1,039
0,731	0,731	0,731	0,731	1,652	1,654	1,649	1,652	1,473	1,471	1,468	1,471	1,020	1,032	1,019	1,024
0,704	0,704	0,707	0,705	1,474	1,475	1,463	1,471	1,326	1,316	1,314	1,319	0,988	0,987	0,981	0,985
0,682	0,682	0,681	0,682	1,371	1,361	1,358	1,364	1,225	1,213	1,210	1,216	0,983	0,977	0,983	0,981
0,735	0,735	0,739	0,736	1,467	1,465	1,459	1,463	1,355	1,337	1,336	1,343	1,036	1,046	1,038	1,040

1
2
3

0,48															
PROVA 0,1 A TOT				PROVA 1 A TOT				PROVA 2 A TOT				PROVA 3 A TOT			
M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA
0,0709	0,0709	0,0662	0,0693	0,0921	0,0923	0,0921	0,0922	0,0964	0,0965	0,0974	0,0968	0,0919	0,0882	0,0925	0,0909
0,0774	0,0774	0,0760	0,0770	0,0911	0,0922	0,0912	0,0915	0,0805	0,0809	0,0814	0,0809	0,0751	0,0730	0,0758	0,0746
0,0054	0,0054	0,0046	0,0051	0,0046	0,0032	0,0021	0,0033	0,0143	0,0139	0,0145	0,0142	0,0219	0,0214	0,0197	0,0210
0,1590	0,1590	0,1580	0,1587	0,1654	0,1643	0,1649	0,1649	0,1882	0,1876	0,1848	0,1869	0,1917	0,1915	0,1915	0,1916
0,1365	0,1365	0,1347	0,1359	0,2518	0,2532	0,2528	0,2526	0,2583	0,2569	0,2553	0,2568	0,2070	0,2074	0,2074	0,2072
0,1435	0,1435	0,1437	0,1436	0,2797	0,2799	0,2804	0,2800	0,2657	0,2667	0,2665	0,2663	0,1947	0,1944	0,1949	0,1947
0,0842	0,0842	0,0862	0,0849	0,3071	0,3060	0,3061	0,3064	0,3019	0,3030	0,3041	0,3030	0,2121	0,2112	0,2130	0,2121
0,2767	0,2767	0,2764	0,2766	0,5089	0,5085	0,5083	0,5085	0,4061	0,4051	0,4052	0,4055	0,2975	0,2959	0,2970	0,2968
0,2431	0,2431	0,2424	0,2428	0,5851	0,5864	0,5867	0,5861	0,4757	0,4779	0,4784	0,4773	0,4083	0,4078	0,4072	0,4077
0,3013	0,3013	0,3015	0,3014	0,5578	0,5566	0,5568	0,5571	0,4886	0,4884	0,4884	0,4885	0,4049	0,4051	0,4049	0,4050
0,3395	0,3395	0,3392	0,3394	0,6927	0,6931	0,6932	0,6930	0,5901	0,5910	0,5914	0,5908	0,4576	0,4603	0,4592	0,4590
0,3726	0,3726	0,3725	0,3726	0,7858	0,7845	0,7852	0,7852	0,7181	0,7209	0,7212	0,7201	0,5284	0,5281	0,5323	0,5296
0,4760	0,4760	0,4766	0,4762	0,8263	0,8263	0,8256	0,8260	0,7834	0,7842	0,7836	0,7837	0,5703	0,5760	0,5729	0,5731
0,3713	0,3713	0,3712	0,3713	0,7835	0,7836	0,7814	0,7828	0,6886	0,6865	0,6852	0,6868	0,4976	0,4993	0,4990	0,4986
0,3507	0,3507	0,3507	0,3507	0,7931	0,7939	0,7916	0,7928	0,7072	0,7061	0,7047	0,7060	0,4895	0,4956	0,4889	0,4913
0,3381	0,3381	0,3392	0,3385	0,7073	0,7081	0,7023	0,7059	0,6367	0,6317	0,6308	0,6331	0,4742	0,4737	0,4710	0,4730
0,3273	0,3273	0,3270	0,3272	0,6582	0,6535	0,6518	0,6545	0,5878	0,5824	0,5808	0,5837	0,4717	0,4691	0,4717	0,4709
0,3528	0,3528	0,3547	0,3535	0,7042	0,7030	0,7001	0,7024	0,6504	0,6417	0,6411	0,6444	0,4974	0,5020	0,4983	0,4992
				0,10				0,20				0,40			

0,48				2,16				1,20				0,72			
PROVA 0,1 A B				PROVA 1 A B				PROVA 2 A B				PROVA 3 A B			
M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA
0,1476	0,1476	0,1378	0,1444	0,0427	0,0427	0,0426	0,0427	0,0803	0,0804	0,0812	0,0806	0,1277	0,1225	0,1285	0,1262
0,1613	0,1613	0,1583	0,1603	0,0422	0,0427	0,0422	0,0424	0,0671	0,0674	0,0678	0,0674	0,1043	0,1014	0,1053	0,1036
0,0112	0,0112	0,0097	0,0107	0,0021	0,0015	0,0010	0,0015	0,0119	0,0116	0,0120	0,0118	0,0304	0,0297	0,0273	0,0291
0,3313	0,3313	0,3292	0,3306	0,0766	0,0761	0,0764	0,0763	0,1568	0,1564	0,1540	0,1557	0,2662	0,2660	0,2660	0,2661
0,2845	0,2845	0,2807	0,2832	0,1166	0,1172	0,1170	0,1169	0,2153	0,2141	0,2127	0,2140	0,2875	0,2880	0,2880	0,2878
0,2990	0,2990	0,2993	0,2991	0,1295	0,1296	0,1298	0,1296	0,2214	0,2223	0,2221	0,2219	0,2704	0,2700	0,2707	0,2704
0,1755	0,1755	0,1795	0,1768	0,1422	0,1417	0,1417	0,1419	0,2516	0,2525	0,2534	0,2525	0,2946	0,2933	0,2958	0,2946
0,5765	0,5765	0,5758	0,5763	0,2356	0,2354	0,2353	0,2354	0,3384	0,3376	0,3376	0,3379	0,4132	0,4110	0,4125	0,4122
0,5064	0,5064	0,5049	0,5059	0,2709	0,2715	0,2716	0,2713	0,3964	0,3982	0,3987	0,3978	0,5671	0,5664	0,5655	0,5663
0,6278	0,6278	0,6280	0,6278	0,2583	0,2577	0,2578	0,2579	0,4071	0,4070	0,4070	0,4071	0,5623	0,5627	0,5623	0,5624
0,7072	0,7072	0,7068	0,7070	0,3207	0,3209	0,3209	0,3208	0,4917	0,4925	0,4928	0,4923	0,6355	0,6393	0,6377	0,6375
0,7763	0,7763	0,7760	0,7762	0,3638	0,3632	0,3635	0,3635	0,5984	0,6008	0,6010	0,6001	0,7339	0,7335	0,7392	0,7356
0,9917	0,9917	0,9928	0,9921	0,3825	0,3825	0,3822	0,3824	0,6528	0,6535	0,6530	0,6531	0,7921	0,8001	0,7957	0,7960
0,7736	0,7736	0,7734	0,7736	0,3627	0,3628	0,3617	0,3624	0,5738	0,5721	0,5710	0,5723	0,6911	0,6935	0,6931	0,6926
0,7307	0,7307	0,7306	0,7307	0,3672	0,3675	0,3665	0,3671	0,5893	0,5885	0,5873	0,5883	0,6798	0,6883	0,6790	0,6824
0,7044	0,7044	0,7066	0,7051	0,3275	0,3278	0,3252	0,3268	0,5306	0,5264	0,5257	0,5276	0,6586	0,6579	0,6541	0,6569
0,6820	0,6820	0,6812	0,6817	0,3047	0,3026	0,3017	0,3030	0,4898	0,4854	0,4840	0,4864	0,6552	0,6516	0,6552	0,6540
0,7351	0,7351	0,7390	0,7364	0,3260	0,3255	0,3241	0,3252	0,5420	0,5347	0,5343	0,5370	0,6908	0,6972	0,6921	0,6933

ve D1-D4



e
perficie

1

f	PROVA D1				PROVA D2				PROVA I	
	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2
200	0,026	0,024	0,019	0,023	0,013	0,008	0,001	0,008	0,051	0,042
250	0,036	0,032	0,036	0,034	0,050	0,051	0,051	0,051	0,064	0,062
315	0,024	0,026	0,024	0,025	0,042	0,047	0,044	0,044	0,047	0,045
400	0,169	0,170	0,169	0,169	0,210	0,214	0,212	0,212	0,266	0,265
500	0,214	0,213	0,213	0,213	0,223	0,225	0,225	0,224	0,177	0,179
630	0,277	0,277	0,276	0,277	0,379	0,380	0,379	0,379	0,333	0,331
800	0,316	0,317	0,317	0,317	0,314	0,319	0,318	0,317	0,197	0,201
1000	0,499	0,499	0,497	0,498	0,356	0,355	0,352	0,354	0,616	0,615
1250	0,676	0,678	0,674	0,676	0,497	0,495	0,493	0,495	0,672	0,670
1600	0,542	0,542	0,542	0,542	0,544	0,550	0,549	0,548	0,591	0,590
2000	0,496	0,497	0,496	0,496	0,526	0,529	0,528	0,528	0,679	0,679
2500	0,594	0,594	0,592	0,593	0,644	0,645	0,642	0,644	0,720	0,718
3150	0,699	0,696	0,697	0,697	0,783	0,782	0,782	0,782	0,822	0,823
4000	0,611	0,609	0,610	0,610	0,695	0,684	0,685	0,688	0,716	0,717
5000	0,637	0,636	0,636	0,636	0,729	0,733	0,730	0,730	0,720	0,721
6300	0,576	0,575	0,573	0,575	0,616	0,608	0,607	0,610	0,645	0,644
8000	0,586	0,581	0,582	0,583	0,587	0,586	0,591	0,588	0,656	0,657
10000	0,578	0,576	0,578	0,577	0,669	0,678	0,676	0,674	0,705	0,707

2

S	0,48									
f	PROVA D1				PROVA D2				PROVA I	
	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2
200	0,012	0,012	0,009	0,011	0,0062	0,0040	0,0006	0,004	0,0245	0,0199
250	0,017	0,015	0,017	0,017	0,0240	0,0243	0,0245	0,024	0,0305	0,0296
315	0,012	0,012	0,012	0,012	0,0202	0,0225	0,0209	0,021	0,0225	0,0218
400	0,081	0,082	0,081	0,081	0,1006	0,1025	0,1016	0,102	0,1276	0,1273
500	0,103	0,102	0,102	0,102	0,1073	0,1079	0,1078	0,108	0,0849	0,0859
630	0,133	0,133	0,132	0,133	0,1821	0,1826	0,1817	0,182	0,1599	0,1587
800	0,152	0,152	0,152	0,152	0,1508	0,1531	0,1527	0,152	0,0948	0,0962
1000	0,239	0,239	0,239	0,239	0,1710	0,1702	0,1689	0,170	0,2957	0,2954
1250	0,325	0,325	0,324	0,325	0,2387	0,2376	0,2366	0,238	0,3225	0,3217
1600	0,260	0,260	0,260	0,260	0,2613	0,2639	0,2634	0,263	0,2837	0,2833
2000	0,238	0,238	0,238	0,238	0,2524	0,2539	0,2534	0,253	0,3259	0,3260
2500	0,285	0,285	0,284	0,285	0,3091	0,3097	0,3080	0,309	0,3455	0,3447
3150	0,336	0,334	0,335	0,335	0,3758	0,3752	0,3755	0,375	0,3945	0,3951
4000	0,293	0,292	0,293	0,293	0,3338	0,3284	0,3287	0,330	0,3438	0,3441
5000	0,306	0,305	0,305	0,305	0,3497	0,3517	0,3503	0,351	0,3455	0,3460
6300	0,277	0,276	0,275	0,276	0,2955	0,2920	0,2914	0,293	0,3098	0,3091
8000	0,281	0,279	0,280	0,280	0,2816	0,2812	0,2837	0,282	0,3148	0,3155
10000	0,277	0,277	0,277	0,277	0,3209	0,3254	0,3247	0,324	0,3385	0,3396
		0,10				0,20				0,30

3

S _B	0,48									
f	PROVA D1				PROVA D2				PROVA I	
	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2
200	0,0260	0,0241	0,0187	0,023	0,0129	0,0083	0,0012	0,008	0,0511	0,0415
250	0,0361	0,0316	0,0357	0,034	0,0500	0,0505	0,0511	0,051	0,0636	0,0616
315	0,0245	0,0255	0,0242	0,025	0,0420	0,0468	0,0436	0,044	0,0469	0,0454
400	0,1689	0,1699	0,1695	0,169	0,2096	0,2136	0,2116	0,212	0,2658	0,2652
500	0,2140	0,2128	0,2132	0,213	0,2235	0,2248	0,2247	0,224	0,1768	0,1790
630	0,2769	0,2768	0,2759	0,277	0,3793	0,3804	0,3786	0,379	0,3330	0,3307
800	0,3163	0,3165	0,3173	0,317	0,3141	0,3189	0,3182	0,317	0,1975	0,2005
1000	0,4985	0,4988	0,4970	0,498	0,3563	0,3545	0,3519	0,354	0,6160	0,6155
1250	0,6763	0,6776	0,6744	0,676	0,4972	0,4951	0,4928	0,495	0,6719	0,6702
1600	0,5424	0,5417	0,5420	0,542	0,5443	0,5497	0,5488	0,548	0,5910	0,5902
2000	0,4962	0,4967	0,4962	0,496	0,5258	0,5290	0,5280	0,528	0,6791	0,6792
2500	0,5935	0,5942	0,5917	0,593	0,6440	0,6452	0,6416	0,644	0,7198	0,7182
3150	0,6991	0,6962	0,6969	0,697	0,7829	0,7816	0,7824	0,782	0,8219	0,8230
4000	0,6109	0,6090	0,6098	0,610	0,6954	0,6842	0,6848	0,688	0,7163	0,7170
5000	0,6374	0,6356	0,6362	0,636	0,7285	0,7327	0,7298	0,730	0,7197	0,7208
6300	0,5764	0,5751	0,5733	0,575	0,6156	0,6082	0,6071	0,610	0,6453	0,6440
8000	0,5855	0,5805	0,5823	0,583	0,5867	0,5857	0,5910	0,588	0,6559	0,6573
10000	0,5779	0,5765	0,5781	0,577	0,6686	0,6780	0,6765	0,674	0,7051	0,7074

7.3.2 Prove B

	0,0925	0,1025	0,1125	0,1225	0,1325	0,1425	0,1525	0,1625	0,1725	0,1825	0,1925	0,2025	0,2125	0,2225	0,2325	0,2425	0,2525	0,2625	0,2725	0,2825	0,29
B0,3	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15	B16	B17	B18	B19	B20	
0,142	0,036	- 0,015	- 0,011	0,023	- 0,030	- 0,013	0,114	- 0,021	- 0,029	0,022	- 0,035	- 0,012	0,028	- 0,049	0,029	0,024	- 0,020	0,016	0,033	- 0,028	0,000
0,077	0,013	- 0,002	- 0,000	0,007	- 0,011	0,003	0,010	- 0,011	0,001	0,006	- 0,010	0,012	0,008	- 0,041	0,032	0,022	- 0,009	0,027	0,025	- 0,009	0,000
0,095	0,063	- 0,109	- 0,095	- 0,067	- 0,105	- 0,095	- 0,066	- 0,105	- 0,095	- 0,064	- 0,108	- 0,098	- 0,067	- 0,114	- 0,091	- 0,071	- 0,110	- 0,099	- 0,069	- 0,107	- 0,000
0,317	0,132	0,160	0,156	0,152	0,179	0,186	0,178	0,206	0,212	0,179	0,242	0,217	0,209	0,255	0,230	0,216	0,264	0,245	0,228	0,258	0,000
0,276	0,191	0,211	0,212	0,203	0,228	0,228	0,218	0,235	0,231	0,225	0,247	0,226	0,216	0,240	0,224	0,208	0,236	0,225	0,207	0,234	0,000
0,232	0,242	0,245	0,254	0,264	0,280	0,279	0,290	0,305	0,301	0,299	0,310	0,293	0,295	0,291	0,267	0,274	0,255	0,257	0,268	0,246	0,000
0,185	0,225	0,150	0,140	0,265	0,166	0,168	0,300	0,197	0,181	0,255	0,135	0,141	0,211	0,095	0,087	0,170	0,058	0,052	0,131	0,030	0,000
0,409	0,347	0,331	0,333	0,336	0,297	0,289	0,280	0,248	0,251	0,256	0,224	0,242	0,296	0,247	0,285	0,376	0,342	0,404	0,455	0,445	0,000
0,416	0,448	0,441	0,407	0,389	0,319	0,319	0,343	0,324	0,351	0,371	0,342	0,398	0,415	0,393	0,446	0,459	0,414	0,468	0,432	0,400	0,000
0,536	0,487	0,375	0,356	0,430	0,362	0,385	0,460	0,385	0,404	0,472	0,384	0,426	0,491	0,398	0,416	0,477	0,414	0,444	0,497	0,368	0,000
0,544	0,405	0,380	0,423	0,397	0,395	0,401	0,426	0,363	0,389	0,440	0,420	0,414	0,448	0,443	0,427	0,453	0,430	0,430	0,476	0,420	0,000
0,472	0,487	0,412	0,377	0,444	0,372	0,395	0,472	0,452	0,441	0,501	0,424	0,404	0,460	0,417	0,446	0,533	0,500	0,481	0,511	0,421	0,000
0,570	0,559	0,463	0,470	0,523	0,439	0,515	0,568	0,503	0,529	0,590	0,520	0,552	0,633	0,540	0,559	0,628	0,539	0,591	0,654	0,535	0,000
0,490	0,518	0,424	0,480	0,492	0,414	0,453	0,531	0,485	0,520	0,577	0,482	0,472	0,571	0,495	0,440	0,573	0,494	0,504	0,627	0,492	0,000
0,587	0,488	0,509	0,476	0,509	0,534	0,539	0,543	0,526	0,545	0,563	0,556	0,546	0,563	0,638	0,550	0,527	0,597	0,615	0,553	0,592	0,000
0,533	0,474	0,534	0,525	0,486	0,534	0,611	0,518	0,580	0,640	0,522	0,592	0,628	0,509	0,585	0,616	0,494	0,591	0,630	0,521	0,590	0,000
0,547	0,418	0,506	0,491	0,409	0,526	0,523	0,456	0,510	0,587	0,477	0,611	0,619	0,491	0,613	0,594	0,451	0,579	0,577	0,452	0,610	0,000
0,626	0,426	0,493	0,468	0,465	0,506	0,550	0,434	0,531	0,549	0,412	0,590	0,518	0,450	0,589	0,535	0,445	0,585	0,522	0,460	0,571	0,000
	0,463	0,513	0,563	0,613	0,663	0,713	0,763	0,813	0,863	0,913	0,963	1,013	1,063	1,113	1,163	1,213	1,263	1,313	1,363	1,413	1,463

