



CULTURE, PRATICHE E TECNOLOGIE DEL CINEMA, DEI MEDIA,
DELLA MUSICA, DEL TEATRO E DELLA DANZA

CORSO DI DOTTORATO DI RICERCA IN

XXXVIII
CICLO DEL CORSO DI DOTTORATO

Ottimizzazione Acustica degli Spazi Culturali e Performativi: Un Approccio
Sostenibile

Titolo della tesi

Tommaso D'Orazio
Nome e Cognome del dottorando

Claudia Guattari
Docente Guida/Tutor: Prof.ssa

Ivelise Perniola
Coordinatrice: Prof.ssa

INDICE

INDICE	i
ELENCO DELLE FIGURE.....	iii
ELENCO DELLE TABELLE.....	vii
INTRODUZIONE.....	ix
1 <i>SOUNDSCAPE</i> PER L'ANALISI ACUSTICA AMBIENTALE.....	1
1.1 Fondamenti teorici del <i>soundscape</i>	1
1.1.1 Il concetto di <i>soundscape</i> : definizioni, origini e approccio interdisciplinare	1
1.1.2 Quadro normativo: ISO 12913.....	2
1.1.3 Valutazioni soggettive e parametri psicoacustici	4
1.2 Tecniche di acquisizione e analisi dei dati percettivi e fisici	9
1.2.1 Questionari standardizzati.....	9
1.2.2 Registrazioni binaurali	12
1.2.3 Strumenti di analisi	15
1.2.4 Integrazione tra percezioni soggettive e misure oggettive.....	20
1.3 Caso studio all'ex Mattatoio di Testaccio	24
1.3.1 Inquadramento urbano, architettonico e funzionale del sito	24
1.3.2 Metodologia sperimentale.....	28
1.3.3 Risultati dell'analisi <i>soundscape</i>	38
1.3.4 Conclusioni	50
2 ANALISI ACUSTICA DI CORTI STORICHE.....	53
2.1 Inquadramento generale.....	53
2.1.1 Contesto e importanza acustica dei chiostrini storici.....	53
2.1.2 Obiettivi della ricerca.....	55
2.1.3 Parametri acustici considerati (L_{Aeq} , T_{30} , C_{80} , D_{50}).....	56
2.1.4 Casi studio: San Pietro in Vincoli ed ex Istituto Tommaseo	61
2.2 Metodologia di rilievo e modellazione	70
2.2.1 Configurazione sperimentale e rilievo fonometrico.....	71
2.2.2 Modellazione 3D e simulazioni in ODEON	78
2.3 Risultati e conclusioni.....	88
2.3.1 Risultati e conclusioni del chiostro di San Pietro in Vincoli.....	88
2.3.2 Risultati e conclusioni della corte interna dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo	101

3	METAMATERIALI FONOASSORBENTI PER L’OTTIMIZZAZIONE ACUSTICA	114
3.1	Panorama applicativo e principi di funzionamento.....	114
3.1.1	Origini e contesto applicativo	114
3.1.2	Meccanismi fisici fondamentali	116
3.2	Metodologia e progettazione del metamateriale	120
3.2.1	Motivazioni e obiettivi progettuali.....	120
3.2.2	Configurazione geometrica	121
3.2.3	Modello analitico (TMM + JCA).....	123
3.2.4	Modello numerico (FEM)	126
3.2.5	Produzione dei campioni.....	130
3.2.6	<i>Setup</i> sperimentale in tubo di impedenza.....	135
3.3	Risultati e conclusioni.....	137
3.3.1	Confronto tra risultati sperimentali e modello analitico (TMM)	138
3.3.2	Confronto tra risultati sperimentali e modello FEM.....	142
3.3.3	Considerazioni conclusive e prospettive applicative	144
	CONCLUSIONE	147
	BIBLIOGRAFIA	152

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1.1 – Esempi di configurazioni tipiche di microfoni binaurali: a) microfoni <i>in-ear</i> , b) microfoni compatti, c) microfoni con testa artificiale.	13
Figura 1.2 – Andamento pressione-tempo dei canali sinistro (verde) e destro (rosso), con evidenza delle differenze interaurali e della presenza di eventi impulsivi.	16
Figura 1.3 – Spetrogramma del segnale registrato: l’asse verticale riporta la frequenza (Hz) in scala logaritmica, l’asse orizzontale il tempo (s), mentre la scala cromatica rappresenta il livello di pressione sonora <i>SPL</i> in dB.	17
Figura 1.4 – Schema a blocchi del processo di raccolta e integrazione dei dati soggettivi e oggettivi per la descrizione del paesaggio sonoro.	23
Figura 1.5 – Inquadramento territoriale e urbano del quartiere Testaccio. In (a) sono riportati i confini del Comune di Roma (linea nera) e l’area del quartiere Testaccio (linea rossa con riempimento rosso). In (b) è rappresentata una porzione di città in cui la linea rossa delimita il quartiere Testaccio, mentre l’area evidenziata in rosso trasparente indica l’ex Mattatoio.	25
Figura 1.6 – Planimetria dell’ex Mattatoio di Testaccio con indicazione dei principali enti e istituzioni attualmente presenti all’interno del complesso.	27
Figura 1.7 – Itinerario del soundwalk all’interno dell’ex Mattatoio di Testaccio. In nero è riportato il percorso seguito dai partecipanti, mentre i numeri in rosso indicano le sei postazioni di ascolto.	29
Figura 1.8 – Posizionamento della testa binaurale BSU di HEAD Acoustics su treppiede durante la campagna di registrazioni presso l’ex Mattatoio di Testaccio.	35
Figura 2.1 – Vedute del complesso di San Pietro in Vincoli: a) Veduta della facciata principale, b) Vista del chiostro interno rinascimentale.	63
Figura 2.2 – Planimetria generale del complesso di San Pietro in Vincoli con messa in evidenza della planimetria del chiostro rinascimentale.	64
Figura 2.3 – Vedute del complesso dell’ex Istituto Niccolò Tommaseo. a) Veduta della facciata principale. b) Vista della corte interna.	67
Figura 2.4 – Planimetria generale dell’ex Istituto Niccolò Tommaseo con messa in evidenza della planimetria della corte interna.	68
Figura 2.5 – Esempi di registrazioni fonometriche utilizzate per la caratterizzazione acustica. a) Registrazione con sorgente attiva per la determinazione dei livelli di pressione sonora <i>SPL</i> . b) Registrazione con spegnimento controllato della sorgente per la valutazione del tempo di riverbero T_{30} , mediante analisi del decadimento sonoro nel tempo.	73
Figura 2.6 – Planimetria del chiostro di San Pietro in Vincoli con indicazione delle posizioni delle sorgenti sonore (S_1 – S_4) rappresentate mediante cerchi, e dei ricevitori (R_1 – R_{10}) indicati con simboli triangolari.	75

Figura 2.7 – Planimetria della corte dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo con indicazione delle posizioni delle sorgenti sonore (S_1, S_2) rappresentate mediante cerchi, e dei ricevitori (R_1 – R_7) indicati con simboli triangolari.	76
Figura 2.8 – Configurazioni di misura durante la campagna sperimentale: a) Sorgente sonora dodecaedrica e microfono posizionati nel chiostro di San Pietro in Vincoli. b) Sorgente sonora dodecaedrica e microfono posizionati nella corte dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo.....	78
Figura 2.9 – Modelli tridimensionali dei due chiostrì utilizzati per la modellazione acustica: a) chiostro di San Pietro in Vincoli; b) corte interna dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo. Entrambe le viste prospettiche sono ottenute mediante un taglio diagonale del volume, che consente di mostrare due lati perimetrali e la configurazione interna degli spazi.....	80
Figura 2.10 – Configurazione del palco e della platea nel chiostro di San Pietro in Vincoli adottata nel secondo e terzo scenario: a) vista tridimensionale con taglio prospettico dell'edificio; b) rappresentazione planimetrica della platea e dell'area scenica.	85
Figura 2.11 – Configurazione del quarto scenario nel chiostro di San Pietro in Vincoli con introduzione dei pannelli riflettenti: a) vista tridimensionale con taglio prospettico dell'edificio; b) rappresentazione planimetrica della posizione dei pannelli, della platea e dell'area scenica.....	85
Figura 2.12 – Configurazione del palco e della platea nella corte dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo adottata nel secondo e terzo scenario: a) vista tridimensionale con taglio prospettico dell'edificio; b) rappresentazione planimetrica della platea e dell'area scenica.	86
Figura 2.13 – Configurazione del quarto scenario nella corte dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo con introduzione dei pannelli riflettenti: a) vista tridimensionale con taglio prospettico dell'edificio; b) rappresentazione planimetrica della posizione dei pannelli, della platea e dell'area scenica.....	87
Figura 2.14 – Mappe acustiche ottenute tramite <i>receiver grid</i> nel primo scenario del chiostro di San Pietro in Vincoli: a) distribuzione del tempo di riverbero T_{30} , b) distribuzione del livello sonoro $SPL(A)$, c) distribuzione della chiarezza musicale C_{80} , d) distribuzione della definizione D_{50}	90
Figura 2.15 – Mappe acustiche ottenute tramite <i>receiver grid</i> nel secondo scenario del chiostro di San Pietro in Vincoli: a) distribuzione del tempo di riverbero T_{30} , b) distribuzione del livello sonoro $SPL(A)$, c) distribuzione della chiarezza musicale C_{80} , d) distribuzione della definizione D_{50}	92
Figura 2.16 – Mappe acustiche ottenute tramite <i>receiver grid</i> nel terzo scenario del chiostro di San Pietro in Vincoli: a) distribuzione del tempo di riverbero T_{30} , b) distribuzione del livello sonoro $SPL(A)$, c) distribuzione della chiarezza musicale C_{80} , d) distribuzione della definizione D_{50}	94
Figura 2.17 – Mappe acustiche ottenute tramite <i>receiver grid</i> nel quarto scenario del chiostro di San Pietro in Vincoli: a) distribuzione del tempo di riverbero T_{30} , b) distribuzione del livello sonoro $SPL(A)$, c) distribuzione della chiarezza musicale C_{80} , d) distribuzione della definizione D_{50}	96

Figura 2.18 – Confronto tra i valori del tempo di riverbero T_{30} dei quattro scenari simulati del chiostro di San Pietro in Vincoli e gli intervalli ottimali per il parlato (a) e musica (b) relativi a sale chiuse di grande volume nelle bande da 125 a 8000 Hz.....	98
Figura 2.19 – Mappe acustiche ottenute tramite <i>receiver grid</i> nel primo scenario della corte interna dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo: a) distribuzione del tempo di riverbero T_{30} , b) distribuzione del livello sonoro $SPL(A)$, c) distribuzione della chiarezza musicale C_{80} , d) distribuzione della definizione D_{50}	102
Figura 2.20 – Mappe acustiche ottenute tramite <i>receiver grid</i> nel secondo scenario della corte interna dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo: a) distribuzione del tempo di riverbero T_{30} , b) distribuzione del livello sonoro $SPL(A)$, c) distribuzione della chiarezza musicale C_{80} , d) distribuzione della definizione D_{50}	104
Figura 2.21 – Mappe acustiche ottenute tramite <i>receiver grid</i> nel terzo scenario della corte interna dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo: a) distribuzione del tempo di riverbero T_{30} , b) distribuzione del livello sonoro $SPL(A)$, c) distribuzione della chiarezza musicale C_{80} , d) distribuzione della definizione D_{50}	106
Figura 2.22 – Mappe acustiche ottenute tramite <i>receiver grid</i> nel quarto scenario della corte interna dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo: a) distribuzione del tempo di riverbero T_{30} , b) distribuzione del livello sonoro $SPL(A)$, c) distribuzione della chiarezza musicale C_{80} , d) distribuzione della definizione D_{50}	108
Figura 2.23 – Confronto tra i valori del tempo di riverbero T_{30} dei quattro scenari simulati della corte dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo e gli intervalli ottimali per il parlato (a) e musica (b) relativi a sale chiuse di grande volume nelle bande da 125 a 8000 Hz.	110
Figura 3.1 – a) Modello semplificato di un risonatore di Helmholtz con cavità e collo; b) Analogia con sistema equivalente massa-molla a un grado di libertà.	116
Figura 3.2 – a) Sezione trasversale della cella unitaria del risonatore, con indicazione del tubo di impedenza e della cavità; b) Dettaglio del collo spezzato del risonatore con indicazioni dei parametri geometrici.	122
Figura 3.3 – Schema tridimensionale del modello FEM del tubo di impedenza.....	127
Figura 3.4 – Campioni realizzati mediante stampa 3D: a) singola cella unitaria; b) pannello acustico composto da più unità replicate secondo una configurazione simmetrica.....	131
Figura 3.5 – Misure dimensionali effettuate con calibro digitale sui campioni stampati: a) Diametro esterno della cella unitaria, b) Diametro esterno del pannello, c) Spessore L del campione con spessore teorico di 10 mm, d) Spessore L del campione con spessore teorico di 5 mm.	133
Figura 3.6 – Dettaglio al microscopio digitale della superficie interna del collo di un campione. Sono visibili imperfezioni superficiali dovute alla risoluzione limitata della stampa FDM.....	135
Figura 3.7 – Vista del banco di prova utilizzato per la misura del coefficiente di assorbimento secondo la norma ISO 10534-2, con evidenza del tubo di impedenza, dei microfoni, del sistema di acquisizione e del campione posizionato all'estremità..	136