	0,0925	0,1025	0,1125	0,1225	0,1325	0,1425	0,1525	0,1625	0,1725	0,1825	0,1925	0,2025	0,2125	0,2225	0,2325	0,2425	0,2525	0,2625	0,2725	0,2825	0,29
B0,3	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15	B16	B17	B18	B19	B20	
0,068	0,017	- 0,007	- 0,005	0,011	- 0,015	- 0,006	0,055	- 0,010	- 0,014	0,010	- 0,017	- 0,006	0,013	- 0,024	0,014	0,012	- 0,009	0,008	0,016	- 0,013	0,000
0,037	0,006	- 0,001	- 0,000	0,003	- 0,005	0,001	0,005	- 0,005	0,000	0,003	- 0,005	0,006	0,004	- 0,020	0,015	0,010	- 0,004	0,013	0,012	- 0,004	0,000
0,046	0,030	- 0,052	- 0,045	- 0,032	- 0,050	- 0,045	- 0,032	- 0,050	- 0,045	- 0,031	- 0,052	- 0,047	- 0,032	- 0,055	- 0,044	- 0,034	- 0,053	- 0,048	- 0,033	- 0,051	- 0,000
0,152	0,063	0,077	0,075	0,073	0,086	0,089	0,085	0,099	0,102	0,086	0,116	0,104	0,100	0,123	0,110	0,104	0,127	0,118	0,109	0,124	0,000
0,133	0,092	0,101	0,102	0,098	0,110	0,109	0,105	0,113	0,111	0,108	0,118	0,108	0,104	0,115	0,108	0,100	0,113	0,108	0,100	0,112	0,000
0,111	0,116	0,118	0,122	0,127	0,135	0,134	0,139	0,146	0,144	0,143	0,149	0,141	0,142	0,140	0,128	0,132	0,123	0,123	0,129	0,118	0,000
0,089	0,108	0,072	0,067	0,127	0,080	0,081	0,144	0,095	0,087	0,122	0,065	0,068	0,101	0,046	0,042	0,082	0,028	0,025	0,063	0,015	0,000
0,196	0,167	0,139	0,160	0,161	0,142	0,139	0,135	0,119	0,120	0,123	0,108	0,116	0,142	0,118	0,137	0,180	0,164	0,194	0,219	0,214	0,000
0,200	0,215	0,211	0,195	0,187	0,153	0,153	0,165	0,156	0,168	0,178	0,164	0,191	0,199	0,189	0,214	0,220	0,199	0,225	0,207	0,192	0,000
0,257	0,234	0,180	0,171	0,206	0,174	0,185	0,221	0,185	0,194	0,227	0,184	0,204	0,236	0,191	0,200	0,229	0,199	0,213	0,228	0,177	0,000
0,261	0,194	0,182	0,203	0,191	0,190	0,193	0,205	0,174	0,187	0,211	0,201	0,199	0,215	0,213	0,205	0,217	0,206	0,207	0,228	0,202	0,000
0,226	0,234	0,198	0,181	0,213	0,178	0,189	0,227	0,217	0,212	0,241	0,204	0,194	0,221	0,200	0,214	0,256	0,240	0,231	0,245	0,202	0,000
0,274	0,268	0,222	0,226	0,251	0,211	0,247	0,273	0,241	0,254	0,283	0,249	0,265	0,304	0,259	0,269	0,301	0,259	0,284	0,314	0,257	0,000
0,235	0,249	0,203	0,230	0,236	0,199	0,217	0,255	0,233	0,240	0,277	0,231	0,227	0,274	0,238	0,211	0,275	0,237	0,242	0,301	0,236	0,000
0,282	0,234	0,244	0,228	0,245	0,256	0,259	0,260	0,253	0,262	0,270	0,267	0,262	0,270	0,306	0,264	0,253	0,286	0,295	0,265	0,284	0,000
0,256	0,227	0,256	0,252	0,233	0,256	0,293	0,249	0,278	0,311	0,251	0,284	0,301	0,244	0,281	0,296	0,237	0,284	0,302	0,250	0,283	0,000
0,263	0,201	0,243	0,236	0,196	0,252	0,251	0,219	0,245	0,282	0,229	0,293	0,297	0,236	0,294	0,285	0,217	0,278	0,277	0,217	0,293	0,000
0,301	0,205	0,237	0,224	0,223	0,243	0,264	0,208	0,255	0,263	0,198	0,283	0,249	0,216	0,283	0,257	0,214	0,281	0,250	0,221	0,274	0,000

	0,0925	0,1025	0,1125	0,1225	0,1325	0,1425	0,1525	0,1625	0,1725	0,1825	0,1925	0,2025	0,2125	0,2225	0,2325	0,2425	0,2525	0,2625	0,2725	0,2825	0,29
B0,3	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15	B16	B17	B18	B19	B20	
0,189	0,048	- 0,020	- 0,015	0,031	- 0,040	- 0,017	0,152	- 0,028	- 0,039	0,029	- 0,046	- 0,016	0,037	- 0,066	0,039	0,032	- 0,026	0,022	0,043	- 0,037	0,000
0,103	0,017	- 0,002	- 0,000	0,010	- 0,015	0,004	0,013	- 0,014	0,001	0,009	- 0,013	0,016	0,011	- 0,055	0,043	0,029	- 0,011	0,036	0,033	- 0,012	0,000
0,127	0,084	- 0,145	- 0,126	- 0,090	- 0,139	- 0,126	- 0,088	- 0,140	- 0,126	- 0,085	- 0,144	- 0,131	- 0,090	- 0,151	- 0,121	- 0,094	- 0,146	- 0,133	- 0,092	- 0,143	- 0,000
0,423	0,176	0,214	0,208	0,202	0,239	0,248	0,237	0,275	0,283	0,239	0,323	0,290	0,278	0,340	0,306	0,288	0,352	0,327	0,303	0,345	0,000
0,368	0,255	0,282	0,283	0,271	0,305	0,304	0,291	0,314	0,308	0,299	0,329	0,301	0,288	0,320	0,299	0,277	0,315	0,299	0,277	0,312	0,000
0,309	0,323	0,327	0,339	0,352	0,374	0,372	0,386	0,406	0,401	0,398	0,413	0,391	0,394	0,388	0,357	0,366	0,340	0,342	0,358	0,328	0,000
0,246	0,300	0,200	0,186	0,353	0,222	0,224	0,400	0,263	0,241	0,340	0,179	0,189	0,281	0,126	0,117	0,227	0,077	0,069	0,174	0,041	0,000
0,546	0,463	0,441	0,444	0,448	0,395	0,385	0,374	0,330	0,334	0,341	0,299	0,323	0,394	0,329	0,379	0,501	0,456	0,539	0,607	0,593	0,000
0,555	0,597	0,587	0,543	0,519	0,425	0,425	0,458	0,432	0,468	0,495	0,456	0,531	0,554	0,524	0,594	0,612	0,552	0,624	0,576	0,534	0,000
0,715	0,649	0,500	0,474	0,573	0,482	0,513	0,613	0,513	0,539	0,629	0,512	0,568	0,655	0,531	0,555	0,636	0,552	0,593	0,662	0,491	0,000
0,726	0,540	0,506	0,564	0,530	0,527	0,535	0,568	0,485	0,519	0,586	0,560	0,552	0,598	0,591	0,570	0,604	0,573	0,574	0,634	0,560	0,000
0,629	0,649																				

7.3.1.1 Prove B, coefficienti assorbimento modulo

0,1425	0,1525	0,1625	0,1725	0,1825	0,1925	0,2025	0,2125	0,2225	0,2325	0,2425	0,2525	0,2625	0,2725	0,2825	0,2925	0,3025																		
B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15	B16	B17	B18	B19	B20	B21																		
0,036	0,300	-	0,052	-	0,067	0,048	-	0,072	-	0,024	0,052	-	0,088	0,050	0,040	-	0,031	0,025	0,048	-	0,039	0,051	0,003											
0,008	0,026	-	0,026	0,001	0,014	-	0,020	0,024	0,015	-	0,074	0,055	0,036	-	0,014	0,041	0,036	-	0,013	0,042	0,026	0,008	0,002											
0,266	-	0,174	-	0,258	-	0,220	-	0,139	-	0,224	-	0,194	-	0,126	-	0,204	-	0,156	-	0,116	-	0,174	-	0,152	-	0,101	-	0,152	-	0,142	-	0,099	0,266	
0,522	0,466	0,508	0,492	0,393	0,504	0,429	0,393	0,459	0,395	0,356	0,418	0,374	0,334	0,366	0,339	0,312	0,286	0,266	0,246	0,226	0,206	0,186	0,166	0,146	0,126	0,106	0,086	0,066	0,046	0,026	0,006			
0,640	0,572	0,579	0,536	0,492	0,512	0,446	0,407	0,432	0,386	0,343	0,375	0,342	0,304	0,332	0,312	0,286	0,266	0,246	0,226	0,206	0,186	0,166	0,146	0,126	0,106	0,086	0,066	0,046	0,026	0,006	0,000			
0,782	0,760	0,750	0,697	0,655	0,643	0,580	0,556	0,523	0,460	0,452	0,405	0,391	0,394	0,348	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340			
0,472	0,787	0,485	0,419	0,559	0,280	0,279	0,397	0,171	0,150	0,281	0,091	0,079	0,192	0,043	0,065	0,171	0,081	0,091	0,091	0,091	0,091	0,091	0,091	0,091	0,091	0,091	0,091	0,091	0,091	0,091	0,091	0,091		
0,811	0,736	0,609	0,581	0,561	0,466	0,479	0,556	0,443	0,489	0,620	0,542	0,616	0,668	0,630	0,624	0,612	0,600	0,588	0,576	0,564	0,552	0,540	0,528	0,516	0,504	0,492	0,480	0,468	0,456	0,444	0,432	0,420		
0,895	0,900	0,798	0,813	0,813	0,711	0,787	0,782	0,707	0,767	0,757	0,656	0,713	0,634	0,567	0,662	0,599	0,536	0,473	0,410	0,347	0,284	0,221	0,158	0,095	0,032	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
1,081	1,206	0,947	0,938	1,034	0,798	0,841	0,925	0,715	0,716	0,786	0,656	0,677	0,729	0,521	0,565	0,622	0,679	0,736	0,793	0,850	0,907	0,964	1,021	1,078	1,135	1,192	1,249	1,306	1,363	1,420	1,477	1,534	1,591	
1,127	1,118	0,895	0,902	0,964	0,872	0,818	0,844	0,797	0,735	0,747	0,681	0,656	0,698	0,595	0,563	0,599	0,641	0,683	0,725	0,767	0,809	0,851	0,893	0,935	0,977	1,019	1,061	1,103	1,145	1,187	1,229	1,271	1,313	
1,108	1,238	1,112	1,023	1,099	0,881	0,798	0,866	0,750	0,767	0,880	0,793	0,733	0,750	0,597	0,588	0,692	0,796	0,900	1,004	1,108	1,212	1,316	1,420	1,524	1,628	1,732	1,836	1,940	2,044	2,148	2,252	2,356	2,460	
1,445	1,491	1,237	1,226	1,294	1,080	1,089	1,192	0,970	0,962	1,036	0,854	0,901	0,959	0,758	0,773	0,887	0,991	1,095	1,199	1,303	1,407	1,511	1,615	1,719	1,823	1,927	2,031	2,135	2,239	2,343	2,447	2,551	2,655	
1,272	1,394	1,193	1,205	1,264	1,002	0,933	1,076	0,890	0,757	0,945	0,782	0,768	0,920	0,697	0,606	0,822	0,944	1,066	1,188	1,310	1,432	1,554	1,676	1,798	1,920	2,042	2,164	2,286	2,408	2,530	2,652	2,774	2,896	
1,512	1,423	1,296	1,264	1,233	1,156	1,078	1,059	1,148	0,945	0,869	0,945	0,937	0,812	0,839	0,813	0,777	0,741	0,705	0,669	0,633	0,597	0,561	0,525	0,489	0,453	0,417	0,381	0,345	0,309	0,273	0,237	0,201	0,165	
1,715	1,359	1,427	1,505	1,144	1,229	1,240	0,957	1,052	1,060	0,815	0,937	0,960	0,764	0,835	0,824	0,666	0,600	0,534	0,468	0,402	0,336	0,270	0,204	0,138	0,072	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
1,469	1,196	1,254	1,362	1,045	1,270	1,224	0,924	1,103	1,023	0,744	0,918	0,879	0,663	0,864	0,737	0,588	0,522	0,456	0,390	0,324	0,258	0,192	0,126	0,060	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,544	1,139	1,307	1,273	0,902	1,227	1,023	0,847	1,058	0,920	0,735	0,927	0,795	0,675	0,808	0,701	0,688	0,675	0,662	0,649	0,636	0,623	0,610	0,597	0,584	0,571	0,558	0,545	0,532	0,519	0,506	0,493	0,480	0,467	0,454
0,950	1,017	1,083	1,150	1,217	1,283	1,350	1,417	1,483	1,550	1,617	1,683	1,750	1,817	1,883	1,950	2,017	2,083	2,150	2,217	2,283	2,350	2,417	2,483	2,550	2,617	2,683	2,750	2,817	2,883	2,950	3,017	3,083	3,150	3,217
0,171	0,183	0,195	0,207	0,219	0,231	0,243	0,255	0,267	0,279	0,291	0,303	0,315	0,327	0,339	0,351	0,363	0,375	0,387	0,399	0,411	0,423	0,435	0,447	0,459	0,471	0,483	0,495	0,507	0,519	0,531	0,543	0,555	0,567	0,579

0,1425	0,1525	0,1625	0,1725	0,1825	0,1925	0,2025	0,2125	0,2225	0,2325	0,2425	0,2525	0,2625	0,2725	0,2825	0,2925	0,3025																			
B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15	B16	B17	B18	B19	B20	B21																			
0,008	0,026	-	0,026	0,001	0,014	-	0,020	0,024	0,015	-	0,074	0,055	0,036	-	0,014	0,041	0,036	-	0,013	0,042	0,026	0,008	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
0,648	0,600	0,612	0,575	0,513	0,553	0,485	0,452	0,471	0,414	0,384	0,399	0,369	0,344	0,349	0,330	0,312	0,294	0,276	0,258	0,240	0,222	0,204	0,186	0,168	0,150	0,132	0,114	0,096	0,078	0,060	0,042	0,024	0,006	0,000	
0,726	0,808	0,631	0,604	0,644	0,485	0,515	0,578	0,440	0,469	0,553	0,430	0,469	0,498	0,413	0,450	0,466	0,482	0,498	0,514	0,530	0,546	0,562	0,578	0,594	0,610	0,626	0,642	0,658	0,674	0,690	0,706	0,722	0,738	0,754	
1,105	1,187	0,985	0,954	1,032	0,850	0,819	0,878	0,754	0,739	0,804	0,710	0,689	0,726	0,571	0,572	0,637	0,674	0,711	0,748	0,785	0,822	0,859	0,896	0,933	0,970	1,007	1,044	1,081	1,118	1,155	1,192	1,229	1,266	1,303	
1,410	1,436	1,242	1,232	1,264	1,079	1,033	1,109	1,002	0,888	0,950	0,860	0,868	0,897	0,765	0,730	0,820	0,882	0,944	1,006	1,068	1,130	1,192	1,254	1,316	1,378	1,440	1,502	1,564	1,626	1,688	1,750	1,812	1,874	1,936	
1,576	1,231	1,330	1,380	1,030	1,242	1,162	0,909	1,071	1,001	0,765	0,927	0,878	0,701	0,836	0,754	0,644	0,574	0,504	0,434	0,364	0,294	0,224	0,154	0,084	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,950	1,017	1,083	1,150	1,217	1,283	1,350	1,417	1,483	1,550	1,617	1,683	1,750	1,817	1,883	1,950	2,017	2,083	2,150	2,217	2,283	2,350	2,417	2,483	2,550	2,617	2,683	2,750	2,817	2,883	2,950	3,017	3,083	3,150	3,217	3,283

fficiente di Assorbimento di modulo

fficiente di Assorbimento di modulo in bande di ottava

7.3.3 Prove C

		0,48																				
		0,0925	0,1025	0,1125	0,1225	0,1325	0,1425	0,1525	0,1625	0,1725	0,1825	0,1925	0,2025	0,2125	0,2225	0,2325	0,2425	0,2525	0,2625	0,2725	0,2825	0,29
C0,3		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	
0,036	-	0,022	- 0,047	- 0,005	- 0,008	- 0,048	0,005	0,040	- 0,058	0,008	0,069	- 0,052	- 0,006	NaN	- 0,052	0,005	0,001	- 0,044	- 0,003	0,095	- 0,044	0
0,038	-	0,005	- 0,034	0,008	0,001	- 0,031	0,011	- 0,003	- 0,035	0,011	0,003	- 0,034	0,010	- 0,008	- 0,030	0,013	0,003	- 0,031	0,013	0,006	- 0,021	0
0,074	-	0,065	- 0,093	- 0,083	- 0,058	- 0,108	- 0,085	- 0,068	- 0,092	- 0,083	- 0,059	- 0,105	- 0,079	- 0,065	- 0,102	- 0,085	- 0,063	- 0,101	- 0,081	- 0,061	- 0,101	- 0
0,171	-	0,056	0,090	0,090	0,066	0,093	0,102	0,071	0,098	0,106	0,076	0,102	0,118	0,087	0,115	0,122	0,090	0,126	0,134	0,101	0,149	0
0,187	-	0,093	0,103	0,109	0,096	0,113	0,119	0,100	0,124	0,119	0,099	0,130	0,129	0,103	0,151	0,141	0,116	0,162	0,153	0,131	0,186	0
0,216	-	0,180	0,166	0,191	0,210	0,185	0,220	0,243	0,218	0,233	0,252	0,222	0,230	0,249	0,211	0,213	0,230	0,184	0,192	0,207	0,157	0
0,301	-	0,168	0,057	0,096	0,212	0,079	0,135	0,214	0,088	0,096	0,176	0,047	0,050	0,131	0,003	0,004	0,086	- 0,032	- 0,019	0,059	- 0,038	- 0
0,364	-	0,276	0,287	0,286	0,260	0,242	0,241	0,228	0,192	0,214	0,214	0,192	0,230	0,272	0,223	0,273	0,304	0,298	0,341	0,375	0,386	0
0,423	-	0,389	0,342	0,364	0,352	0,268	0,303	0,315	0,266	0,309	0,336	0,307	0,347	0,383	0,348	0,382	0,407	0,347	0,396	0,394	0,354	0
0,404	-	0,412	0,318	0,269	0,379	0,309	0,315	0,403	0,336	0,358	0,426	0,346	0,345	0,418	0,341	0,327	0,414	0,375	0,375	0,432	0,348	0
0,370	-	0,343	0,332	0,304	0,337	0,318	0,300	0,369	0,294	0,282	0,388	0,332	0,321	0,391	0,350	0,309	0,354	0,323	0,278	0,371	0,326	0
0,489	-	0,407	0,323	0,333	0,366	0,309	0,340	0,385	0,347	0,354	0,403	0,318	0,336	0,361	0,325	0,367	0,410	0,362	0,379	0,384	0,296	0
0,364	-	0,490	0,379	0,423	0,480	0,353	0,426	0,494	0,407	0,461	0,523	0,387	0,442	0,519	0,438	0,468	0,537	0,431	0,467	0,517	0,396	0
0,504	-	0,393	0,339	0,306	0,386	0,346	0,296	0,391	0,363	0,344	0,451	0,383	0,305	0,402	0,335	0,306	0,433	0,329	0,326	0,459	0,397	0
0,393	-	0,403	0,417	0,412	0,407	0,448	0,460	0,424	0,442	0,475	0,438	0,429	0,475	0,474	0,539	0,463	0,435	0,525	0,512	0,447	0,484	0
0,401	-	0,341	0,343	0,386	0,372	0,391	0,404	0,383	0,403	0,468	0,381	0,426	0,454	0,398	0,458	0,471	0,383	0,492	0,495	0,396	0,439	0
0,469	-	0,264	0,349	0,371	0,264	0,358	0,403	0,290	0,366	0,378	0,322	0,416	0,413	0,329	0,400	0,435	0,318	0,426	0,432	0,330	0,423	0
	-	0,280	0,336	0,366	0,312	0,358	0,393	0,236	0,362	0,404	0,228	0,364	0,398	0,264	0,407	0,414	0,280	0,439	0,426	0,321	0,394	0
	-	0,463	0,513	0,563	0,613	0,663	0,713	0,763	0,813	0,863	0,913	0,963	1,013	1,063	1,113	1,163	1,213	1,263	1,313	1,363	1,413	1

		0,48																				
		0,0925	0,1025	0,1125	0,1225	0,1325	0,1425	0,1525	0,1625	0,1725	0,1825	0,1925	0,2025	0,2125	0,2225	0,2325	0,2425	0,2525	0,2625	0,2725	0,2825	0,29
C0,3		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	
0,018	-	0,010	- 0,022	- 0,002	- 0,004	- 0,023	0,002	0,019	- 0,028	0,004	0,033	- 0,025	- 0,003	#####	- 0,025	0,002	0,000	- 0,021	- 0,001	0,046	- 0,021	0
0,018	-	0,003	- 0,016	0,004	0,001	- 0,015	0,005	- 0,002	- 0,017	0,005	0,002	- 0,016	0,005	- 0,004	- 0,014	0,006	0,001	- 0,015	0,006	0,003	- 0,010	0
0,035	-	0,031	- 0,045	- 0,040	- 0,028	- 0,052	- 0,041	- 0,033	- 0,044	- 0,040	- 0,028	- 0,050	- 0,038	- 0,031	- 0,049	- 0,041	- 0,030	- 0,048	- 0,039	- 0,029	- 0,049	- 0
0,082	-	0,027	0,043	0,043	0,032	0,044	0,049	0,034	0,047	0,051	0,037	0,049	0,057	0,042	0,055	0,059	0,043	0,060	0,064	0,049	0,071	0
0,090	-	0,045	0,050	0,052	0,046	0,054	0,057	0,048	0,059	0,057	0,048	0,063	0,062	0,049	0,072	0,068	0,056	0,078	0,074	0,063	0,089	0
0,104	-	0,087	0,080	0,092	0,101	0,089	0,106	0,117	0,105	0,112	0,121	0,107	0,111	0,120	0,101	0,102	0,110	0,089	0,092	0,100	0,076	0
0,077	-	0,081	0,027	0,046	0,102	0,038	0,065	0,103	0,042	0,046	0,085	0,023	0,024	0,063	0,001	0,002	0,041	- 0,015	- 0,009	0,028	- 0,018	- 0
0,145	-	0,133	0,138	0,137	0,125	0,116	0,116	0,109	0,092	0,103	0,103	0,092	0,111	0,130	0,107	0,131	0,146	0,143	0,164	0,180	0,185	0
0,175	-	0,187	0,164	0,175	0,169	0,128	0,146	0,151	0,127	0,148	0,161	0,147	0,166	0,184	0,167	0,183	0,196	0,167	0,190	0,189	0,170	0
0,203	-	0,198	0,152	0,129	0,182	0,149	0,151	0,193	0,161	0,172	0,205	0,166	0,166	0,201	0,164	0,157	0,199	0,180	0,180	0,207	0,167	0
0,194	-	0,165	0,159	0,146	0,162	0,153	0,144	0,177	0,141	0,135	0,186	0,159	0,154	0,188	0,168	0,148	0,170	0,155	0,133	0,178	0,156	0
0,178	-	0,195	0,155	0,160	0,176	0,149	0,163	0,185	0,166	0,170	0,193	0,153	0,161	0,173	0,156	0,176	0,197	0,174	0,182	0,184	0,142	0
0,235	-	0,235	0,182	0,203	0,230	0,169	0,204	0,237	0,196	0,221	0,251	0,186	0,212	0,249	0,210	0,225	0,258	0,207	0,224	0,248	0,190	0
0,175	-	0,188	0,163	0,147	0,185	0,166	0,142	0,188	0,174	0,165	0,217	0,184	0,146	0,193	0,161	0,147	0,209	0,158	0,157	0,220	0,191	0
0,242	-	0,193	0,200	0,198	0,195	0,215	0,221	0,204	0,212	0,228	0,210	0,206	0,228	0,228	0,259	0,222	0,209	0,252	0,246	0,214	0,232	0
0,189	-	0,164	0,165	0,185	0,179	0,188	0,194	0,184	0,193	0,225	0,183	0,204	0,218	0,191	0,220	0,226	0,184	0,236	0,238	0,190	0,211	0
0,193	-	0,127	0,167	0,178	0,127	0,172	0,194	0,139	0,176	0,181	0,154	0,200	0,198	0,158	0,192	0,209	0,152	0,204	0,207	0,159	0,203	0
0,225	-	0,135	0,161	0,176	0,150	0,172	0,189	0,113	0,174	0,194	0,109	0,175	0,191	0,127	0,195	0,199	0,134	0,211	0,205	0,154	0,189	0

		0,24																				
		0,0925	0,1025	0,1125	0,1225	0,1325	0,1425	0,1525	0,1625	0,1725	0,1825	0,1925	0,2025	0,2125	0,2225	0,2325	0,2425	0,2525	0,2625	0,2725	0,2825	0,29
C0,3		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	
0,073	-	0,044	- 0,094	- 0,010	- 0,017	- 0,096	0,010	0,080	- 0,117	0,017	0,139	- 0,105	- 0,013	#####	- 0,103	0,010	0,001	- 0,088	- 0,006	0,190	- 0,088	0
0,077	-	0,011	- 0,068	0,016	0,003	- 0,062	0,021	- 0,007	- 0,069	0,023	0,007	- 0,067	0,021	- 0,016	- 0,060	0,026	0,006	- 0,062	0,026	0,012	- 0,042	0
0,147	-	0,130	- 0,186	- 0,165	- 0,116	- 0,215	- 0,169	- 0,137	- 0,184	- 0,166	- 0,118	- 0,210	- 0,157	- 0,130	- 0,203	- 0,170	- 0,126	- 0,201	- 0,161	- 0,122	- 0,203	- 0
0,343	-	0,112	0,180	0,180	0,132	0,185	0,204	0,141	0,195	0,212	0,152	0,205	0,236	0,174	0,231	0,244	0,181	0,251	0,269	0,202	0,297	0
0,375	-	0,186	0,207	0,218	0,192	0,226	0,239	0,201	0,247	0,238	0,199	0,261	0,259	0,206	0,302	0,283	0,232	0,324	0,306	0,262	0,372	0
0,432	-	0,361	0,333	0,382	0,420	0,370	0,441	0,487	0,437	0,465	0,505	0,445	0,461	0,499	0,421	0,426	0,459	0,369	0,385	0,415	0,315	0
0,322	-	0,336	0,114	0,191	0,423	0,157	0,270	0,427	0,176	0,193	0,352	0,095	0,100	0,261	0,006	0,007	0,171	- 0,063	- 0,038	0,117	- 0,075	- 0
0,602	-	0,553	0,574	0,572	0,521	0,484	0,482	0,456	0,383	0,427	0,428	0,383	0,461	0,543	0,445	0,547	0,608	0,596	0,682	0,750	0,773	0
0,729	-	0,777	0,685	0,728	0,705	0,535	0,607	0,629	0,531	0,618	0,672	0,614	0,694	0,766	0,695	0,765	0,815	0,694	0,793	0,787	0,708	0
0,846	-	0,825	0,635	0,537	0,757	0,619	0,629	0,806	0,672	0,716	0,852	0,692	0,691	0,836	0,681	0,653	0,827	0,751	0,751	0,863	0,697	0
0,809	-	0,686	0,664	0,609	0,675	0,637	0,601	0,738	0,58													

7.3.3.1 Prove C, coefficienti assorbimento modulo

1,425	0,1525	0,1625	0,1725	0,1825	0,1925	0,2025	0,2125	0,2225	0,2325	0,2425	0,2525	0,2625	0,2725	0,2825	0,2925	0,3025
C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21
0,014	0,104	- 0,144	0,020	0,152	- 0,109	- 0,013	#VALORE!	- 0,093	0,009	0,001	- 0,070	- 0,005	0,139	- 0,062	0,006	0,014
0,030	- 0,009	- 0,085	0,026	0,007	- 0,070	0,021	- 0,015	- 0,054	0,023	0,005	- 0,049	0,020	0,009	- 0,029	0,012	0,009
0,238	- 0,179	- 0,226	- 0,192	- 0,129	- 0,218	- 0,155	- 0,122	- 0,183	- 0,146	- 0,104	- 0,159	- 0,123	- 0,090	- 0,144	- 0,113	- 0,083
0,286	0,185	0,240	0,246	0,167	0,213	0,233	0,164	0,207	0,210	0,149	0,199	0,205	0,148	0,210	0,196	0,137
0,335	0,263	0,304	0,275	0,218	0,271	0,256	0,194	0,271	0,243	0,192	0,256	0,233	0,192	0,264	0,214	0,170
0,618	0,639	0,537	0,540	0,553	0,462	0,455	0,469	0,379	0,366	0,379	0,292	0,293	0,304	0,223	0,235	0,259
0,378	0,561	0,216	0,224	0,386	0,099	0,099	0,246	0,005	0,006	0,141	- 0,050	- 0,029	0,086	- 0,053	- 0,037	0,059
0,677	0,597	0,471	0,495	0,469	0,398	0,455	0,511	0,400	0,470	0,502	0,472	0,520	0,551	0,547	0,536	0,520
0,852	0,825	0,654	0,716	0,737	0,638	0,685	0,721	0,625	0,658	0,672	0,550	0,604	0,578	0,501	0,535	0,529
0,883	1,057	0,828	0,830	0,934	0,719	0,682	0,787	0,612	0,562	0,682	0,595	0,572	0,634	0,493	0,475	0,553
0,843	0,968	0,723	0,654	0,851	0,689	0,633	0,736	0,629	0,532	0,584	0,511	0,423	0,545	0,461	0,401	0,450
0,955	1,009	0,853	0,822	0,883	0,661	0,663	0,680	0,585	0,632	0,677	0,574	0,577	0,564	0,419	0,432	0,497
1,195	1,295	1,003	1,070	1,146	0,804	0,872	0,976	0,788	0,806	0,885	0,683	0,712	0,758	0,561	0,620	0,753
0,831	1,026	0,893	0,798	0,989	0,795	0,602	0,757	0,602	0,527	0,717	0,520	0,497	0,674	0,562	0,497	0,629
1,292	1,113	1,087	1,100	0,959	0,892	0,938	0,893	0,969	0,797	0,718	0,832	0,780	0,656	0,686	0,629	0,603
1,133	1,005	0,992	1,086	0,835	0,885	0,897	0,749	0,824	0,810	0,631	0,780	0,755	0,581	0,621	0,598	0,539
1,132	0,760	0,902	0,877	0,705	0,865	0,817	0,619	0,718	0,749	0,524	0,675	0,658	0,485	0,599	0,556	0,420
1,103	0,619	0,892	0,937	0,499	0,756	0,786	0,497	0,732	0,712	0,462	0,696	0,650	0,471	0,558	0,572	0,433
1,425	1,525	1,625	1,725	1,825	1,925	2,025	2,125	2,225	2,325	2,425	2,525	2,625	2,725	2,825	2,925	3,025
0,171	0,183	0,195	0,207	0,219	0,231	0,243	0,255	0,267	0,279	0,291	0,303	0,315	0,327	0,339	0,351	0,363

1,425	0,1525	0,1625	0,1725	0,1825	0,1925	0,2025	0,2125	0,2225	0,2325	0,2425	0,2525	0,2625	0,2725	0,2825	0,2925	0,3025
C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21
0,030	- 0,009	- 0,085	0,026	0,007	- 0,070	0,021	- 0,015	- 0,054	0,023	0,005	- 0,049	0,020	0,009	- 0,029	0,012	0,009
0,413	0,362	0,361	0,354	0,313	0,315	0,315	0,276	0,286	0,273	0,240	0,249	0,244	0,215	0,232	0,215	0,191
0,636	0,661	0,447	0,478	0,530	0,378	0,413	0,493	0,344	0,378	0,438	0,324	0,365	0,405	0,332	0,345	0,369
0,894	1,011	0,801	0,769	0,889	0,690	0,660	0,734	0,609	0,575	0,648	0,560	0,524	0,581	0,458	0,436	0,500
1,106	1,145	0,994	0,989	1,032	0,830	0,804	0,875	0,786	0,710	0,773	0,679	0,663	0,696	0,603	0,582	0,666
1,123	0,794	0,929	0,967	0,680	0,835	0,833	0,622	0,758	0,757	0,539	0,717	0,687	0,512	0,593	0,575	0,466
1,425	1,525	1,625	1,725	1,825	1,925	2,025	2,125	2,225	2,325	2,425	2,525	2,625	2,725	2,825	2,925	3,025

fficiente di Assorbimento di modulo

fficiente di Assorbimento di modulo in bande di ottava

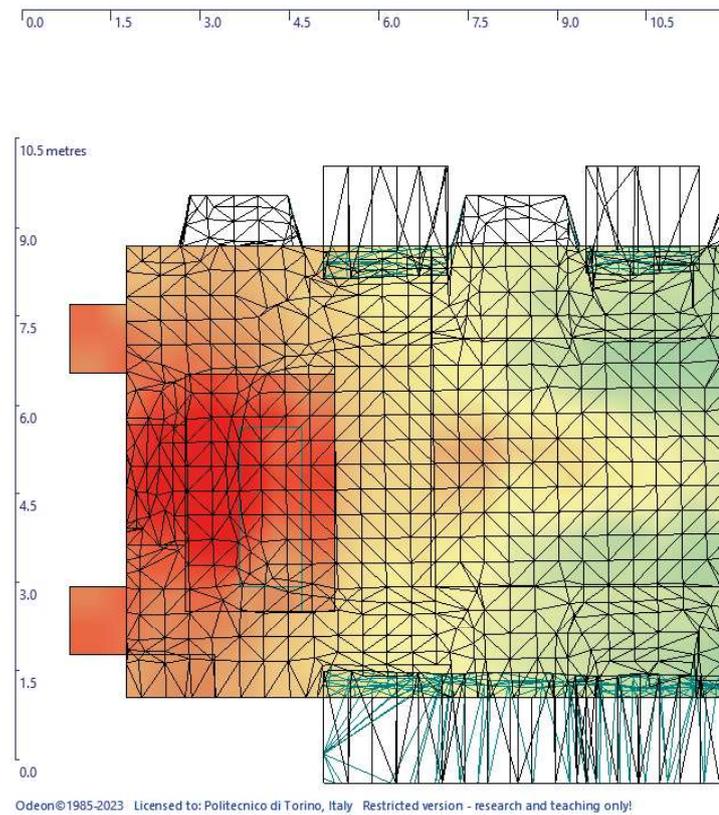
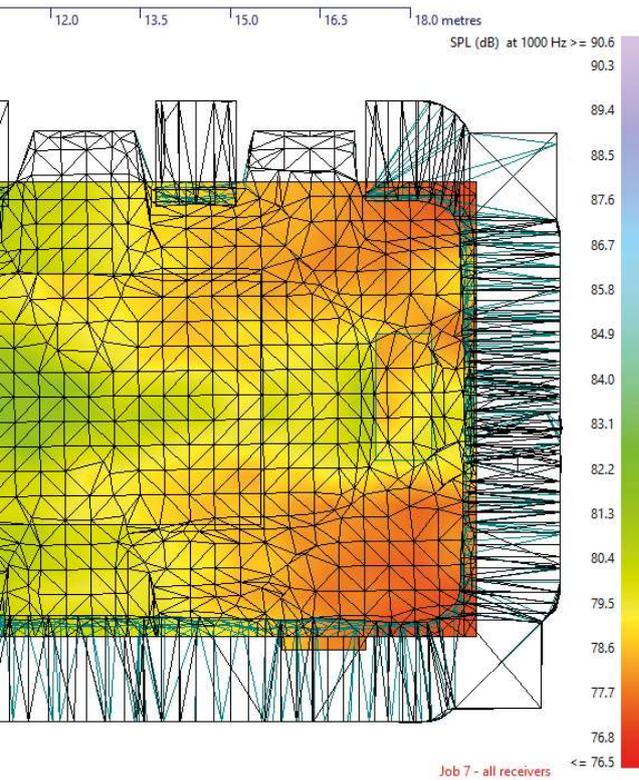
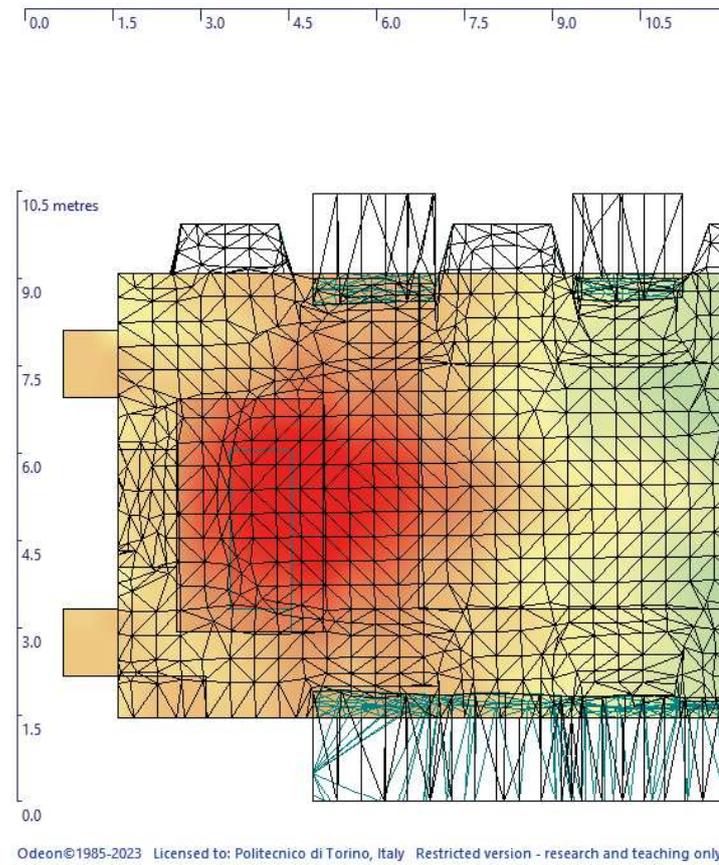
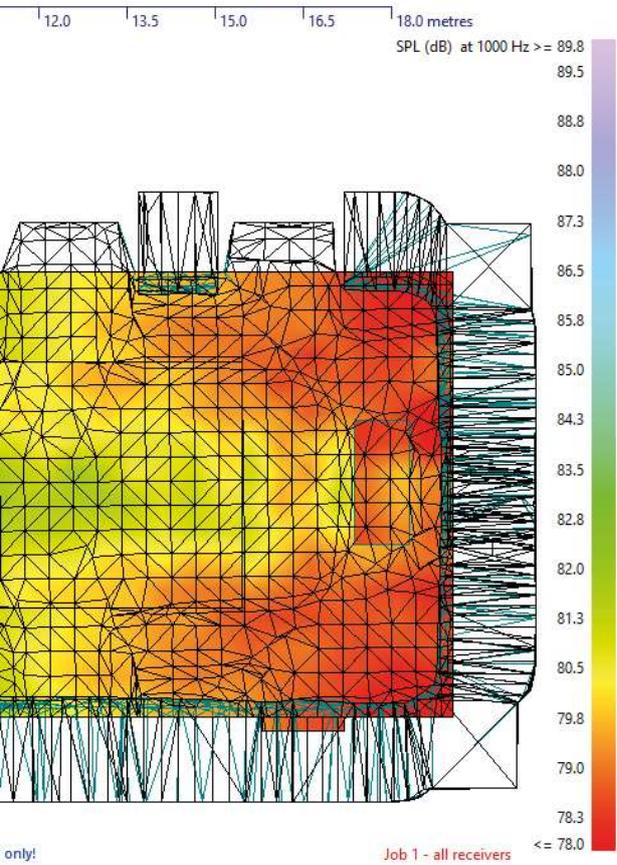
7.4 Confronto delle conformazioni modulari con fattori di forma corrispondenti