Figura 3.8 – Confronto tra i coefficienti di assorbimento $\alpha(\omega)$ ottenuti sperimentalmente (linee continue) e quelli previsti dal modello analitico TMM (bande colorate) per cinque configurazioni angolari del collo spezzato: **a)** 45°–45°, **b)** 30°–60°, **c)** 60°–30°, **d)** 45°–60°, **e)** 60°–45°. In ogni grafico sono riportati i risultati relativi a quattro combinazioni geometriche (D, L), codificate per colore: viola ($D = 5$ mm, $L = 5$ mm), verde ($D = 5$ mm, $L = 10$ mm), rosso ($D = 10$ mm, $L = 5$ mm), azzurro ($D = 10$ mm, $L = 10$ mm). Le curve tratteggiate rappresentano la risposta TMM con raggio del collo pari esattamente a 3 mm, mentre le bande colorate rappresentano gli involucri teorici tenendo conto di una tolleranza del $\pm 5\%$ sul raggio. 140

Figura 3.9 – Confronto tra i coefficienti di assorbimento $\alpha(\omega)$ ottenuti sperimentalmente (linee continue) e quelli previsti tramite simulazione FEM (tratteggiate). In particolare: la curva nera continua rappresenta il risultato sperimentale per $D=10$ mm, la curva verde tratteggiata rappresenta il risultato numerico FEM per $D=10$ mm, la curva blu continua rappresenta il risultato sperimentale per $D=5$ mm, la curva rossa tratteggiata rappresenta il risultato numerico FEM per $D=5$ mm. 143

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1.1 – Principali parametri soggettivi del paesaggio sonoro.	5
Tabella 1.2 – Principali parametri psicoacustici per la descrizione del paesaggio sonoro.	8
Tabella 1.3 – Struttura tipica dei questionari per l’analisi del paesaggio sonoro (ISO/TS 12913-2:2018).....	10
Tabella 1.4 – Modalità di somministrazione dei questionari per l’analisi del paesaggio sonoro (ISO/TS 12913-2:2018).....	12
Tabella 1.5 – Parametri fisici ottenuti dall’elaborazione con software di analisi acustica, con relative descrizioni e significato applicativo.	18
Tabella 1.6 – Parametri psicoacustici calcolati dai software di analisi acustica, con relative descrizioni e significati applicativi sintetici.....	19
Tabella 1.7 – Relazioni tra parametri oggettivi/psicoacustici e percezioni soggettive tipiche del paesaggio sonoro.	22
Tabella 1.8 – Struttura del questionario utilizzato nel caso studio presso l’ex Mattatoio di Testaccio (ISO 12913-2).	32
Tabella 1.9 – Caratteristiche del campione dei partecipanti al <i>soundwalk</i> presso l’ex Mattatoio di Testaccio.	34
Tabella 1.10 – Specifiche di configurazione e modalità operative delle registrazioni binaurali condotte presso l’ex Mattatoio di Testaccio.	37
Tabella 1.11 – Condizioni ambientali durante la campagna di registrazioni binaurali presso l’ex Mattatoio di Testaccio.	37
Tabella 1.12 – Valori medi di udibilità (scala 0 / 4) delle categorie di sorgenti sonore percepite nelle sei postazioni dell’ex Mattatoio di Testaccio, ottenuti dalle risposte ai questionari (ISO 12913-2)	40
Tabella 1.13 – Valori medi (scala -2 / +2) delle valutazioni soggettive relative agli attributi qualitativi del paesaggio sonoro nelle sei postazioni di osservazione dell’ex Mattatoio di Testaccio.	42
Tabella 1.14 – Valori medi della qualità complessiva (scala -2 / +2) e della pertinenza percepita (scala 0 / 4) del paesaggio sonoro nelle sei postazioni di osservazione dell’ex Mattatoio di Testaccio.....	43
Tabella 1.15 – Riepilogo dei valori medi dei principali parametri acustici e psicoacustici (<i>loudness</i> in soneGF, <i>roughness</i> in asper, <i>sharpness</i> in acum e <i>SPL</i> in dB) per le sei postazioni di misura dell’ex Mattatoio di Testaccio.	48
Tabella 2.1 – Sintesi dei parametri acustici oggettivi considerati, con relativa descrizione e significato applicativo.	60

Tabella 2.2 – Principali dimensioni geometriche e proporzioni del chiostro di San Pietro in Vincoli.	64
Tabella 2.3 – Principali materiali del chiostro di San Pietro in Vincoli.	65
Tabella 2.4 – Principali dimensioni geometriche e proporzioni della corte dell'ex Istituto Tommaseo.	68
Tabella 2.5 – Principali materiali della corte dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo.	69
Tabella 2.6 – Coefficienti di assorbimento α per bande d'ottava comprese tra 125 Hz e 8000 Hz e coefficienti di <i>scattering</i> s dei principali materiali presenti nel chiostro di San Pietro in Vincoli.	82
Tabella 2.7 – Coefficienti di assorbimento α per bande d'ottava comprese tra 125 Hz e 8000 Hz e coefficienti di <i>scattering</i> s dei principali materiali presenti nella corte interna dell'ex Istituto Tommaseo.	82
Tabella 2.8 – Coefficienti di assorbimento α per bande d'ottava comprese tra 125 Hz e 8000 Hz e coefficienti di <i>scattering</i> s relativi agli elementi introdotti nei diversi scenari di simulazione per entrambi i chiostri in esame.	84
Tabella 2.9 – Valori di T_{30} espressi in secondi nelle bande d'ottava comprese tra 125 Hz e 8000 Hz per i quattro scenari analizzati del chiostro di San Pietro in Vincoli.	97
Tabella 2.10 – Valori di T_{30} espressi in secondi nelle bande d'ottava comprese tra 125 Hz e 8000 Hz per i quattro scenari analizzati della corte dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo.	109
Tabella 3.1 – Condizioni al contorno applicate nel dominio numerico.	129
Tabella 3.2 – Specifiche delle discretizzazioni delle <i>mesh</i>	130
Tabella 3.3 – Caratteristiche del dispositivo e parametri di stampa 3D adottati per la realizzazione dei campioni.	131
Tabella 3.4 – Configurazioni sperimentali dei campioni stampati in 3D.	132
Tabella 3.5 – Valori misurati e valori nominali dello spessore dei campioni stampati.	134

INTRODUZIONE

La tesi si inserisce all'interno del progetto di dottorato finanziato nell'ambito del PNRR e affronta il tema dell'ottimizzazione acustica degli spazi culturali e performativi, un ambito che richiede un dialogo continuo tra ingegneria, arti dello spettacolo e studi culturali. Più precisamente, la ricerca si colloca nel campo della *heritage acoustics* e, più in generale, degli studi sul patrimonio culturale sonoro, nei quali la qualità acustica di luoghi storici e culturalmente significativi è considerata parte integrante della loro fruizione, della loro identità e della loro valorizzazione¹. In tale prospettiva, la letteratura recente ha mostrato come i siti patrimoniali destinati o adattati alla musica e alla performance possano essere studiati sia mediante parametri oggettivi di acustica architettonica, sia attraverso approcci *soundscape* che integrano valutazioni soggettive, indicatori acustici e parametri psicoacustici². L'obiettivo è sviluppare un contributo scientifico capace di integrare analisi oggettive e percezione soggettiva, fornendo strumenti utili alla progettazione acustica sostenibile di ambienti destinati alla musica, al teatro, alla danza e alle arti contemporanee. L'interesse verso questi luoghi deriva dalla crescente centralità dell'esperienza sonora nella fruizione artistica e dalla necessità di coniugare approcci analitici propri dell'ingegneria con una prospettiva capace di riconoscere il suono come componente del valore culturale, percettivo e performativo dei siti studiati. In questa prospettiva, la tesi propone un percorso interdisciplinare che unisce lo studio del *soundscape* nei contesti culturali, la modellazione acustica di spazi storici intesi come luoghi del patrimonio culturale e la valutazione delle loro potenzialità per l'uso performativo, fino allo sviluppo di metamateriali innovativi orientati al miglioramento della qualità sonora. Il risultato è un quadro metodologico integrato per interpretare, analizzare e ottimizzare l'ambiente acustico nei contesti culturali, con particolare attenzione ai siti storici e ai luoghi di valore patrimoniale.

Il primo asse della tesi, sviluppato nel primo capitolo, riguarda l'analisi del paesaggio sonoro, che permette di descrivere come gli individui percepiscono e interpretano l'ambiente acustico nei contesti culturali. Non si analizzano solo le sorgenti presenti, ma il modo in cui esse influenzano la qualità dell'esperienza, indicando se uno spazio è percepito come adeguato, piacevole o disturbante. La teoria del *soundscape*, definita dalla serie ISO 12913, fornisce il quadro metodologico per raccogliere valutazioni soggettive in modo standardizzato, trasformando impressioni individuali in

¹ Cfr. José A. Almagro-Pastor, Rafael García-Quesada, Jerónimo Vida-Manzano, Francisco J. Martínez-Irureta, Ángel F. Ramos-Ridao, "The Acoustics of the Palace of Charles V as a Cultural Heritage Concert Hall", «Acoustics», vol. 4, n. 3, 2022, pp. 800–820.

² Cfr. Jose Antonio Almagro-Pastor, Jerónimo Vida-Manzano, Rafael García-Quesada, Ángel Fermín Ramos-Ridao, "Soundscape Approach Applied to a Heritage Open-Air Concert Hall: The Case of the Corral del Carbón in Granada", «Building Acoustics», vol. 32, n. 1, 2025, pp. 143–163.

dati confrontabili. In questo approccio, gli spazi culturali sono studiati come luoghi vissuti, in cui la percezione sonora contribuisce direttamente alla fruizione artistica. L'utilizzo delle registrazioni binaurali assume un ruolo centrale per la riproduzione del campo sonoro in modo conforme alla percezione di un ascoltatore reale. Esse permettono di analizzare non solo gli aspetti percettivi, ma anche componenti quantitative del segnale che non emergono dalle sole valutazioni soggettive, come i principali parametri acustici e psicoacustici derivati dal segnale registrato. Il caso studio dell'ex Mattatoio di Testaccio rappresenta un contesto particolarmente complesso, in cui convivono sorgenti eterogenee e interazioni continue con l'ambiente urbano. L'integrazione tra analisi soggettiva e oggettiva permette di valutare in modo coerente e quantificabile la compatibilità tra le attività culturali e le effettive condizioni sonore del sito. Questo asse si integra pienamente con gli obiettivi del DAMS, considerando il suono come componente dell'esperienza estetica e del rapporto spettatore-ambiente. Il *soundscape* diventa così lo strumento che collega percezione, cultura e progettazione acustica degli spazi destinati alla fruizione artistica.