0,1625	0,1725	0,1825	0,1925	0,2025	0,2125	0,2225	0,2325	0,2425	0,2525	0,2625	0,2725	0,2825	0,2925	0,3025	0,3125	0,3225	0,3325									
A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22	A23	A24	A25									
0,033	0,042	0,033	0,008	0,065	0,022	0,044	0,053	0,060	0,046	0,051	0,023	-	0,010	0,054	0,024	-	0,004	0,068	0,066							
0,737	0,660	0,629	0,618	0,552	0,517	0,517	0,478	0,431	0,450	0,417	0,398	0,403	0,374	0,360	0,365	0,345	0,334									
0,722	0,690	0,746	0,570	0,603	0,710	0,554	0,596	0,758	0,587	0,597	0,677	0,547	0,573	0,599	0,495	0,484	0,469									
1,219	1,184	1,279	1,026	1,068	1,137	0,991	0,996	1,058	0,903	0,875	0,929	0,768	0,773	0,825	0,714	0,736	0,714									
1,628	1,604	1,539	1,447	1,415	1,383	1,313	1,228	1,198	1,139	1,172	1,089	1,062	1,025	1,026	0,953	0,927	0,899									
1,806	1,824	1,488	1,638	1,521	1,319	1,416	1,385	1,192	1,244	1,189	1,088	1,122	1,101	0,972	1,043	0,984	0,954									
0,813	0,863	0,913	0,963	1,013	1,063	1,113	1,163	1,213	1,263	1,313	1,363	1,413	1,463	1,513	1,563	1,613	1,663									
0,1225	0,1325	0,138	0,1425	0,1525	0,1625	0,168	0,1725	0,1825	0,1925	0,198	0,2025	0,2125	0,2225	0,228	0,2325	0,2425	0,2525									
B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15	B16	B17													
0,024	0,034	0,013	0,008	0,026	0,026	0,013	0,001	0,014	0,020	0,002	0,024	0,015	0,074	0,009	0,055	0,036	0,014									
0,674	0,692	0,670	0,648	0,600	0,612	0,594	0,575	0,513	0,553	0,519	0,485	0,452	0,471	0,443	0,414	0,384	0,399									
1,078	0,786	0,756	0,726	0,808	0,631	0,618	0,604	0,644	0,485	0,500	0,515	0,578	0,440	0,455	0,469	0,553	0,430									
1,384	1,136	1,121	1,105	1,187	0,985	0,969	0,954	1,032	0,850	0,835	0,819	0,878	0,754	0,747	0,739	0,804	0,710									
1,660	1,396	1,403	1,410	1,436	1,242	1,237	1,232	1,264	1,079	1,056	1,033	1,109	1,002	0,945	0,888	0,950	0,860									
1,480	1,576	1,576	1,576	1,231	1,330	1,355	1,380	1,030	1,242	1,202	1,162	0,909	1,071	1,036	1,001	0,765	0,927									
0,817	0,883	0,917	0,950	1,017	1,083	1,117	1,150	1,217	1,283	1,317	1,350	1,417	1,483	1,517	1,550	1,617	1,683									
0,0925	0,098	0,1025	0,108	0,1125	0,118	0,1225	0,128	0,1325	0,138	0,1425	0,148	0,1525	0,158	0,1625	0,168											
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8																			
-	0,024	-	0,078	-	0,132	-	0,052	0,029	0,017	0,004	-	0,045	-	0,094	-	0,032	0,030	0,010	-	0,009	-	0,047	-	0,085	-	0,030
0,475	0,472	0,468	0,465	0,462	0,434	0,405	0,399	0,393	0,403	0,413	0,388	0,362	0,362	0,361	0,357											
1,201	1,047	0,893	0,888	0,884	0,891	0,897	0,745	0,592	0,614	0,636	0,648	0,661	0,554	0,447	0,463											
1,675	1,471	1,266	1,169	1,073	1,125	1,177	1,060	0,943	0,918	0,894	0,953	1,011	0,906	0,801	0,785											
1,853	1,664	1,476	1,414	1,352	1,368	1,385	1,270	1,154	1,130	1,106	1,125	1,145	1,069	0,994	0,992											
1,276	1,306	1,336	1,334	1,331	1,181	1,032	1,073	1,115	1,119	1,123	0,959	0,794	0,862	0,929	0,948											
0,813	0,863	0,925	0,975	1,025	1,075	1,125	1,175	1,225	1,275	1,325	1,375	1,425	1,475	1,525	1,575	1,625	1,675									

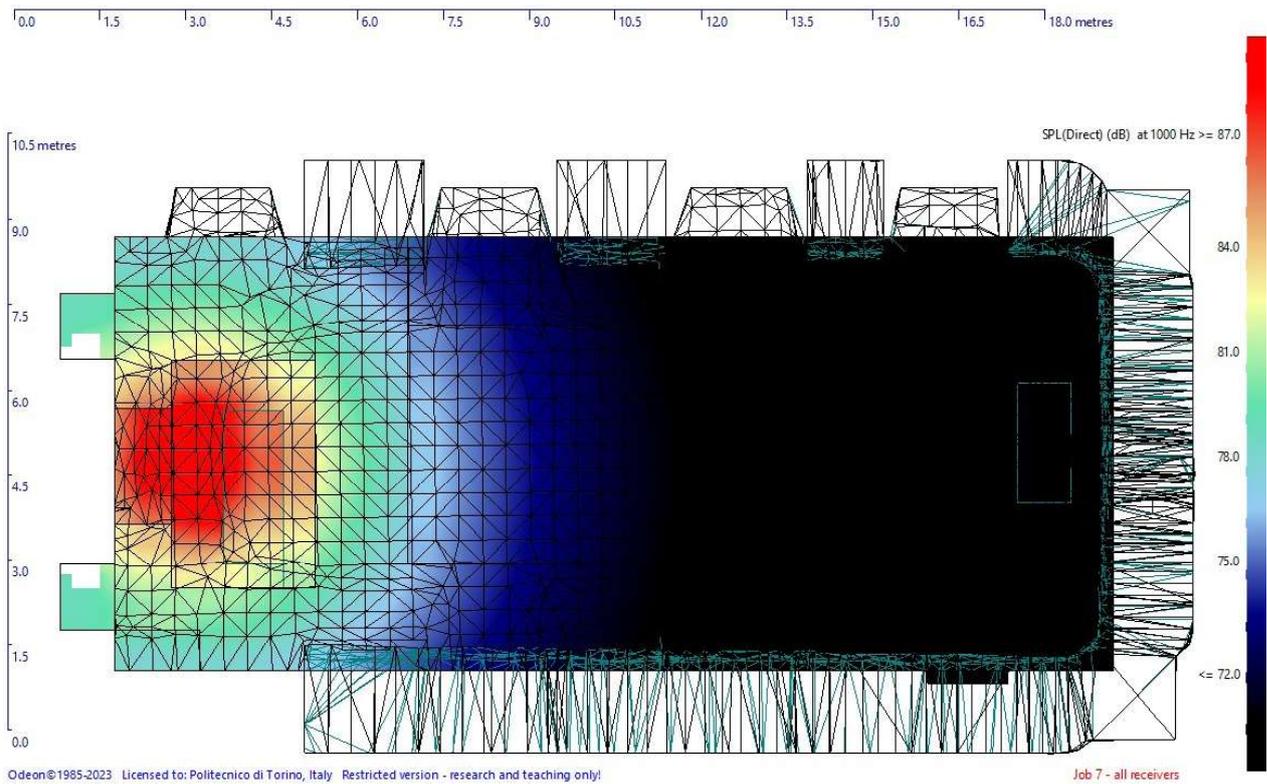
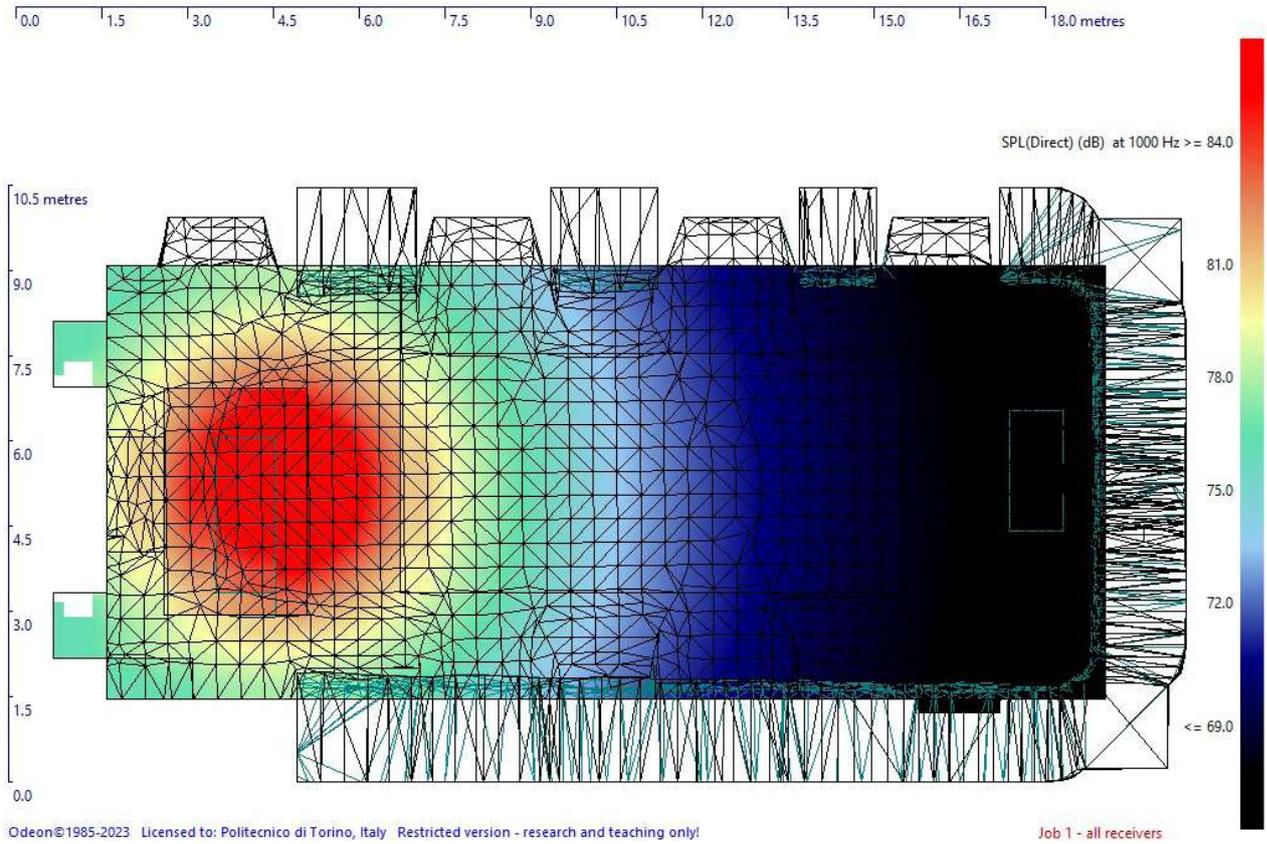
0,3725
B29
0,018
0,244
0,322
0,456
0,617
0,642
2,483

0,248	0,2525	0,258	0,2625	0,268	0,2725	0,278	0,2825	0,288	0,2925	0,298	0,3025	0,308	0,3125	0,318	0,3225	0,328	0,3325
	C17		C18		C19		C20		C21		C22		C23		C24		C25
0,022	0,049	0,015	0,020	0,015	0,009	0,010	0,029	0,009	0,012	0,010	0,009	0,014	0,036	0,012	0,012	0,014	0,015
0,244	0,249	0,246	0,244	0,229	0,215	0,224	0,232	0,224	0,215	0,203	0,191	0,193	0,195	0,191	0,187	0,180	0,173
0,381	0,324	0,344	0,365	0,385	0,405	0,368	0,332	0,338	0,345	0,357	0,369	0,335	0,302	0,303	0,304	0,299	0,294
0,604	0,560	0,542	0,524	0,553	0,581	0,519	0,458	0,447	0,436	0,469	0,502	0,464	0,426	0,426	0,426	0,419	0,411
0,726	0,679	0,671	0,663	0,680	0,696	0,649	0,603	0,593	0,582	0,622	0,661	0,593	0,525	0,525	0,525	0,511	0,498
0,628	0,717	0,702	0,687	0,600	0,512	0,553	0,593	0,584	0,575	0,520	0,464	0,497	0,530	0,531	0,532	0,520	0,509
2,475	2,525	2,575	2,625	2,675	2,725	2,775	2,825	2,875	2,925	2,975	3,025	3,075	3,125	3,175	3,225	3,275	3,325

7.5.1 Livelli di pressione sonora (Af)



7.5.1 Livelli di pressione sonora, suono diretto



7 Appendici

7.1 Prove 0-3



f	PROVA 0				PROVA 0,1				PROVA 1				PROVA 2				PROVA 3			
	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA
200	0,043	0,038	0,037	0,039	0,148	0,148	0,138	0,144	0,192	0,192	0,192	0,192	0,201	0,201	0,203	0,202	0,191	0,184	0,193	0,189
250	0,027	0,031	0,030	0,029	0,161	0,161	0,158	0,160	0,190	0,192	0,190	0,191	0,168	0,169	0,170	0,169	0,156	0,152	0,158	0,155
315	0,020	0,023	0,023	0,022	0,011	0,011	0,010	0,011	0,010	0,007	0,004	0,007	0,030	0,029	0,030	0,030	0,046	0,044	0,041	0,044
400	0,079	0,078	0,079	0,079	0,331	0,331	0,329	0,331	0,345	0,342	0,344	0,344	0,392	0,391	0,385	0,389	0,399	0,399	0,399	0,399
500	0,013	0,013	0,012	0,013	0,284	0,284	0,281	0,283	0,525	0,527	0,527	0,526	0,538	0,535	0,532	0,535	0,431	0,432	0,432	0,432
630	0,211	0,211	0,212	0,212	0,299	0,299	0,299	0,299	0,583	0,583	0,584	0,583	0,554	0,556	0,555	0,555	0,406	0,405	0,406	0,406
800	0,056	0,056	0,056	0,056	0,175	0,175	0,180	0,177	0,640	0,637	0,638	0,638	0,629	0,631	0,634	0,631	0,442	0,440	0,444	0,442
1000	0,480	0,480	0,481	0,480	0,576	0,576	0,576	0,576	1,060	1,059	1,059	1,059	0,846	0,844	0,844	0,845	0,620	0,616	0,619	0,618
1250	0,592	0,591	0,592	0,592	0,506	0,506	0,505	0,506	1,219	1,222	1,222	1,221	0,991	0,996	0,997	0,994	0,851	0,850	0,848	0,849
1600	0,760	0,760	0,760	0,760	0,628	0,628	0,628	0,628	1,162	1,160	1,160	1,161	1,018	1,018	1,018	1,018	0,843	0,844	0,844	0,844
2000	0,893	0,892	0,892	0,892	0,707	0,707	0,707	0,707	1,443	1,444	1,444	1,444	1,229	1,231	1,232	1,231	0,953	0,959	0,957	0,956
2500	1,076	1,076	1,076	1,076	0,776	0,776	0,776	0,776	1,637	1,634	1,636	1,636	1,496	1,502	1,502	1,500	1,101	1,100	1,109	1,103
3150	1,138	1,138	1,138	1,138	0,992	0,992	0,993	0,992	1,721	1,721	1,720	1,721	1,632	1,634	1,633	1,633	1,188	1,200	1,194	1,194
4000	0,843	0,843	0,843	0,843	0,774	0,774	0,773	0,774	1,632	1,632	1,628	1,628	1,435	1,430	1,428	1,431	1,037	1,040	1,040	1,039
5000	0,853	0,853	0,854	0,853	0,731	0,731	0,731	0,731	1,652	1,654	1,649	1,652	1,473	1,471	1,468	1,471	1,020	1,032	1,019	1,024
6300	0,734	0,733	0,734	0,734	0,704	0,704	0,707	0,705	1,474	1,475	1,463	1,471	1,326	1,316	1,314	1,319	0,988	0,987	0,981	0,985
8000	0,735	0,735	0,738	0,736	0,682	0,682	0,681	0,682	1,371	1,361	1,358	1,364	1,225	1,213	1,210	1,216	0,983	0,977	0,983	0,981
10000	0,726	0,727	0,729	0,727	0,735	0,735	0,739	0,736	1,467	1,465	1,459	1,463	1,355	1,337	1,336	1,343	1,036	1,046	1,038	1,040

1

- 1 Coefficiente di Assorbimento
- 2 Area di Assorbimento equivalente
- 3 Coefficiente di assorbimento di superficie unitaria dei pannelli

S	0,48																			
	PROVA 0 A TOT				PROVA 0,1 A TOT				PROVA 1 A TOT				PROVA 2 A TOT				PROVA 3 A TOT			
f	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA
200	0,021	0,0182	0,0180	0,0189	0,0709	0,0709	0,0662	0,0693	0,0921	0,0923	0,0921	0,0922	0,0964	0,0965	0,0974	0,0968	0,0919	0,0882	0,0925	0,0909
250	0,013	0,0151	0,0142	0,0140	0,0774	0,0774	0,0760	0,0770	0,0911	0,0922	0,0912	0,0915	0,0805	0,0809	0,0814	0,0809	0,0751	0,0730	0,0758	0,0746
315	0,009	0,0112	0,0109	0,0105	0,0054	0,0054	0,0046	0,0051	0,0046	0,0032	0,0021	0,0033	0,0143	0,0139	0,0145	0,0142	0,0219	0,0214	0,0197	0,0210
400	0,038	0,0375	0,0381	0,0378	0,1590	0,1590	0,1580	0,1587	0,1654	0,1643	0,1649	0,1649	0,1882	0,1876	0,1848	0,1869	0,1917	0,1915	0,1915	0,1916
500	0,006	0,0063	0,0060	0,0062	0,1365	0,1365	0,1347	0,1359	0,2518	0,2532	0,2528	0,2526	0,2583	0,2569	0,2553	0,2568	0,2070	0,2074	0,2074	0,2072
630	0,101	0,1014	0,1018	0,1016	0,1435	0,1435	0,1437	0,1436	0,2797	0,2799	0,2804	0,2800	0,2657	0,2667	0,2665	0,2663	0,1947	0,1944	0,1949	0,1947
800	0,027	0,0270	0,0269	0,0270	0,0842	0,0842	0,0862	0,0849	0,3071	0,3060	0,3061	0,3064	0,3019	0,3030	0,3041	0,3030	0,2121	0,2112	0,2130	0,2121
1000	0,230	0,2304	0,2307	0,2305	0,2767	0,2767	0,2764	0,2766	0,5089	0,5085	0,5083	0,5085	0,4061	0,4051	0,4052	0,4055	0,2975	0,2959	0,2970	0,2968
1250	0,284	0,2838	0,2840	0,2840	0,2431	0,2431	0,2424	0,2428	0,5851	0,5864	0,5867	0,5861	0,4757	0,4779	0,4784	0,4773	0,4083	0,4078	0,4072	0,4077
1600	0,365	0,3646	0,3650	0,3648	0,3013	0,3013	0,3015	0,3014	0,5578	0,5566	0,5568	0,5571	0,4886	0,4884	0,4884	0,4885	0,4049	0,4051	0,4049	0,4050
2000	0,428	0,4282	0,4282	0,4283	0,3395	0,3395	0,3392	0,3394	0,6927	0,6931	0,6932	0,6930	0,5901	0,5910	0,5914	0,5908	0,4576	0,4603	0,4592	0,4590
2500	0,516	0,5164	0,5166	0,5165	0,3726	0,3726	0,3725	0,3726	0,7858	0,7845	0,7852	0,7852	0,7181	0,7209	0,7212	0,7201	0,5284	0,5281	0,5323	0,5296
3150	0,546	0,5464	0,5463	0,5463	0,4760	0,4760	0,4766	0,4762	0,8263	0,8263	0,8256	0,8260	0,7834	0,7842	0,7836	0,7837	0,5703	0,5760	0,5729	0,5731
4000	0,405	0,4045	0,4045	0,4045	0,3713	0,3713	0,3712	0,3713	0,7835	0,7836	0,7814	0,7828	0,6886	0,6865	0,6852	0,6868	0,4976	0,4993	0,4990	0,4986
5000	0,409	0,4092	0,4099	0,4095	0,3507	0,3507	0,3507	0,3507	0,7931	0,7939	0,7916	0,7928	0,7072	0,7061	0,7047	0,7060	0,4895	0,4956	0,4889	0,4913
6300	0,352	0,3520	0,3523	0,3522	0,3381	0,3381	0,3392	0,3385	0,7073	0,7081	0,7023	0,7059	0,6367	0,6317	0,6308	0,6331	0,4742	0,4737	0,4710	0,4730
8000	0,353	0,3526	0,3543	0,3532	0,3273	0,3273	0,3270	0,3272	0,6582	0,6535	0,6518	0,6545	0,5878	0,5824	0,5808	0,5837	0,4717	0,4691	0,4717	0,4709
10000	0,348	0,3491	0,3499	0,3491	0,3528	0,3528	0,3547	0,3535	0,7042	0,7030	0,7001	0,7024	0,6504	0,6417	0,6411	0,6444	0,4974	0,5020	0,4983	0,4992

2

S _B	0,48				0,48				2,16				1,20				0,72			
	PROVA 0 α B				PROVA 0,1 α B				PROVA 1 α B				PROVA 2 α B				PROVA 3 α B			
f	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA
200	0,0431	0,0379	0,0375	0,0395	0,1476	0,1476	0,1378	0,1444	0,0427	0,0427	0,0426	0,0427	0,0803	0,0804	0,0812	0,0806	0,1277	0,1225	0,1285	0,1262
250	0,0269	0,0314	0,0295	0,0293	0,1613	0,1613	0,1583	0,1603	0,0422	0,0427	0,0422	0,0424	0,0671	0,0674	0,0678	0,0674	0,1043	0,1014	0,1053	0,1036
315	0,0195	0,0234	0,0226	0,0218	0,0112	0,0112	0,0097	0,0107	0,0021	0,0015	0,0010	0,0015	0,0119	0,0116	0,0120	0,0118	0,0304	0,0297	0,0273	0,0291
400	0,0788	0,0781	0,0793	0,0787	0,3313	0,3313	0,3292	0,3306	0,0766	0,0761	0,0764	0,0763	0,1568	0,1564	0,1540	0,1557	0,2662	0,2660	0,2660	0,2661
500	0,0131	0,0132	0,0125	0,0129	0,2845	0,2845	0,2807	0,2832	0,1166	0,1172	0,1170	0,1169	0,2153	0,2141	0,2127	0,2140	0,2875	0,2880	0,2880	0,2878
630	0,2114	0,2112	0,2122	0,2116	0,2990	0,2990	0,2993	0,2991	0,1295	0,1296	0,1298	0,1296	0,2214	0,2223	0,2221	0,2219	0,2704	0,2700	0,2707	0,2704
800	0,0563	0,0562	0,0560	0,0562	0,1755	0,1755	0,1795	0,1768	0,1422	0,1417	0,1417	0,1419	0,2516	0,2525	0,2534	0,2525	0,2946	0,2933	0,2958	0,2946
1000	0,4797	0,4800	0,4807	0,4801	0,5765	0,5765	0,5758	0,5763	0,2356	0,2354	0,2353	0,2354	0,3384	0,3376	0,3376	0,3379	0,4132	0,4110	0,4125	0,4122
1250	0,5917	0,5913	0,5917	0,5916	0,5064	0,5064	0,5049	0,5059	0,2709	0,2715	0,2716	0,2713	0,3964	0,3982	0,3987	0,3978	0,5671	0,5664	0,5655	0,5663
1600	0,7603	0,7595	0,7604	0,7600	0,6278	0,6278	0,6280	0,6278	0,2583	0,2577	0,2578	0,2579	0,4071	0,4070	0,4070	0,4071	0,5623	0,5627	0,5623	0,5624
2000	0,8926	0,8920	0,8921	0,8922	0,7072	0,7072	0,7068	0,7070	0,3207	0,3209	0,3209	0,3208	0,4917	0,4925	0,4928	0,4923	0,6355	0,6393	0,6377	0,6375
2500	1,0760	1,0759	1,0762	1,0760	0,7763	0,7763	0,7760	0,7762	0,3638	0,3632	0,3635	0,3635	0,5984	0,6008	0,6010	0,6001	0,7339	0,7335	0,7392	0,7356
3150	1,1378	1,1382	1,1381	1,1381	0,9917	0,9917	0,9928	0,9921	0,3825	0,3825	0,3821	0,3824	0,6528	0,6535	0,6530	0,6531	0,7921	0,8001	0,7957	0,7960
4000	0,8429	0,8427	0,8426	0,8428	0,7736	0,7736	0,7734													

7.2 Prove D1-D4



- 1 Coefficiente di Assorbimento
- 2 Area di Assorbimento equivalente
- 3 Coefficiente di assorbimento di superficie unitaria dei pannelli

1

f	PROVA D1				PROVA D2				PROVA D3				PROVA D4			
	M1	M2	M3	MEDIA												
200	0,026	0,024	0,019	0,023	0,013	0,008	0,001	0,008	0,051	0,042	0,057	0,050	0,062	0,076	0,062	0,067
250	0,036	0,032	0,036	0,034	0,050	0,051	0,051	0,051	0,064	0,062	0,062	0,062	0,082	0,085	0,082	0,083
315	0,024	0,026	0,024	0,025	0,042	0,047	0,044	0,044	0,047	0,045	0,045	0,046	0,039	0,034	0,039	0,037
400	0,169	0,170	0,169	0,169	0,210	0,214	0,212	0,212	0,266	0,265	0,264	0,265	0,289	0,289	0,289	0,289
500	0,214	0,213	0,213	0,213	0,223	0,225	0,225	0,224	0,177	0,179	0,178	0,178	0,117	0,117	0,117	0,117
630	0,277	0,277	0,276	0,277	0,379	0,380	0,379	0,379	0,333	0,331	0,332	0,332	0,180	0,179	0,180	0,179
800	0,316	0,317	0,317	0,317	0,314	0,319	0,318	0,317	0,197	0,201	0,202	0,200	0,173	0,172	0,173	0,173
1000	0,499	0,499	0,497	0,498	0,356	0,355	0,352	0,354	0,616	0,615	0,616	0,616	0,462	0,463	0,462	0,463
1250	0,676	0,678	0,674	0,676	0,497	0,495	0,493	0,495	0,672	0,670	0,672	0,671	0,672	0,674	0,672	0,673
1600	0,542	0,542	0,542	0,542	0,544	0,550	0,549	0,548	0,591	0,590	0,590	0,590	0,663	0,661	0,663	0,662
2000	0,496	0,497	0,496	0,496	0,526	0,529	0,528	0,528	0,679	0,679	0,679	0,679	0,742	0,742	0,742	0,742
2500	0,594	0,594	0,592	0,593	0,644	0,645	0,642	0,644	0,720	0,718	0,719	0,719	0,749	0,749	0,749	0,749
3150	0,699	0,696	0,697	0,697	0,783	0,782	0,782	0,782	0,822	0,823	0,822	0,822	0,874	0,874	0,874	0,874
4000	0,611	0,609	0,610	0,610	0,695	0,684	0,685	0,688	0,716	0,717	0,717	0,717	0,735	0,737	0,735	0,736
5000	0,637	0,636	0,636	0,636	0,729	0,733	0,730	0,730	0,720	0,721	0,720	0,720	0,735	0,738	0,735	0,736
6300	0,576	0,575	0,573	0,575	0,616	0,608	0,607	0,610	0,645	0,644	0,644	0,644	0,715	0,713	0,715	0,714
8000	0,586	0,581	0,582	0,583	0,587	0,586	0,591	0,588	0,656	0,657	0,658	0,657	0,714	0,716	0,714	0,714
10000	0,578	0,576	0,578	0,577	0,669	0,678	0,676	0,674	0,705	0,707	0,706	0,706	0,789	0,793	0,789	0,790

2

f	PROVA D1				PROVA D2				PROVA D3				PROVA D4			
	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA	M1	M2	M3	MEDIA
200	0,012	0,012	0,009	0,011	0,0062	0,0040	0,0006	0,004	0,0245	0,0199	0,0272	0,024	0,0298	0,0364	0,0298	0,032
250	0,017	0,015	0,017	0,017	0,0240	0,0243	0,0245	0,024	0,0305	0,0296	0,0298	0,030	0,0392	0,0410	0,0392	0,040
315	0,012	0,012	0,012	0,012	0,0202	0,0225	0,0209	0,021	0,0225	0,0218	0,0218	0,022	0,0186	0,0161	0,0186	0,018
400	0,081	0,082	0,081	0,081	0,1006	0,1025	0,1016	0,102	0,1276	0,1273	0,1269	0,127	0,1386	0,1388	0,1386	0,139
500	0,103	0,102	0,102	0,102	0,1073	0,1079	0,1078	0,108	0,0849	0,0859	0,0852	0,085	0,0563	0,0562	0,0563	0,056
630	0,133	0,133	0,132	0,133	0,1821	0,1826	0,1817	0,182	0,1599	0,1587	0,1594	0,159	0,0862	0,0859	0,0862	0,086
800	0,152	0,152	0,152	0,152	0,1508	0,1531	0,1527	0,152	0,0948	0,0962	0,0969	0,096	0,0831	0,0826	0,0831	0,083
1000	0,239	0,239	0,239	0,239	0,1710	0,1702	0,1689	0,170	0,2957	0,2954	0,2956	0,296	0,2220	0,2225	0,2220	0,222
1250	0,325	0,325	0,324	0,325	0,2387	0,2376	0,2366	0,238	0,3225	0,3217	0,3224	0,322	0,3226	0,3233	0,3226	0,323
1600	0,260	0,260	0,260	0,260	0,2613	0,2639	0,2634	0,263	0,2837	0,2833	0,2832	0,283	0,3180	0,3172	0,3180	0,318
2000	0,238	0,238	0,238	0,238	0,2524	0,2539	0,2534	0,253	0,3259	0,3260	0,3258	0,326	0,3561	0,3561	0,3561	0,356
2500	0,285	0,285	0,284	0,285	0,3091	0,3097	0,3080	0,309	0,3455	0,3447	0,3452	0,345	0,3597	0,3594	0,3597	0,360
3150	0,336	0,334	0,335	0,335	0,3758	0,3752	0,3755	0,375	0,3945	0,3951	0,3944	0,395	0,4197	0,4197	0,4197	0,420
4000	0,293	0,292	0,293	0,293	0,3338	0,3284	0,3287	0,330	0,3438	0,3441	0,3440	0,344	0,3527	0,3538	0,3527	0,353
5000	0,306	0,305	0,305	0,305	0,3497	0,3517	0,3503	0,351	0,3455	0,3460	0,3456	0,346	0,3530	0,3541	0,3530	0,353
6300	0,277	0,276	0,275	0,276	0,2955	0,2920	0,2914	0,293	0,3098	0,3091	0,3090	0,309	0,3433	0,3421	0,3433	0,343
8000	0,281	0,279	0,280	0,280	0,2816	0,2812	0,2837	0,282	0,3148	0,3155	0,3159	0,315	0,3425	0,3438	0,3425	0,343
10000	0,277	0,277	0,277	0,277	0,3209	0,3254	0,3247	0,324	0,3385	0,3396	0,3388	0,339	0,3786	0,3806	0,3786	0,379
	0,10				0,20				0,30				0,40			

3

f	PROVA D1				PROVA D2				PROVA D3				PROVA D4			
	M1	M2	M3	MEDIA												
200	0,0260	0,0241	0,0187	0,023	0,0129	0,0083	0,0012	0,008	0,0511	0,0415	0,0566	0,050	0,0621	0,0759	0,0621	0,067
250	0,0361	0,0316	0,0357	0,034	0,0500	0,0505	0,0511	0,051	0,0636	0,0616	0,0621	0,062	0,0816	0,0855	0,0816	0,083
315	0,0245	0,0255	0,0242	0,025	0,0420	0,0468	0,0436	0,044	0,0469	0,0454	0,0453	0,046	0,0388	0,0335	0,0388	0,037
400	0,1689	0,1699	0,1695	0,169	0,2096	0,2136	0,2116	0,212	0,2658	0,2652	0,2643	0,265	0,2887	0,2892	0,2887	0,289
500	0,2140	0,2128	0,2132	0,213	0,2235	0,2248	0,2247	0,224	0,1768	0,1790	0,1775	0,178	0,1174	0,1172	0,1174	0,117
630	0,2769	0,2768	0,2759	0,277	0,3793	0,3804	0,3786	0,379	0,3330	0,3307	0,3322	0,332	0,1795	0,1789	0,1795	0,179
800	0,3163	0,3165	0,3173	0,317	0,3141	0,3189	0,3182	0,317	0,1975	0,2005	0,2019	0,200	0,1731	0,1722	0,1731	0,173
1000	0,4985	0,4988	0,4970	0,498	0,3563	0,3545	0,3519	0,354	0,6160	0,6155	0,6157	0,616	0,4625	0,4634	0,4625	0,463
1250	0,6763	0,6776	0,6744	0,676	0,4972	0,4951	0,4928	0,495	0,6719	0,6702	0,6716	0,671	0,6722	0,6735	0,6722	0,673
1600	0,5424	0,5417	0,5420	0,542	0,5443	0,5497	0,5488	0,548	0,5910	0,5902	0,5900	0,590	0,6625	0,6609	0,6625	0,662
2000	0,4962	0,4967	0,4962	0,496	0,5258	0,5290	0,5280	0,528	0,6791	0,6792	0,6787	0,679	0,7420	0,7418	0,7420	0,742
2500	0,5935	0,5942	0,5917	0,593	0,6440	0,6452	0,6416	0,644	0,7198	0,7182	0,7191	0,719	0,7494	0,7488	0,7494	0,749
3150	0,6991	0,6962	0,6969	0,697	0,7829	0,7816	0,7824	0,782	0,8219	0,8230	0,8216	0,822	0,8744	0,8745	0,8744	0,874
4000	0,6109	0,6090	0,6098	0,610	0,6954	0,6842	0,6848	0,688	0,7163	0,7170	0,7167	0,717	0,7348	0,7371	0,7348	0,736
5000	0,6374	0,6356	0,6362	0,636	0,7285	0,7327	0,7298	0,730	0,7197	0,7208	0,7201	0,720	0,7355	0,7378	0,7355	0,736
6300	0,5764	0,5751	0,5733	0,575	0,6156	0,6082	0,6071	0,610	0,6453	0,6440	0,6437	0,644	0,7151	0,7127	0,7151	0,714
8000	0,5855	0,5805	0,5823	0,583	0,5867	0,5857	0,5910	0,588	0,6559	0,6573	0,6582	0,657	0,7136	0,7162	0,7136	0,714
10000	0,5779	0,5765	0,5781	0,577	0,6686	0,6780	0,6765	0,674	0,7051	0,7074	0,7058	0,706	0,7888	0,7930	0,7888	0,790

7.3.1.1 Prove A, coefficienti assorbimento modulo

1

f	0,0925	0,1025	0,1125	0,1225	0,1325	0,1425	0,1525	0,1625	0,1725	0,1825	0,1925	0,2025	0,2125	0,2225	0,2325	0,2425	0,2525	0,2625	0,2725	0,2825	0,2925	0,3025	0,3125	0,3225	0,3325	0,3425	0,3525	0,3625	0,3725
	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22	A23	A24	A25	A26	A27	A28
200	0,557	0,050	0,055	0,002	0,077	0,034	0,109	0,009	0,027	0,277	0,064	0,048	0,066	0,006	0,038	0,091	0,018	0,057	0,194	0,005	0,072	0,078	0,003	0,090	0,087	0,009	0,090	0,122	0,058
250	0,095	0,042	0,008	0,060	0,004	0,040	0,053	0,033	0,042	0,033	0,008	0,065	0,022	0,044	0,053	0,060	0,046	0,051	0,023	0,010	0,054	0,024	0,004	0,068	0,066	0,010	0,061	0,075	0,041
315	0,301	0,421	0,376	0,213	0,310	0,303	0,185	0,263	0,260	0,187	0,218	0,216	0,181	0,197	0,175	0,134	0,164	0,165	0,149	0,156	0,158	0,140	0,153	0,127	0,123	0,141	0,127	0,126	0,121
400	0,760	0,752	0,668	0,572	0,665	0,599	0,533	0,617	0,550	0,483	0,575	0,511	0,446	0,491	0,462	0,383	0,445	0,406	0,376	0,408	0,380	0,359	0,391	0,374	0,363	0,363	0,342	0,331	0,314
500	1,239	1,140	1,013	0,901	0,920	0,801	0,750	0,701	0,609	0,569	0,519	0,468	0,405	0,430	0,377	0,329	0,351	0,331	0,307	0,306	0,295	0,267	0,277	0,280	0,271	0,263	0,265	0,274	0,261
630	1,334	1,204	1,106	1,132	1,020	0,950	0,974	0,893	0,819	0,834	0,762	0,678	0,700	0,630	0,595	0,583	0,555	0,513	0,512	0,497	0,445	0,455	0,426	0,380	0,368	0,365	0,320	0,340	0,313
800	1,627	0,758	0,645	0,767	0,628	0,535	0,741	0,546	0,478	0,645	0,389	0,400	0,490	0,248	0,265	0,409	0,174	0,400	0,261	0,114	0,150	0,230	0,153	0,150	0,145	0,151	0,175	0,198	0,213
1000	2,523	1,631	1,501	1,456	1,192	1,013	0,984	0,809	0,693	0,679	0,523	0,520	0,715	0,545	0,612	0,827	0,690	0,706	0,836	0,716	0,719	0,751	0,638	0,600	0,582	0,460	0,442	0,377	0,372
1250	3,228	2,228	1,942	1,673	1,093	1,081	1,095	0,810	0,898	0,912	0,798	0,890	0,925	0,870	0,910	1,040	0,897	0,921	0,933	0,809	0,852	0,817	0,695	0,702	0,681	0,627	0,649	0,657	0,605
1600	3,345	1,960	1,797	1,851	1,453	1,477	1,437	1,109	1,142	1,213	0,933	1,020	1,030	0,852	0,865	0,903	0,783	0,826	0,829	0,700	0,712	0,722	0,637	0,670	0,650	0,620	0,599	0,575	0,548
2000	2,995	1,875	1,853	1,805	1,623	1,524	1,461	1,167	1,201	1,252	1,080	1,158	1,191	1,124	1,135	1,098	0,921	1,158	0,985	0,790	0,821	0,799	0,737	0,771	0,748	0,655	0,711	0,751	0,664
2500	3,126	2,052	1,785	1,931	1,559	1,479	1,609	1,381	1,209	1,374	1,064	1,027	1,191	0,998	0,987	1,172	1,005	0,883	0,972	0,816	0,787	0,952	0,768	0,767	0,744	0,755	0,725	0,702	0,662
3150	3,030	2,215	2,170	2,034	1,772	1,796	1,664	1,507	1,497	1,541	1,354	1,406	1,467	1,337	1,236	1,255	1,027	1,100	1,099	1,077	1,108	1,087	0,890	0,872	0,846	0,771	0,841	0,886	0,789
4000	2,722	2,422	2,338	2,003	1,925	1,744	1,746	1,649	1,599	1,609	1,437	1,324	1,365	1,258	1,178	1,208	1,123	1,179	1,111	1,029	0,945	1,016	0,949	0,938	0,910	0,792	0,859	0,824	0,852
5000	3,042	2,676	2,416	2,199	2,076	2,024	1,843	1,729	1,717	1,466	1,580	1,514	1,319	1,343	1,268	1,132	1,269	1,514	1,236	1,057	1,081	1,020	0,975	0,970	0,941	0,970	0,858	0,838	0,892
6300	2,999	2,759	2,679	2,013	2,207	2,175	1,808	1,779	1,888	1,514	1,540	1,523	1,203	1,247	1,316	1,113	1,110	1,143	1,014	1,077	1,043	0,912	0,966	0,888	0,862	0,834	0,819	0,826	0,759
8000	2,591	2,738	2,421	2,127	2,135	2,061	1,810	1,716	1,844	1,504	1,654	1,625	1,442	1,495	1,415	1,247	1,303	1,176	1,065	1,109	1,048	0,982	1,073	0,956	0,928	0,994	0,870	0,829	0,879
10000	3,401	2,709	2,445	2,036	2,340	2,031	1,733	1,923	1,740	1,445	1,720	1,416	1,311	1,506	1,424	1,217	1,320	1,248	1,185	1,181	1,212	1,021	1,092	1,107	1,073	0,949	1,006	0,877	0,936
a'	0,463	0,513	0,563	0,613	0,663	0,713	0,763	0,813	0,863	0,913	0,963	1,013	1,063	1,113	1,163	1,213	1,263	1,313	1,363	1,413	1,463	1,513	1,563	1,613	1,663	1,713	1,763	1,813	1,863
Area Sistema	0,111	0,123	0,135	0,147	0,159	0,171	0,183	0,195	0,207	0,219	0,231	0,243	0,255	0,267	0,279	0,291	0,303	0,315	0,327	0,339	0,351	0,363	0,375	0,387	0,399	0,411	0,423	0,435	0,447