Il secondo asse della tesi, sviluppato nel secondo capitolo, riguarda l'analisi oggettiva della qualità acustica nei chiostrini storici di San Pietro in Vincoli e dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo per valutarne l'idoneità alla fruizione culturale contemporanea. L'indagine si basa sui principi dell'acustica architettonica e sui parametri definiti dalla ISO 3382, applicati in forma adattata agli ambienti semiaperti. Attraverso misure, modellazione tridimensionale e simulazioni numeriche vengono descritti decadimento, riflessioni e distribuzione dell'energia sonora, fornendo un quadro quantitativo del comportamento acustico dei due chiostrini analizzati. La modellazione consente di stimare parametri fondamentali per parlato e musica (come chiarezza, intelligibilità e tempo di decadimento) e di verificare quali configurazioni risultino compatibili con l'uso performativo. I chiostrini, caratterizzati da una natura ibrida tra spazio chiuso e aperto, rappresentano un caso di studio ideale per analizzare come geometria, materiali storici e dissipazione verso l'esterno influenzino la propagazione sonora. Questo asse fornisce così un contributo tecnico diretto agli ambiti del DAMS, offrendo criteri oggettivi per comprendere limiti e potenzialità acustiche degli spazi culturali storici e individuare possibili strategie di miglioramento.

Il terzo asse della tesi, descritto nel terzo capitolo, riguarda l'innovazione tecnologica per il controllo acustico, attraverso la progettazione e la sperimentazione di metamateriali acustici capaci di intervenire in modo mirato su assorbimento e risonanza negli spazi culturali. Questo approccio introduce una dimensione progettuale oltre l'analisi degli ambienti esistenti, con l'obiettivo di sviluppare dispositivi compatti ed efficienti, utili soprattutto dove interventi tradizionali risultano incompatibili con vincoli storici o architettonici. Nel lavoro vengono studiati risonatori non standard, come quelli a collo spezzato, che consentono un controllo preciso della frequenza di risonanza senza

installazioni invasive o volumetriche. La possibilità di calibrare il comportamento acustico tramite variazioni geometriche li rende adatti a contesti performativi eterogenei, inclusi spazi storici e semiaperti. La modularità dei dispositivi, la realizzazione tramite stampa 3D e la totale reversibilità delle installazioni assicurano compatibilità con criteri di sostenibilità e tutela del patrimonio. Questo asse fornisce così un contributo diretto agli ambiti del DAMS, offrendo soluzioni non intrusive per migliorare la qualità sonora degli spazi culturali, coniugando innovazione ingegneristica e conservazione architettonica.

Il percorso metodologico articola tre livelli distinti ma interconnessi. Il primo consiste nella raccolta dei dati percettivi e delle misure acustiche oggettive, che forniscono la base empirica per valutare le condizioni reali di ascolto. Il secondo riguarda la modellazione tridimensionale e le simulazioni numeriche, utilizzate per analizzare il comportamento del campo sonoro in scenari non direttamente misurabili e per verificare la risposta dei metamateriali acustici e degli spazi alle diverse configurazioni. Il terzo livello è dedicato alla progettazione e alla sperimentazione, che comprendono sia la definizione di interventi migliorativi per gli ambienti analizzati sia lo sviluppo e la validazione di dispositivi acustici innovativi.

Da questa struttura emergono i contributi originali della tesi. L'indagine *soundscape* del caso studio permette di correlare misure fisiche e percezioni umane di un ambiente culturale in un contesto urbano complesso, offrendo una lettura integrata dell'ambiente sonoro. La caratterizzazione acustica dei chiostrri semiaperti, ottenuta attraverso l'adattamento critico di metodologie pensate per sale chiuse, fornisce criteri interpretativi specifici per spazi privi di riferimenti consolidati. Infine, la progettazione e la verifica sperimentale di un metamateriale risonante con collo spezzato costituiscono un avanzamento tecnico mirato al controllo selettivo dell'assorbimento in contesti culturali che richiedono soluzioni non invasive. Nel loro insieme, questi contributi si collocano nel dibattito attuale sull'acustica del patrimonio culturale, proponendo un'integrazione tra *heritage acoustics*, *soundscape* e progettazione di interventi acustici compatibili con la conservazione e con la fruizione contemporanea dei luoghi studiati.

La tesi si conclude presentando una sintesi dei risultati ottenuti nei tre assi della ricerca e delineando le prospettive future. Tra queste rientrano l'applicazione dei criteri interpretativi ad altre tipologie di spazi culturali, l'evoluzione dei metamateriali sviluppati e la definizione di modelli predittivi capaci di integrare dati acustici, percezione uditiva e requisiti performativi. Queste linee di sviluppo mostrano come il lavoro possa estendersi oltre i casi studio analizzati, contribuendo alla progettazione acustica sostenibile degli spazi destinati alla fruizione artistica.

1 *SOUNDSCAPE PER L'ANALISI ACUSTICA AMBIENTALE*

1.1 Fondamenti teorici del *soundscape*

1.1.1 Il concetto di *soundscape*: definizioni, origini e approccio interdisciplinare

Il termine *soundscape* fu introdotto negli anni '70 dal compositore e ricercatore canadese R. Murray Schafer, fondatore del World Soundscape Project presso la Simon Fraser University di Vancouver. Con questo neologismo Schafer intendeva descrivere l'insieme dei suoni percepiti in un determinato contesto, definendolo come paesaggio sonoro analogo al concetto visivo di "*landscape*"³.

L'attività del World Soundscape Project si collocava in una prospettiva ecologica, volta a studiare la relazione tra l'uomo e l'ambiente sonoro quotidiano. Il gruppo di ricerca sviluppò un'ampia attività di documentazione sistematica dei paesaggi sonori, accompagnata da classificazioni e analisi qualitative⁴. Questa impostazione, inizialmente legata a finalità artistiche ed educative, contribuì a sensibilizzare l'opinione pubblica sui temi dell'inquinamento acustico e a preservare la memoria sonora di ambienti naturali e urbani.