2

f	0,0925	0,1025	0,1125	0,1225	0,1325	0,1425	0,1525	0,1625	0,1725	0,1825	0,1925	0,2025	0,2125	0,2225	0,2325	0,2425	0,2525	0,2625	0,2725	0,2825	0,2925	0,3025	0,3125	0,3225	0,3325	0,3425	0,3525	0,3625	0,3725
	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22	A23	A24	A25	A26	A27	A28
250	0,095	0,042	0,008	0,060	0,004	0,040	0,053	0,033	0,042	0,033	0,008	0,065	0,022	0,044	0,053	0,060	0,046	0,051	0,023	0,010	0,054	0,024	0,004	0,068	0,066	0,010	0,061	0,075	0,041
500	1,111	1,032	0,929	0,868	0,868	0,783	0,752	0,737	0,660	0,629	0,618	0,552	0,517	0,517	0,478	0,431	0,450	0,417	0,398	0,403	0,374	0,360	0,365	0,345	0,334	0,330	0,309	0,315	0,296
1000	2,459	1,539	1,362	1,299	0,971	0,876	0,940	0,722	0,690	0,746	0,570	0,603	0,710	0,554	0,596	0,758	0,587	0,597	0,677	0,547	0,573	0,599	0,495	0,484	0,469	0,413	0,422	0,410	0,397
2000	3,156	1,962	1,811	1,862	1,545	1,493	1,502	1,219	1,184	1,279	1,026	1,068	1,137	0,991	0,996	1,058	0,903	0,875	0,929	0,768	0,773	0,825	0,714	0,736	0,714	0,677	0,679	0,676	0,625
4000	2,931	2,438	2,308	2,079	1,924	1,855	1,751	1,628	1,604	1,539	1,447	1,415	1,383	1,313	1,228	1,198	1,139	1,172	1,089	1,062	1,025	1,026	0,953	0,927	0,899	0,844	0,852	0,849	0,844
8000	2,997	2,735	2,515	2,059	2,227	2,089	1,783	1,806	1,824	1,488	1,638	1,521	1,319	1,416	1,385	1,192	1,244	1,189	1,088	1,122	1,101	0,972	1,043	0,984	0,954	0,925	0,898	0,844	0,858
a'	0,463	0,513	0,563	0,613	0,663	0,713	0,763	0,813	0,863	0,913	0,963	1,013	1,063	1,113	1,163	1,213	1,263	1,313	1,363	1,413	1,463	1,513	1,563	1,613	1,663	1,713	1,763	1,813	1,863

- 1 Coefficiente di Assorbimento di modulo
- 2 Coefficiente di Assorbimento di modulo in bande di ottava

7.3.2 Prove B

0,15		0,0925															0,1625															0,3725														
r	B0,1	B0,2	B0,3	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15	B16	B17	B18	B19	B20	B21	B22	B23	B24	B25	B26	B27	B28	B29														
200	0,118	0,142	0,166	0,191	0,216	0,241	0,266	0,291	0,316	0,341	0,366	0,391	0,416	0,441	0,466	0,491	0,516	0,541	0,566	0,591	0,616	0,641	0,666	0,691	0,716	0,741	0,766	0,791	0,816	0,841	0,866	0,891	0,916	0,941	0,966	0,991										
250	0,081	0,105	0,129	0,153	0,177	0,201	0,225	0,249	0,273	0,297	0,321	0,345	0,369	0,393	0,417	0,441	0,465	0,489	0,513	0,537	0,561	0,585	0,609	0,633	0,657	0,681	0,705	0,729	0,753	0,777	0,801	0,825	0,849	0,873	0,897	0,921	0,945									
315	0,101	0,125	0,149	0,173	0,197	0,221	0,245	0,269	0,293	0,317	0,341	0,365	0,389	0,413	0,437	0,461	0,485	0,509	0,533	0,557	0,581	0,605	0,629	0,653	0,677	0,701	0,725	0,749	0,773	0,797	0,821	0,845	0,869	0,893	0,917	0,941	0,965									
400	0,269	0,317	0,365	0,413	0,461	0,509	0,557	0,605	0,653	0,701	0,749	0,797	0,845	0,893	0,941	0,989	1,037	1,085	1,133	1,181	1,229	1,277	1,325	1,373	1,421	1,469	1,517	1,565	1,613	1,661	1,709	1,757	1,805	1,853	1,901	1,949	1,997									
500	0,343	0,410	0,477	0,544	0,611	0,678	0,745	0,812	0,879	0,946	1,013	1,080	1,147	1,214	1,281	1,348	1,415	1,482	1,549	1,616	1,683	1,750	1,817	1,884	1,951	2,018	2,085	2,152	2,219	2,286	2,353	2,420	2,487	2,554	2,621	2,688	2,755									
630	0,275	0,332	0,389	0,446	0,503	0,560	0,617	0,674	0,731	0,788	0,845	0,902	0,959	1,016	1,073	1,130	1,187	1,244	1,301	1,358	1,415	1,472	1,529	1,586	1,643	1,700	1,757	1,814	1,871	1,928	1,985	2,042	2,099	2,156	2,213	2,270	2,327									
800	0,230	0,287	0,344	0,401	0,458	0,515	0,572	0,629	0,686	0,743	0,800	0,857	0,914	0,971	1,028	1,085	1,142	1,200	1,257	1,314	1,371	1,428	1,485	1,542	1,600	1,657	1,714	1,771	1,828	1,885	1,942	2,000	2,057	2,114	2,171	2,228	2,285									
1000	0,346	0,403	0,460	0,517	0,574	0,631	0,688	0,745	0,802	0,859	0,916	0,973	1,030	1,087	1,144	1,201	1,258	1,315	1,372	1,429	1,486	1,543	1,600	1,657	1,714	1,771	1,828	1,885	1,942	2,000	2,057	2,114	2,171	2,228	2,285	2,342	2,399									
1250	0,493	0,550	0,607	0,664	0,721	0,778	0,835	0,892	0,949	1,006	1,063	1,120	1,177	1,234	1,291	1,348	1,405	1,462	1,519	1,576	1,633	1,690	1,747	1,804	1,861	1,918	1,975	2,032	2,089	2,146	2,203	2,260	2,317	2,374	2,431	2,488	2,545									
1600	0,396	0,453	0,510	0,567	0,624	0,681	0,738	0,795	0,852	0,909	0,966	1,023	1,080	1,137	1,194	1,251	1,308	1,365	1,422	1,479	1,536	1,593	1,650	1,707	1,764	1,821	1,878	1,935	1,992	2,049	2,106	2,163	2,220	2,277	2,334	2,391	2,448									
2000	0,476	0,533	0,590	0,647	0,704	0,761	0,818	0,875	0,932	0,989	1,046	1,103	1,160	1,217	1,274	1,331	1,388	1,445	1,502	1,559	1,616	1,673	1,730	1,787	1,844	1,901	1,958	2,015	2,072	2,129	2,186	2,243	2,300	2,357	2,414	2,471										
2500	0,529	0,586	0,643	0,700	0,757	0,814	0,871	0,928	0,985	1,042	1,100	1,157	1,214	1,271	1,328	1,385	1,442	1,500	1,557	1,614	1,671	1,728	1,785	1,842	1,900	1,957	2,014	2,071	2,128	2,185	2,242	2,300	2,357	2,414	2,471	2,528	2,585									
3150	0,716	0,773	0,830	0,887	0,944	1,001	1,058	1,115	1,172	1,229	1,286	1,343	1,400	1,457	1,514	1,571	1,628	1,685	1,742	1,800	1,857	1,914	1,971	2,028	2,085	2,142	2,200	2,257	2,314	2,371	2,428	2,485	2,542	2,600	2,657	2,714	2,771									
4000	0,490	0,547	0,604	0,661	0,718	0,775	0,832	0,889	0,946	1,003	1,060	1,117	1,174	1,231	1,288	1,345	1,402	1,459	1,516	1,573	1,630	1,687	1,744	1,801	1,858	1,915	1,972	2,029	2,086	2,143	2,200	2,257	2,314	2,371	2,428	2,485	2,542									
5000	0,564	0,621	0,678	0,735	0,792	0,849	0,906	0,963	1,020	1,077	1,134	1,191	1,248	1,305	1,362	1,419	1,476	1,533	1,590	1,647	1,704	1,761	1,818	1,875	1,932	1,989	2,046	2,103	2,160	2,217	2,274	2,331	2,388	2,445	2,502	2,559	2,616									
6300	0,520	0,577	0,634	0,691	0,748	0,805	0,862	0,919	0,976	1,033	1,090	1,147	1,204	1,261	1,318	1,375	1,432	1,489	1,546	1,603	1,660	1,717	1,774	1,831	1,888	1,945	2,002	2,059	2,116	2,173	2,230	2,287	2,344	2,401	2,458	2,515	2,572									
8000	0,535	0,592	0,649	0,706	0,763	0,820	0,877	0,934	0,991	1,048	1,105	1,162	1,219	1,276	1,333	1,390	1,447	1,504	1,561	1,618	1,675	1,732	1,789	1,846	1,903	1,960	2,017	2,074	2,131	2,188	2,245	2,302	2,359	2,416	2,473	2,530	2,587									
10000	0,599	0,656	0,713	0,770	0,827	0,884	0,941	0,998	1,055	1,112	1,169	1,226	1,283	1,340	1,397	1,454	1,511	1,568	1,625	1,682	1,739	1,796	1,853	1,910	1,967	2,024	2,081	2,138	2,195	2,252	2,309	2,366	2,423	2,480	2,537	2,594	2,651									
a	0,463	0,513	0,563	0,613	0,663	0,713	0,763	0,813	0,863	0,913	0,963	1,013	1,063	1,113	1,163	1,213	1,263	1,313	1,363	1,413	1,463	1,513	1,563	1,613	1,663	1,713	1,763	1,813	1,863	1,913	1,963	2,013	2,063	2,113	2,163											

0,48		0,0925															0,1625															0,3725														
r	B0,1	B0,2	B0,3	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15	B16	B17	B18	B19	B20	B21	B22	B23	B24	B25	B26	B27	B28	B29														
200	0,057	0,068	0,080	0,092	0,104	0,116	0,128	0,140	0,152	0,164	0,176	0,188	0,200	0,212	0,224	0,236	0,248	0,260	0,272	0,284	0,296	0,308	0,320	0,332	0,344	0,356	0,368	0,380	0,392	0,404	0,416	0,428	0,440	0,452	0,464	0,476	0,488									
250	0,039	0,048	0,057	0,066	0,075	0,084	0,093	0,102	0,111	0,120	0,129	0,138	0,147	0,156	0,165	0,174	0,183	0,192	0,201	0,210	0,219	0,228	0,237	0,246	0,255	0,264	0,273	0,282	0,291	0,300	0,309	0,318	0,327	0,336	0,345	0,354	0,363									
315	0,048	0,057	0,066	0,075	0,084	0,093	0,102	0,111	0,120	0,129	0,138	0,147	0,156	0,165	0,174	0,183	0,192	0,201	0,210	0,219	0,228	0,237	0,246	0,255	0,264	0,273	0,282	0,291	0,300	0,309	0,318	0,327	0,336	0,345	0,354	0,363	0,372									
400	0,129	0,152	0,175	0,198	0,221	0,244	0,267	0,290	0,313	0,336	0,359	0,382	0,405	0,428	0,451	0,474	0,497	0,520	0,543	0,566	0,589	0,612	0,635	0,658	0,681	0,704	0,727	0,750	0,773	0,796	0,819	0,842	0,865	0,888	0,911	0,934	0,957									
500	0,133	0,156	0,179	0,202	0,225	0,248	0,271	0,294	0,317	0,340	0,363	0,386	0,409	0,432	0,455	0,478	0,501	0,524	0,547	0,570	0,593	0,616	0,639	0,662	0,685	0,708	0,731	0,754	0,777	0,800	0,823	0,846	0,869	0,892	0,915	0,938										
630	0,132	0,155	0,178	0,201	0,224	0,247	0,270	0,293	0,316	0,339	0,362	0,385	0,408	0,431	0,454	0,477	0,500	0,523	0,546	0,569	0,592	0,615	0,638	0,661	0,684	0,707	0,730	0,753	0,776	0,799	0,822	0,845	0,868	0,891	0,914	0,937										
800	0,110	0,133	0,156	0,179	0,202	0,225	0,248	0,271	0,294	0,317	0,340	0,363	0,386	0,409	0,432	0,455	0,478	0,501	0,524	0,547	0,570	0,593	0,616	0,639	0,662	0,685	0,708	0,731	0,754	0,777	0,800	0,823	0,846	0,869	0,892	0,915	0,938									
1000	0,166	0,189	0,212	0,235	0,258	0,281	0,304	0,327	0,350	0,373	0,396	0,419	0,442	0,465	0,488	0,511	0,534	0,557	0,580	0,603	0,626	0,649	0,672	0,695	0,718	0,741	0,764	0,787	0,810	0,833	0,856	0,879	0,902	0,925	0,948	0,971										
1250	0,200	0,223	0,246	0,269	0,292	0,315	0,338	0,361	0,384	0,407	0,430	0,453	0,476	0,499	0,522	0,545	0,568	0,591	0,614																											

7.3.3 Prove C

b=				0,10																												
f	C0,1	C0,2	C0,3	0,0925																												
				C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27	C28	C29
200	0,024	0,009	0,036	0,022	0,047	0,005	0,008	0,048	0,005	0,040	0,058	0,008	0,069	0,052	0,006	NaN	0,052	0,005	0,001	0,044	0,003	0,095	0,044	0,030	0,014	0,030	0,000	0,002	0,024	0,009	0,009	0,045
250	0,024	0,025	0,038	0,005	0,034	0,008	0,001	0,031	0,011	0,003	0,035	0,011	0,003	0,034	0,010	0,008	0,030	0,013	0,003	0,031	0,013	0,006	0,021	0,009	0,007	0,028	0,010	0,012	0,020	0,013	0,013	0,035
315	0,078	0,068	0,074	0,065	0,093	0,083	0,058	0,108	0,085	0,068	0,092	0,083	0,059	0,105	0,079	0,085	0,102	0,085	0,063	0,101	0,081	0,061	0,101	0,081	0,061	0,101	0,081	0,061	0,101	0,081	0,061	0,106
400	0,158	0,157	0,171	0,056	0,090	0,090	0,066	0,093	0,102	0,071	0,098	0,106	0,076	0,102	0,118	0,087	0,115	0,122	0,090	0,126	0,134	0,101	0,149	0,144	0,103	0,147	0,144	0,146	0,155	0,148	0,148	0,146
500	0,189	0,175	0,187	0,093	0,103	0,109	0,096	0,113	0,119	0,109	0,124	0,119	0,099	0,130	0,129	0,103	0,151	0,141	0,126	0,162	0,153	0,131	0,186	0,156	0,133	0,171	0,145	0,133	0,171	0,124	0,124	0,138
630	0,226	0,254	0,216	0,180	0,166	0,191	0,210	0,185	0,220	0,243	0,218	0,233	0,252	0,222	0,230	0,249	0,211	0,213	0,216	0,184	0,192	0,207	0,157	0,172	0,196	0,137	0,162	0,154	0,131	0,164	0,164	0,151
800	0,092	0,114	0,161	0,168	0,057	0,096	0,212	0,079	0,135	0,214	0,088	0,096	0,176	0,047	0,050	0,131	0,003	0,004	0,086	0,032	0,019	0,059	0,038	0,027	0,045	0,035	0,021	0,008	0,010	0,013	0,013	0,038
1000	0,274	0,350	0,301	0,192	0,287	0,286	0,260	0,242	0,241	0,228	0,192	0,214	0,214	0,192	0,230	0,272	0,223	0,273	0,304	0,298	0,341	0,375	0,386	0,392	0,393	0,372	0,348	0,325	0,305	0,281	0,281	0,231
1250	0,408	0,340	0,364	0,389	0,342	0,364	0,352	0,268	0,303	0,315	0,266	0,309	0,336	0,307	0,347	0,383	0,348	0,382	0,407	0,347	0,396	0,394	0,354	0,391	0,400	0,370	0,409	0,416	0,385	0,422	0,422	0,415
1600	0,322	0,354	0,423	0,412	0,318	0,269	0,379	0,309	0,315	0,403	0,336	0,358	0,426	0,346	0,435	0,418	0,341	0,327	0,414	0,375	0,375	0,432	0,348	0,347	0,418	0,338	0,335	0,328	0,368	0,340	0,340	0,350
2000	0,354	0,372	0,404	0,343	0,332	0,304	0,337	0,318	0,300	0,369	0,294	0,282	0,388	0,332	0,321	0,391	0,350	0,309	0,354	0,323	0,278	0,371	0,326	0,293	0,345	0,332	0,317	0,300	0,341	0,272	0,272	0,336
2500	0,405	0,397	0,370	0,407	0,323	0,333	0,366	0,309	0,340	0,385	0,347	0,354	0,403	0,318	0,336	0,361	0,325	0,367	0,410	0,362	0,379	0,384	0,296	0,316	0,376	0,329	0,379	0,398	0,389	0,370	0,370	0,403
3150	0,551	0,507	0,489	0,490	0,379	0,423	0,480	0,353	0,426	0,494	0,407	0,461	0,523	0,387	0,442	0,519	0,438	0,468	0,537	0,431	0,467	0,517	0,396	0,454	0,570	0,441	0,483	0,457	0,414	0,457	0,457	0,428
4000	0,445	0,364	0,391	0,393	0,339	0,306	0,386	0,336	0,296	0,391	0,363	0,344	0,451	0,383	0,305	0,402	0,335	0,306	0,435	0,329	0,326	0,459	0,397	0,363	0,474	0,338	0,340	0,321	0,371	0,369	0,369	0,371
5000	0,467	0,460	0,504	0,403	0,417	0,412	0,407	0,448	0,460	0,424	0,442	0,475	0,438	0,429	0,475	0,474	0,539	0,463	0,435	0,525	0,512	0,447	0,484	0,460	0,456	0,451	0,447	0,462	0,488	0,499	0,499	0,478
6300	0,379	0,412	0,393	0,341	0,343	0,386	0,372	0,391	0,404	0,383	0,403	0,468	0,381	0,426	0,454	0,398	0,458	0,471	0,383	0,492	0,495	0,396	0,439	0,437	0,407	0,454	0,426	0,411	0,409	0,445	0,445	0,393
8000	0,451	0,378	0,401	0,264	0,349	0,371	0,264	0,358	0,403	0,290	0,366	0,378	0,322	0,416	0,413	0,329	0,400	0,435	0,318	0,426	0,432	0,330	0,423	0,407	0,317	0,383	0,428	0,425	0,459	0,444	0,444	0,448
10000	0,463	0,486	0,469	0,280	0,336	0,366	0,312	0,358	0,393	0,236	0,362	0,404	0,228	0,364	0,398	0,264	0,407	0,414	0,280	0,439	0,426	0,321	0,394	0,418	0,329	0,405	0,433	0,433	0,457	0,456	0,456	0,492
a				0,463	0,513	0,563	0,613	0,663	0,713	0,763	0,813	0,863	0,913	0,963	1,013	1,063	1,113	1,163	1,213	1,263	1,313	1,363	1,413	1,463	1,513	1,563	1,613	1,663	1,713	1,763	1,813	1,863

0,48				0,48																												
f	C0,1	C0,2	C0,3	0,0925																												
				C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27	C28	C29
200	0,011	0,004	0,018	0,010	0,022	0,002	0,004	0,023	0,002	0,019	0,028	0,004	0,033	0,025	0,003	#####	0,025	0,002	0,000	0,021	0,001	0,046	0,021	0,002	0,007	0,014	0,000	0,001	0,012	0,004	0,004	0,022
250	0,011	0,012	0,018	0,003	0,016	0,004	0,001	0,013	0,005	0,002	0,017	0,005	0,002	0,016	0,005	0,004	0,014	0,006	0,001	0,015	0,006	0,003	0,010	0,004	0,003	0,013	0,003	0,006	0,010	0,006	0,006	0,017
315	0,037	0,033	0,035	0,031	0,045	0,040	0,028	0,052	0,041	0,033	0,044	0,040	0,028	0,050	0,038	0,031	0,049	0,041	0,030	0,048	0,039	0,029	0,049	0,040	0,030	0,049	0,042	0,038	0,051	0,041	0,041	0,051
400	0,076	0,075	0,082	0,027	0,043	0,043	0,032	0,044	0,049	0,034	0,047	0,051	0,037	0,049	0,057	0,042	0,055	0,059	0,043	0,060	0,064	0,049	0,071	0,069	0,050	0,071	0,069	0,070	0,075	0,071	0,071	0,070
500	0,091	0,084	0,090	0,045	0,050	0,052	0,046	0,054	0,057	0,048	0,059	0,057	0,048	0,063	0,062	0,049	0,072	0,068	0,056	0,078	0,074	0,063	0,089	0,075	0,064	0,082	0,070	0,064	0,082	0,060	0,060	0,066
630	0,109	0,122	0,104	0,087	0,080	0,092	0,101	0,089	0,106	0,117	0,105	0,112	0,121	0,107	0,111	0,120	0,101	0,102	0,110	0,089	0,092	0,100	0,076	0,083	0,094	0,066	0,078	0,074	0,063	0,079	0,079	0,072
800	0,044	0,055	0,077	0,081	0,027	0,046	0,102	0,038	0,065	0,103	0,042	0,046	0,085	0,023	0,024	0,063	0,001	0,002	0,041	0,015	0,009	0,028	0,018	0,012	0,021	0,017	0,010	0,004	0,005	0,006	0,006	0,012
1000	0,132	0,168	0,145	0,133	0,138	0,137	0,125	0,116	0,116	0,109	0,092	0,103	0,103	0,092	0,111	0,130	0,107	0,131	0,146	0,143	0,164	0,180	0,185	0,188	0,189	0,179	0,167	0,156	0,146	0,135	0,135	0,111
1250	0,196	0,176	0,196	0,187	0,164	0,175	0,169	0,128	0,146	0,151	0,127	0,148	0,161	0,147	0,166	0,184	0,167	0,183	0,196	0,167	0,190	0,189	0,170	0,188	0,192	0,178	0,196	0,200	0,185	0,203	0,203	0,199
1600	0,155	0,170	0,203	0,198	0,152	0,129	0,182	0,149	0,151	0,193	0,161	0,172	0,205	0,166	0,166	0,201	0,164	0,157	0,199	0,180	0,180	0,207	0,167	0,167	0,201	0,162	0,161	0,157	0,177	0,163	0,163	0,168
2000	0,170	0,178	0,194	0,165	0,159	0,146	0,162	0,153	0,144	0,177	0,141	0,135	0,186	0,159	0,154	0,188	0,168	0,148	0,170	0,155	0,133	0,178	0,156	0,141	0,166	0,159	0,152	0,144	0,164	0,130	0,130	0,161
2500	0,194	0,178	0,178	0,195	0,155	0,160	0,176	0,149	0,163	0,185	0,163	0,170	0,193	0,153	0,161	0,173	0,184	0,156	0,176	0,197	0,174	0,182	0,184	0,142	0,152	0,180	0,158	0,182	0,191	0,187	0,178	0,145
3150	0,265	0,243	0,235	0,235	0,182	0,203	0,230	0,169	0,204	0,237	0,196	0,221	0,251	0,186	0,212	0,249	0,210	0,225	0,258	0,207	0,224	0,248	0,190	0,218	0,274	0,212	0,232	0,220	0,199	0,219	0,219	0,205
4000	0,195	0,213	0,188	0,188	0,163	0,147	0,185	0,166	0,142	0,188	0,174	0,165	0,217	0,184	0,146	0,146	0,161	0,147	0,209	0,158	0,157	0,220	0,191	0,174	0,228	0,162	0,163	0,154	0,178	0,177	0,178	0,178
5000	0,224	0,221	0,242	0,193	0,200	0,198	0,195	0,215	0,221	0,204	0,212	0,228	0,210	0,206	0,228	0,228	0,259	0,222	0,209	0,252	0,246	0,214	0,232	0,221	0,219	0,216	0,215	0,222	0,234	0,240	0,240	0,229
6300	0,182	0,198	0,189	0,164	0,165	0,185	0,179	0,188	0,194	0,184	0,193	0,225	0,183	0,204	0,218	0,191	0,220	0,226	0,184	0,236	0,238	0,190	0,211	0,210	0,196	0,218	0,204	0,197	0,196	0,213	0,213	0,189

7.3.3.1 Prove C, coefficienti assorbimento modulo

1

f	0,0925	0,1025	0,1125	0,1225	0,1325	0,1425	0,1525	0,1625	0,1725	0,1825	0,1925	0,2025	0,2125	0,2225	0,2325	0,2425	0,2525	0,2625	0,2725	0,2825	0,2925	0,3025	0,3125	0,3225	0,3325	0,3425	0,3525	0,3625	0,3725
f	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27	C28
200	0,094	0,183	0,017	0,027	0,146	0,014	0,104	0,144	0,020	0,152	0,109	0,013	#VALORE!	0,093	0,009	0,001	0,070	0,005	0,139	0,062	0,006	0,018	0,038	0,000	0,002	0,028	0,010	0,010	0,048
250	0,024	0,132	0,029	0,004	0,094	0,030	0,009	0,085	0,026	0,007	0,070	0,021	0,015	0,054	0,023	0,005	0,049	0,020	0,009	0,029	0,012	0,009	0,036	0,012	0,015	0,023	0,014	0,014	0,037
315	0,282	0,364	0,294	0,189	0,325	0,238	0,179	0,226	0,192	0,129	0,218	0,155	0,122	0,183	0,146	0,104	0,159	0,123	0,090	0,144	0,113	0,083	0,131	0,108	0,094	0,124	0,097	0,094	0,114
400	0,242	0,352	0,320	0,215	0,279	0,286	0,185	0,240	0,246	0,167	0,213	0,233	0,164	0,207	0,210	0,149	0,199	0,205	0,148	0,210	0,196	0,137	0,189	0,179	0,175	0,181	0,168	0,163	0,156
500	0,403	0,404	0,387	0,314	0,341	0,335	0,263	0,304	0,275	0,218	0,271	0,256	0,194	0,271	0,243	0,192	0,256	0,233	0,192	0,264	0,214	0,176	0,219	0,180	0,159	0,199	0,141	0,137	0,148
630	0,780	0,649	0,680	0,686	0,558	0,618	0,639	0,537	0,540	0,553	0,462	0,455	0,469	0,379	0,366	0,379	0,292	0,293	0,304	0,223	0,235	0,259	0,176	0,201	0,185	0,153	0,186	0,181	0,162
800	0,726	0,222	0,340	0,691	0,238	0,378	0,561	0,216	0,224	0,386	0,099	0,099	0,246	0,005	0,006	0,141	0,050	0,029	0,086	0,053	0,037	0,059	0,045	0,026	0,010	0,011	0,014	0,014	0,041
1000	1,195	1,120	1,017	0,850	0,731	0,677	0,597	0,471	0,495	0,469	0,398	0,455	0,511	0,400	0,470	0,502	0,472	0,520	0,551	0,547	0,536	0,520	0,477	0,432	0,390	0,356	0,319	0,310	0,248
1250	1,681	1,336	1,295	1,150	0,808	0,852	0,825	0,654	0,716	0,737	0,638	0,685	0,721	0,625	0,658	0,672	0,550	0,604	0,578	0,501	0,535	0,529	0,474	0,507	0,501	0,450	0,479	0,466	0,445
1600	1,783	1,240	0,955	1,236	0,934	0,883	1,057	0,828	0,830	0,934	0,719	0,682	0,787	0,612	0,562	0,682	0,595	0,572	0,634	0,493	0,475	0,553	0,433	0,416	0,394	0,430	0,386	0,375	0,375
2000	1,482	1,295	1,082	1,102	0,961	0,843	0,968	0,723	0,654	0,851	0,689	0,633	0,736	0,629	0,532	0,584	0,511	0,423	0,545	0,461	0,401	0,456	0,425	0,423	0,361	0,398	0,308	0,300	0,361
2500	1,761	1,262	1,183	1,194	0,934	0,955	1,009	0,853	0,822	0,883	0,661	0,663	0,680	0,585	0,632	0,677	0,574	0,577	0,564	0,419	0,432	0,497	0,421	0,470	0,479	0,455	0,420	0,409	0,325
3150	2,120	1,479	1,504	1,568	1,066	1,195	1,295	1,003	1,070	1,146	0,804	0,872	0,976	0,788	0,806	0,885	0,683	0,712	0,758	0,561	0,620	0,753	0,564	0,599	0,550	0,483	0,518	0,504	0,460
4000	1,698	1,323	1,087	1,259	1,043	0,831	1,026	0,893	0,798	0,989	0,795	0,602	0,757	0,602	0,527	0,717	0,520	0,497	0,674	0,562	0,497	0,627	0,433	0,422	0,386	0,433	0,419	0,408	0,399
5000	1,741	1,626	1,463	1,328	1,354	1,292	1,113	1,087	1,100	0,959	0,892	0,938	0,893	0,969	0,797	0,718	0,832	0,780	0,656	0,686	0,629	0,603	0,577	0,555	0,556	0,570	0,566	0,551	0,513
6300	1,475	1,339	1,372	1,215	1,182	1,133	1,005	0,992	1,086	0,835	0,885	0,897	0,749	0,824	0,810	0,631	0,780	0,755	0,581	0,621	0,598	0,539	0,581	0,528	0,495	0,478	0,505	0,491	0,422
8000	1,142	1,360	1,319	0,861	1,082	1,132	0,760	0,902	0,877	0,705	0,865	0,817	0,619	0,718	0,749	0,524	0,675	0,658	0,485	0,599	0,556	0,420	0,491	0,530	0,511	0,536	0,504	0,490	0,482
10000	1,212	1,309	1,302	1,019	1,080	1,103	0,619	0,892	0,937	0,499	0,756	0,786	0,497	0,732	0,712	0,462	0,696	0,650	0,471	0,558	0,572	0,435	0,519	0,537	0,521	0,534	0,518	0,504	0,528
a'	0,925	1,025	1,125	1,225	1,325	1,425	1,525	1,625	1,725	1,825	1,925	2,025	2,125	2,225	2,325	2,425	2,525	2,625	2,725	2,825	2,925	3,025	3,125	3,225	3,325	3,425	3,525	3,625	3,725
Area Sistema	0,111	0,123	0,135	0,147	0,159	0,171	0,183	0,195	0,207	0,219	0,231	0,243	0,255	0,267	0,279	0,291	0,303	0,315	0,327	0,339	0,351	0,363	0,375	0,387	0,399	0,411	0,423	0,435	0,447

2

f	0,0925	0,1025	0,1125	0,1225	0,1325	0,1425	0,1525	0,1625	0,1725	0,1825	0,1925	0,2025	0,2125	0,2225	0,2325	0,2425	0,2525	0,2625	0,2725	0,2825	0,2925	0,3025	0,3125	0,3225	0,3325	0,3425	0,3525	0,3625	0,3725
f	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27	C28
250	0,024	0,132	0,029	0,004	0,094	0,030	0,009	0,085	0,026	0,007	0,070	0,021	0,015	0,054	0,023	0,005	0,049	0,020	0,009	0,029	0,012	0,009	0,036	0,012	0,015	0,023	0,014	0,014	0,037
500	0,475	0,468	0,462	0,405	0,393	0,413	0,362	0,361	0,354	0,313	0,315	0,315	0,276	0,286	0,273	0,240	0,249	0,244	0,215	0,232	0,215	0,191	0,195	0,187	0,173	0,178	0,165	0,161	0,155
1000	1,201	0,893	0,884	0,897	0,592	0,636	0,661	0,447	0,478	0,530	0,378	0,413	0,493	0,344	0,378	0,438	0,324	0,365	0,405	0,332	0,345	0,369	0,302	0,304	0,294	0,265	0,271	0,263	0,245
2000	1,675	1,266	1,073	1,177	0,943	0,894	1,011	0,801	0,769	0,889	0,690	0,660	0,734	0,609	0,575	0,648	0,560	0,524	0,581	0,458	0,436	0,502	0,426	0,426	0,411	0,428	0,371	0,361	0,354
4000	1,853	1,476	1,352	1,385	1,154	1,106	1,145	0,994	0,989	1,032	0,830	0,804	0,875	0,786	0,710	0,773	0,679	0,663	0,696	0,603	0,582	0,661	0,525	0,525	0,498	0,495	0,501	0,487	0,457
8000	1,276	1,336	1,331	1,032	1,115	1,123	0,794	0,929	0,967	0,680	0,835	0,833	0,622	0,758	0,757	0,539	0,717	0,687	0,512	0,593	0,575	0,464	0,530	0,532	0,509	0,516	0,509	0,495	0,477
a'	0,925	1,025	1,125	1,225	1,325	1,425	1,525	1,625	1,725	1,825	1,925	2,025	2,125	2,225	2,325	2,425	2,525	2,625	2,725	2,825	2,925	3,025	3,125	3,225	3,325	3,425	3,525	3,625	3,725

- 1 Coefficiente di Assorbimento di modulo
- 2 Coefficiente di Assorbimento di modulo in bande di ottava