Con il passare del tempo, il concetto di *soundscape* si è progressivamente slegato dalla sola dimensione artistico-estetica, acquisendo una valenza più scientifica e applicativa. A partire dagli anni '90, il termine è stato adottato nei contesti urbani contemporanei come strumento di analisi integrata, capace di connettere percezione umana e pianificazione acustica⁵. In questo passaggio, il paesaggio sonoro ha assunto un ruolo centrale nell'organizzazione e la gestione dello spazio pubblico, superando la tradizionale concezione del suono inteso unicamente come rumore da ridurre⁶.

Il concetto di *soundscape* si caratterizza per una struttura teorica che integra tre dimensioni strettamente connesse: l'ambiente sonoro, ossia l'insieme dei suoni prodotti in un contesto specifico; la percezione umana, che riguarda l'esperienza soggettiva e sensoriale degli ascoltatori; e la dimensione culturale, che rispecchia i significati sociali e simbolici attribuiti ai suoni. Questa impostazione si distingue dall'acustica ambientale tradizionale, orientata principalmente alla quantificazione e al controllo del rumore, poiché riconosce che la qualità sonora di un luogo non

³ Cfr. R. Murray Schafer, *The Tuning of the World*, New York, Knopf, 1977.

⁴ Cfr. Barry Truax, *Handbook for Acoustic Ecology*, Cambridge Street Publishing, 1999.

⁵ Cfr. R. Murray Schafer, *The Soundscape: Our Sonic Environment and the Tuning of the World*, Rochester (VT), Destiny Books, 1993.

⁶ Cfr. Jian Kang e Brigitte Schulte-Fortkamp (a cura di), *Soundscape and the Built Environment*, Boca Raton, CRC Press, 2016.

dipende unicamente da parametri fisici, ma dal modo in cui il suono si lega con le funzioni e l'identità dello spazio.

Il *soundscape* non si limita a una prospettiva culturale o descrittiva, ma è connesso direttamente con l'acustica ambientale e la psicoacustica. La prima fornisce gli strumenti per analizzare quantitativamente le sorgenti sonore e il loro comportamento nello spazio, mentre la seconda permette di collegare i parametri fisici alle risposte percettive degli ascoltatori. Parallelamente, il concetto di *soundscape* è fortemente legato alle arti sonore e performative, dove viene inteso come materia estetica e comunicativa. Allo stesso tempo, discipline come la sociologia e l'antropologia urbana hanno evidenziato il ruolo dei paesaggi sonori nel definire identità collettive, pratiche sociali e percezioni del benessere nei contesti di vita quotidiana⁷. L'aspetto forse più innovativo dell'approccio interdisciplinare riguarda l'integrazione con l'urbanistica e la progettazione architettonica. In questi ambiti, il *soundscape* viene inteso come parametro qualitativo da affiancare a quelli visivi, funzionali ed energetici, aprendo la strada a progetti orientati alla sostenibilità e alla centralità dell'utente. Questa pluralità di prospettive dimostra come il *soundscape* rappresenti un vero e proprio ponte tra scienze dure e discipline umanistiche, capace di unire strumenti analitici e dimensioni culturali, con l'obiettivo di migliorare la qualità della vita e la fruizione degli spazi.

1.1.2 Quadro normativo: ISO 12913

La crescente diffusione del concetto di *soundscape* e la sua progressiva applicazione in contesti urbani e culturali hanno reso necessario un quadro metodologico condiviso, capace di garantire coerenza terminologica e comparabilità dei risultati. A tale esigenza ha risposto l'International Organization for Standardization (ISO)⁸ con la pubblicazione della serie ISO 12913, interamente dedicata al *soundscape*. Questa serie normativa si propone di fornire linee guida unificate per la definizione, la raccolta e l'analisi dei dati relativi al paesaggio sonoro, favorendo l'integrazione tra percezione soggettiva e parametri oggettivi. L'intento è quello di stabilire una base comune che permetta a ricercatori, progettisti e istituzioni di adottare procedure standardizzate, superando l'eterogeneità di approcci che caratterizzava gli studi precedenti e aprendo la strada a un utilizzo operativo del concetto di *soundscape* nei processi di progettazione acustica. La normativa è concepita come una serie modulare, in cui ogni parte affronta un livello differente dell'analisi, garantendo coerenza metodologica e continuità tra le fasi di definizione, raccolta ed elaborazione dei dati.

⁷ Cfr. Emily Thompson, *The Soundscape of Modernity*, Cambridge (MA), MIT Press, 2002.

⁸ International Organization for Standardization, *ISO 12913 Acoustics — Soundscape*, Geneva, ISO, 2014-2019.

La Parte 1 (ISO 12913-1:2014)⁹ costituisce il fondamento teorico della norma: introduce la definizione ufficiale di *soundscape* e fornisce il quadro concettuale necessario per distinguere il paesaggio sonoro dall'acustica ambientale tradizionale. Viene stabilita una terminologia unificata, che permette di evitare ambiguità interpretative e di assicurare un linguaggio condiviso tra discipline differenti (acustica, urbanistica, psicologia ambientale, arti sonore).

La Parte 2 (ISO 12913-2:2018)¹⁰ si concentra sugli aspetti metodologici della raccolta dati. Essa fornisce linee guida precise su come condurre indagini percettive (questionari, interviste, *soundwalks*), definisce i requisiti minimi per la documentazione del contesto di rilevazione e stabilisce protocolli per garantire la replicabilità e la confrontabilità degli studi. In questo modo, la norma riduce la variabilità legata a procedure soggettive e crea un corpus di dati più solido e comparabile a livello internazionale.

La Parte 3 (ISO 12913-3:2019)¹¹ è dedicata alle tecniche di analisi e alla gestione dei dati. Include procedure statistiche per trattare i risultati delle indagini percettive e metodi per correlare questi con parametri acustici e psicoacustici. L'obiettivo è rendere possibile un'interpretazione quantitativa della qualità sonora percepita, in modo da integrare le valutazioni soggettive con misure oggettive.

Questa articolazione in tre parti riflette un percorso logico che parte dalla definizione concettuale (Parte 1), passa per la raccolta sistematica dei dati (Parte 2), e si completa con la loro analisi e interpretazione (Parte 3). Tale struttura facilita la diffusione di un approccio scientificamente rigoroso allo studio del *soundscape*, ponendo le basi per applicazioni pratiche nel campo della pianificazione urbana, della progettazione architettonica e della tutela ambientale.

Un aspetto centrale del processo di standardizzazione è la possibilità di integrare la serie ISO 12913 con altre norme acustiche già in uso, come quelle dedicate alla misurazione del rumore ambientale o all'assorbimento acustico dei materiali. Questo collegamento permette di estendere la valutazione oltre i soli parametri fisici, inserendo la percezione umana come variabile aggiuntiva e complementare.

⁹ International Organization for Standardization, *ISO 12913-1:2014 Acoustics — Soundscape — Part 1: Definition and Conceptual Framework*, Geneva, ISO, 2014.

¹⁰ International Organization for Standardization, *ISO 12913-2:2018 Acoustics — Soundscape — Part 2: Data Collection and Reporting Requirements*, Geneva, ISO, 2018.

¹¹ International Organization for Standardization, *ISO 12913-3:2019 Acoustics — Soundscape — Part 3: Data Analysis*, Geneva, ISO, 2019.

1.1.3 Valutazioni soggettive e parametri psicoacustici

La descrizione del paesaggio sonoro richiede l'integrazione di due prospettive complementari: da un lato, la valutazione soggettiva espressa dagli individui attraverso attributi percettivi e giudizi qualitativi; dall'altro, l'analisi oggettiva condotta mediante parametri *psicoacustici* che traducono le componenti della percezione in grandezze misurabili. Questa duplice dimensione consente di superare i limiti di un approccio esclusivamente fisico, fornendo un quadro più completo del rapporto tra caratteristiche del suono ed esperienza umana.

L'analisi percettiva del *soundscape* si fonda sull'identificazione di alcuni indicatori soggettivi che permettono di descrivere in modo sistematico l'esperienza acustica vissuta dagli individui. Tali indicatori rappresentano il collegamento diretto tra le caratteristiche fisiche dell'ambiente e la loro interpretazione a livello umano, offrendo un quadro indispensabile per comprendere come i suoni vengano valutati in termini di qualità, coerenza e impatto sul benessere.

La percezione del paesaggio acustico è fortemente condizionata dalla presenza e dalla dominanza relativa delle sorgenti sonore. L'individuo tende a distinguere e gerarchizzare i suoni, attribuendo maggiore rilievo a quelli che emergono sul fondo sonoro. Le sorgenti naturali sono spesso associate a giudizi positivi e a una piacevole sensazione acustica ambientale; le sorgenti tecnologiche, come il traffico o gli impianti, invece, assumono normalmente connotazioni prevalentemente negative, legate al disturbo e all'intrusività; le sorgenti antropiche possono infine oscillare tra i due poli, risultando vivacizzanti in certi contesti e sovraccaricanti in altri¹². È quindi essenziale analizzare la dominanza delle sorgenti per comprendere l'equilibrio acustico complessivo e la sua percezione sociale.

Accanto alla valutazione delle sorgenti, un ruolo fondamentale è svolto dagli attributi qualitativi, che descrivono le caratteristiche percepite del paesaggio sonoro. Questi non si limitano a indicare se un ambiente è positivo o negativo, ma permettono di coglierne le sfumature: ordine o disordine, varietà o monotonia, stimolazione o noia, calma o tensione. In questo modo, gli attributi qualitativi risultano indispensabili per comprendere come gli utenti percepiscano e interpretino i suoni in relazione all'ambiente circostante¹³.

Infine, la percezione del paesaggio sonoro viene spesso sintetizzata in un giudizio globale di qualità complessiva. Questo indicatore riflette un processo cognitivo integrativo, attraverso cui

¹² Cfr. Myriam Raimbault e Danièle Dubois, "Urban Soundscapes: Experiences and Knowledge", «Cities», vol. 22, n. 5, 2005, pp. 339-350.

¹³ Cfr. Östen Axelsson, M. E. Nilsson e B. Berglund, "A Principal Components Model of Soundscape Perception", «Journal of the Acoustical Society of America», vol. 128, n. 5, 2010, pp. 2836-2846.

l'ascoltatore combina le caratteristiche delle sorgenti e gli attributi qualitativi in una valutazione unitaria. Tale giudizio, espresso in termini di gradevolezza o appropriatezza, rappresenta una misura di sintesi fondamentale, poiché consente di valutare l'idoneità del paesaggio sonoro rispetto alla funzione dello spazio e alle aspettative sociali¹⁴. Ciò significa che anche suoni potenzialmente fastidiosi possono risultare accettabili o coerenti con l'ambiente quando si inseriscono in un quadro percettivo e sociale considerato appropriato. La Tabella 1.1 riassume i principali parametri soggettivi per la descrizione qualitativa del paesaggio sonoro.

Tabella 1.1 – Principali parametri soggettivi del paesaggio sonoro.

Categoria	Parametri soggettivi
Individuazione delle sorgenti sonore dominanti	Traffico veicolare
	Suoni tecnologici
	Suoni antropici
	Suoni naturali
Attributi qualitativi	Piacevole/spiacevole
	Calmo/caotico
	Vivace/stabile
	Monotono/dinamico
Valutazione complessiva	Qualità globale
	Appropriatezza rispetto al luogo

Gli indicatori soggettivi, pur fondamentali, richiedono l'integrazione con misure oggettive, di natura psicoacustica, che consentono di quantificare dimensioni percettive specifiche in grandezze fisiche misurabili e confrontabili.

La psicoacustica studia il legame tra segnale acustico e sensazione uditiva usando modelli basati su bande critiche, pesature in frequenza e integrazioni temporali. Fornisce parametri che non sostituiscono la percezione, ma ne quantificano componenti rilevanti con unità dedicate e procedure standardizzate. Tra i descrittori psicoacustici sviluppati in letteratura, tre parametri assumono un ruolo centrale nello studio del paesaggio sonoro: *loudness*, *sharpness* e *roughness*. Essi permettono di quantificare aspetti percettivi legati rispettivamente all'intensità percepita, alla brillantezza spettrale e all'asprezza temporale dei segnali sonori.