7.4 Confronto delle conformazioni modulari con fattori di forma corrispondenti

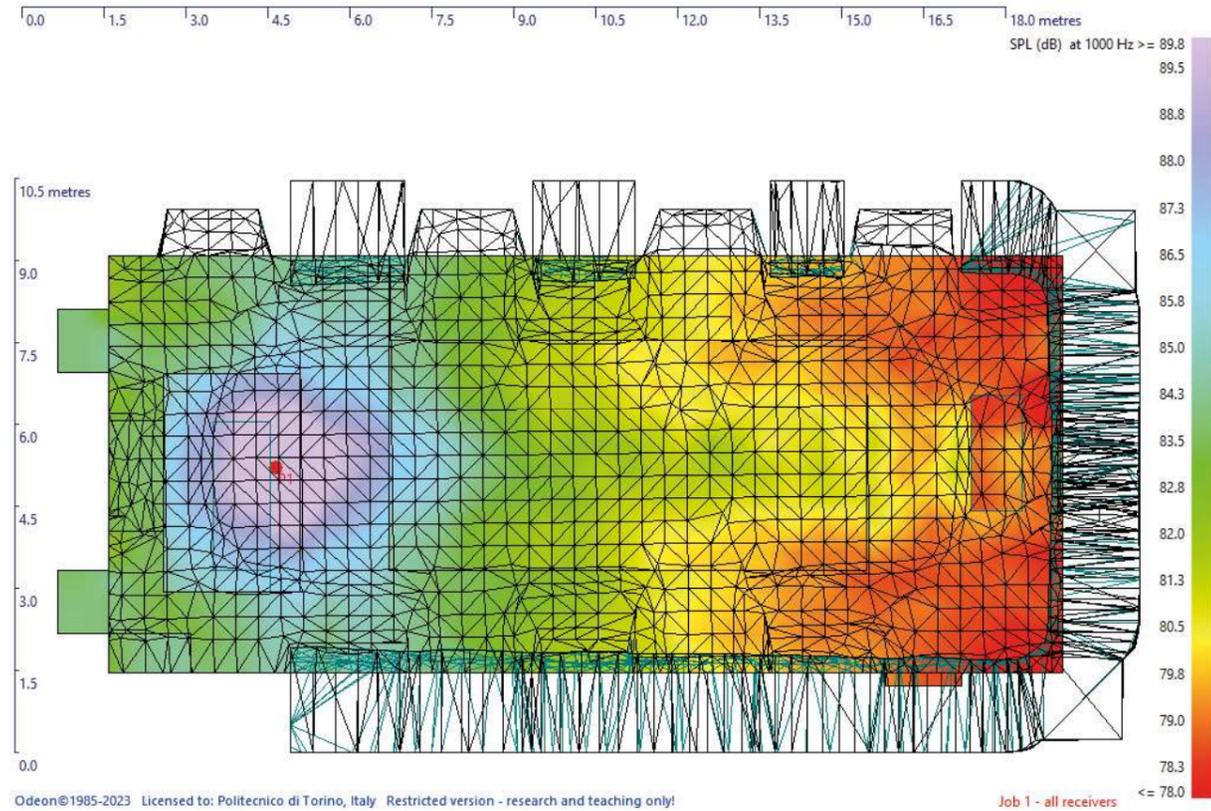
	0,0925	0,1025	0,1125	0,1225	0,1325	0,1425	0,1525	0,1625	0,1725	0,1825	0,1925	0,2025	0,2125	0,2225	0,2325	0,2425	0,2525	0,2625	0,2725	0,2825	0,2925	0,3025	0,3125	0,3225	0,3325	0,3425	0,3525	0,3625	0,3725			
f	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22	A23	A24	A25	A26	A27	A28	A29			
250	0,095	0,042	0,008	0,060	0,004	0,040	0,053	0,033	0,042	0,033	0,008	0,065	0,022	0,044	0,053	0,060	0,046	0,051	0,023	-	0,010	0,054	0,024	-	0,004	0,068	0,066	0,010	0,061	0,075	0,041	
500	1,111	1,032	0,929	0,868	0,868	0,783	0,752	0,737	0,660	0,629	0,618	0,552	0,517	0,517	0,478	0,431	0,450	0,417	0,398	0,403	0,374	0,360	0,365	0,345	0,334	0,330	0,309	0,315	0,296			
1000	2,459	1,539	1,362	1,299	0,971	0,876	0,940	0,722	0,690	0,746	0,570	0,603	0,710	0,554	0,596	0,758	0,587	0,597	0,677	0,547	0,573	0,599	0,495	0,484	0,469	0,413	0,422	0,410	0,397			
2000	3,156	1,962	1,811	1,862	1,545	1,493	1,502	1,219	1,184	1,279	1,026	1,068	1,137	0,991	0,996	1,058	0,903	0,875	0,929	0,768	0,773	0,825	0,714	0,736	0,714	0,677	0,679	0,676	0,625			
4000	2,931	2,438	2,308	2,079	1,924	1,855	1,751	1,628	1,604	1,539	1,447	1,415	1,383	1,313	1,228	1,198	1,139	1,172	1,089	1,062	1,025	1,026	0,953	0,927	0,899	0,844	0,852	0,849	0,844			
8000	2,997	2,735	2,515	2,059	2,227	2,089	1,783	1,806	1,824	1,488	1,638	1,521	1,319	1,416	1,385	1,192	1,244	1,189	1,088	1,122	1,101	0,972	1,043	0,984	0,954	0,925	0,898	0,844	0,858			
a'	0,463	0,513	0,563	0,613	0,663	0,713	0,763	0,813	0,863	0,913	0,963	1,013	1,063	1,113	1,163	1,213	1,263	1,313	1,363	1,413	1,463	1,513	1,563	1,613	1,663	1,713	1,763	1,813	1,863			
f	B1	B2	0,108	0,1125	0,1225	0,1325	0,138	0,1425	0,1525	0,1625	0,168	0,1725	0,1825	0,1925	0,198	0,2025	0,2125	0,2225	0,228	0,2325	0,2425	0,2525	0,258	0,2625	0,2725	0,2825	0,288	0,2925	0,3025			
	0,054	0,006	0,004	0,001	0,024	0,034	0,013	0,008	0,026	0,026	0,013	0,001	0,014	0,020	0,002	0,024	0,015	0,074	0,009	0,055	0,036	0,014	0,014	0,041	0,036	0,013	0,015	0,042	0,021			
	0,815	0,803	0,771	0,738	0,674	0,692	0,670	0,648	0,600	0,612	0,594	0,575	0,513	0,553	0,519	0,485	0,452	0,471	0,443	0,414	0,384	0,399	0,384	0,369	0,344	0,349	0,339	0,330	0,314			
	1,470	1,198	1,120	1,043	1,078	0,786	0,756	0,726	0,808	0,631	0,618	0,604	0,644	0,485	0,500	0,515	0,578	0,440	0,455	0,469	0,553	0,430	0,450	0,469	0,498	0,413	0,432	0,450	0,460			
	1,987	1,518	1,444	1,371	1,384	1,136	1,121	1,105	1,187	0,985	0,969	0,954	1,032	0,850	0,835	0,819	0,878	0,754	0,747	0,739	0,804	0,710	0,699	0,689	0,726	0,571	0,571	0,572	0,637			
	2,255	1,816	1,753	1,689	1,660	1,396	1,403	1,410	1,436	1,242	1,237	1,232	1,264	1,079	1,056	1,033	1,109	1,002	0,945	0,888	0,950	0,860	0,864	0,868	0,897	0,765	0,748	0,730	0,826			
	1,900	1,995	1,877	1,758	1,480	1,576	1,576	1,576	1,231	1,330	1,355	1,380	1,030	1,242	1,202	1,162	0,909	1,071	1,036	1,001	0,765	0,927	0,903	0,878	0,701	0,836	0,795	0,754	0,644			
a'	0,617	0,683	0,717	0,750	0,817	0,883	0,917	0,950	1,017	1,083	1,117	1,150	1,217	1,283	1,317	1,350	1,417	1,483	1,517	1,550	1,617	1,683	1,717	1,750	1,817	1,883	1,917	1,950	2,017			
f	C1	0,098	0,1025	0,108	0,1125	0,118	0,1225	0,128	0,1325	0,138	0,1425	0,148	0,1525	0,158	0,1625	0,168	0,1725	0,178	0,1825	0,188	0,1925	0,198	0,2025									
	0,024	0,078	0,132	0,052	0,029	0,017	0,004	0,045	0,094	0,032	0,030	0,010	0,009	0,047	0,085	0,030	0,026	0,017	0,007	0,031	0,070	0,025	0,021									
	0,475	0,472	0,468	0,465	0,462	0,434	0,405	0,399	0,393	0,403	0,413	0,388	0,362	0,362	0,361	0,357	0,354	0,333	0,313	0,314	0,315	0,315	0,315									
	1,201	1,047	0,893	0,888	0,884	0,891	0,897	0,745	0,592	0,614	0,636	0,648	0,661	0,554	0,447	0,463	0,478	0,504	0,530	0,454	0,378	0,396	0,413									
	1,675	1,471	1,266	1,169	1,073	1,125	1,177	1,060	0,943	0,918	0,894	0,953	1,011	0,906	0,801	0,785	0,769	0,829	0,889	0,790	0,690	0,675	0,660									
	1,853	1,664	1,476	1,414	1,352	1,368	1,385	1,270	1,154	1,130	1,106	1,125	1,145	1,069	0,994	0,992	0,989	1,010	1,032	0,931	0,830	0,817	0,804									
	1,276	1,306	1,336	1,334	1,331	1,181	1,032	1,073	1,115	1,119	1,123	0,959	0,794	0,862	0,929	0,948	0,967	0,823	0,680	0,758	0,835	0,834	0,833									
a'	0,463	0,513	0,563	0,613	0,663	0,713	0,763	0,813	0,863	0,925	0,975	1,025	1,075	1,125	1,175	1,225	1,275	1,325	1,375	1,425	1,475	1,525	1,575	1,625	1,675	1,725	1,775	1,825	1,875	1,925	1,975	2,025

0,3125	0,318	0,3225	0,3325	0,3425	0,348	0,3525	0,3625	0,3725
B23		B24	B25	B26		B27	B28	B29
- 0,008	0,017	0,041	0,042	- 0,009	0,014	0,037	0,037	- 0,018
0,303	0,297	0,291	0,286	0,263	0,262	0,261	0,256	0,244
0,389	0,396	0,403	0,380	0,349	0,351	0,352	0,347	0,322
0,530	0,541	0,551	0,540	0,530	0,517	0,504	0,496	0,456
0,697	0,689	0,681	0,647	0,629	0,624	0,618	0,619	0,617
0,788	0,743	0,698	0,663	0,685	0,665	0,645	0,599	0,642
2,083	2,117	2,150	2,217	2,283	2,317	2,350	2,417	2,483

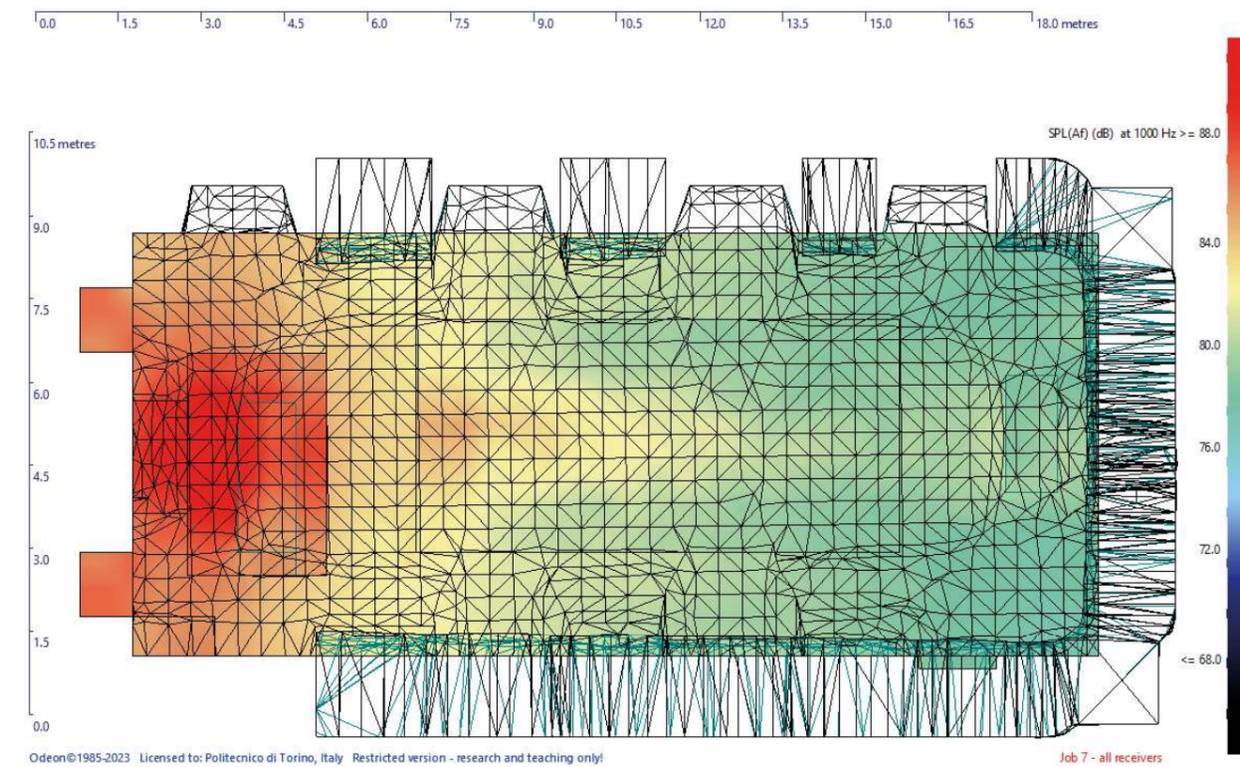
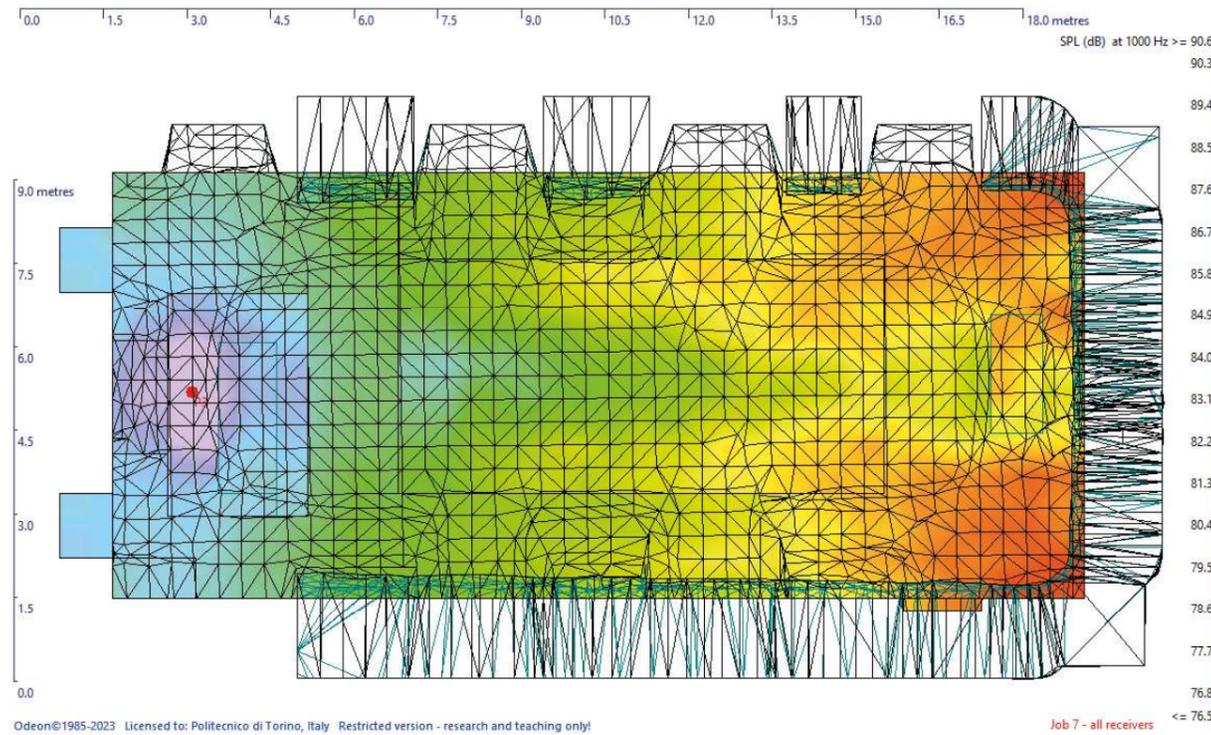
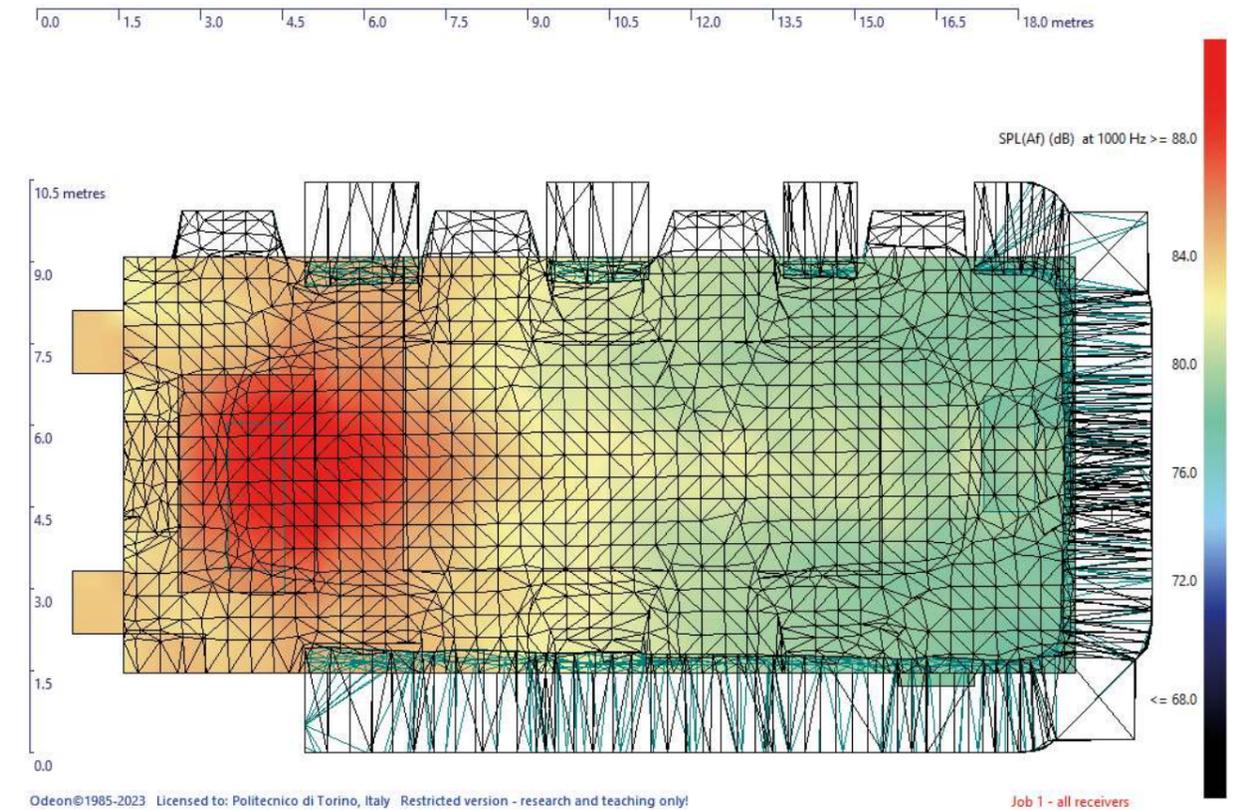
0,208	0,2125	0,218	0,2225	0,228	0,2325	0,238	0,2425	0,248	0,2525	0,258	0,2625	0,268	0,2725	0,278	0,2825	0,288	0,2925	0,298	0,3025	0,308	0,3125	0,318	0,3225	0,328	0,3325	0,338	0,3425	0,348	0,3525	0,358	0,3625	0,368	0,3725
C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27	C28	C29																	
0,003	- 0,015	- 0,034	- 0,054	- 0,016	0,023	0,014	0,005	- 0,022	- 0,049	- 0,015	0,020	0,015	0,009	- 0,010	- 0,029	- 0,009	0,012	0,010	0,009	- 0,014	- 0,036	- 0,012	0,012	0,014	0,015	- 0,004	- 0,023	- 0,004	0,014	0,014	0,014	- 0,012	- 0,037
0,295	0,276	0,281	0,286	0,279	0,273	0,256	0,240	0,244	0,249	0,246	0,244	0,229	0,215	0,224	0,232	0,224	0,215	0,203	0,191	0,193	0,195	0,191	0,187	0,180	0,173	0,176	0,178	0,172	0,165	0,163	0,161	0,158	0,155
0,453	0,493	0,418	0,344	0,361	0,378	0,408	0,438	0,381	0,324	0,344	0,365	0,385	0,405	0,368	0,332	0,338	0,345	0,357	0,369	0,335	0,302	0,303	0,304	0,299	0,294	0,279	0,265	0,268	0,271	0,267	0,263	0,254	0,245
0,697	0,734	0,672	0,609	0,592	0,575	0,611	0,648	0,604	0,560	0,542	0,524	0,553	0,581	0,519	0,458	0,447	0,436	0,469	0,502	0,464	0,426	0,426	0,426	0,419	0,411	0,420	0,428	0,400	0,371	0,366	0,361	0,357	0,354
0,840	0,875	0,831	0,786	0,748	0,710	0,742	0,773	0,726	0,679	0,671	0,663	0,680	0,696	0,649	0,603	0,593	0,582	0,622	0,661	0,593	0,525	0,525	0,525	0,511	0,498	0,496	0,495	0,498	0,501	0,494	0,487	0,472	0,457
0,727	0,622	0,690	0,758	0,757	0,757	0,648	0,539	0,628	0,717	0,702	0,687	0,600	0,512	0,553	0,593	0,584	0,575	0,520	0,464	0,497	0,530	0,531	0,532	0,520	0,509	0,512	0,516	0,512	0,509	0,502	0,495	0,486	0,477
2,075	2,125	2,175	2,225	2,275	2,325	2,375	2,425	2,475	2,525	2,575	2,625	2,675	2,725	2,775	2,825	2,875	2,925	2,975	3,025	3,075	3,125	3,175	3,225	3,275	3,325	3,375	3,425	3,475	3,525	3,575	3,625	3,675	3,725

7.5 Mappe acustiche

7.5.1 Livelli di pressione sonora



7.5.1 Livelli di pressione sonora (Af)



7.5.1 Livelli di pressione sonora, suono diretto