Il parametro *loudness*, N (sone), misura la sensazione soggettiva di intensità sonora. A differenza del livello di pressione sonora *SPL*, che rappresenta una grandezza puramente fisica, il *loudness* tiene conto della sensibilità variabile dell'orecchio umano in funzione della frequenza e del

¹⁴ Cfr. S. R. Payne, W. J. Davies e M. D. Adams, "Research into the Practical and Policy Applications of Soundscape Concepts and Techniques in Urban Areas", «Proceedings of the Institute of Acoustics», vol. 31, n. 4, 2009.

livello. Questo parametro si basa sul concetto di bande critiche del sistema uditivo e riflette l'integrazione dello spettro sonoro pesata in base alle curve di uguale intensità percepita. In questo modo, due segnali con lo stesso *SPL* possono presentare valori di *loudness* differenti se varia la loro composizione spettrale, generando percezioni di intensità non equivalenti. Per l'analisi del *soundscape*, il *loudness* fornisce una misura più vicina alla reale esperienza di ascolto, permettendo di stimare l'impatto percettivo complessivo di un ambiente¹⁵. Il valore del *loudness* specifico $N'(z)$, può essere derivata dalla formalizzazione proposta da Zwicker e Fastl¹⁶, calcolato come funzione della distribuzione spettrale di potenza in ciascuna banda critica, pesata rispetto alla sensibilità dell'orecchio umano:

$$N'(z) = \left(\frac{E(z)}{E_0} \right)^{0.23} \quad (1.1)$$

dove:

$N'(z)$: *loudness* specifico per la banda critica di indice z ,

$E(z)$: intensità specifica del segnale nella banda critica z ,

E_0 : intensità di riferimento.

La variabile z rappresenta la posizione lungo la scala Bark, unità psicoacustica che descrive le bande critiche dell'udito umano. L'intervallo da 0 a 24 Bark copre l'intero spettro udibile (circa 20 Hz – 20 kHz), suddiviso in bande critiche.

Il *loudness* totale N si ottiene integrando il *loudness* specifico N' su tutte le bande critiche:

$$N = \int_0^{24} N'(z) dz \quad (1.2)$$

Questo approccio riflette il fatto che il contributo percettivo di ciascuna banda non cresce linearmente con l'intensità fisica, ma secondo una legge di potenza che rappresenta la compressione non lineare del sistema uditivo.

Il termine *sharpness*, S (acum), descrive la brillantezza o acutezza percepita di un suono, associata alla predominanza delle componenti ad alta frequenza. È calcolato come baricentro pesato della distribuzione di *loudness* specifico N' , con pesatura crescente verso le alte frequenze. Suoni caratterizzati da contenuti spettrali superiori ai 2 kHz tendono a presentare valori elevati di *sharpness*,

¹⁵ Cfr. Brian C. J. Moore e Brian R. Glasberg, "A Revision of Zwicker's Loudness Model", «Acta Acustica united with Acustica», vol. 82, n. 2, 1996, pp. 335-345.

¹⁶ Cfr. Hugo Fastl ed Eberhard Zwicker, *Psychoacoustics: Facts and Models*, Berlin, Springer, 2007.

generalmente correlati a percezioni di penetrazione e fastidio. Questo parametro consente di distinguere ambienti con *loudness* simile ma con diversa composizione spettrale. La formulazione è riportata da Zwicker e Fastl ed è standardizzata nella norma DIN 45692:2009¹⁷:

$$S = 0.11 \frac{\int_0^{24} N'(z) g(z) z dz}{\int_0^{24} N'(z) dz} \quad (1.3)$$

dove:

$g(z)$: funzione di pesatura crescente con z .

Il parametro *roughness*, R (asper), quantifica la sensazione di asprezza o ruvidità del suono, prodotta da modulazioni rapide di ampiezza comprese tra 15 e 300 Hz. Tale fenomeno si manifesta come una vibrazione percettiva, che cresce con la profondità e la frequenza della modulazione fino a un massimo attorno a 70 Hz. Valori elevati di *roughness* caratterizzano segnali pulsanti o instabili e sono spesso associati a percezioni negative, quali disturbo o caos sonoro. In un contesto di *soundscape*, questa misura descrive la componente di instabilità acustica che può contribuire alla percezione di disordine. L'Equazione 1.4 consente il calcolo del *roughness* specifico r_i secondo il modello di Daniel e Weber¹⁸:

$$r_i = (g(z_i) m_i k_{i-2} k_i)^2 \quad (1.4)$$

dove:

m_i : grado di modulazione nella banda,

k_{i-2}, k_i : coefficienti di correlazione tra bande critiche adiacenti.

L'Equazione 1.5 descrive il *roughness* totale R ottenuto come somma del *roughness* specifico r_i sui 47 canali della scala di Bark discretizzata con passo 0,5 Bark (centrati tra 0,5 e 23,5 Bark). Tale implementazione numerica consente di descrivere con maggiore dettaglio l'andamento spettrale e di analizzare le correlazioni tra bande adiacenti:

$$R = 0.25 \sum_{i=1}^{47} r_i \quad (1.5)$$

¹⁷ Deutsches Institut für Normung, *DIN 45692:2009. Measurement Technique for the Simulation of the Auditory Sensation of Sharpness*, Berlin, DIN, 2009.

¹⁸ Cfr. P. Daniel e R. Weber, "Psychoacoustical Roughness: Implementation of an Optimized Model", «Acustica», vol. 83, 1997, pp. 113-123.

L'integrazione di tali parametri psicoacustici fornisce una rappresentazione multidimensionale del paesaggio sonoro: il *loudness* traduce l'intensità percepita, lo *sharpness* evidenzia la distribuzione spettrale e la *roughness* caratterizza la variabilità temporale del segnale. La loro combinazione consente di spiegare differenze tra ambienti sonori e di collegare giudizi percettivi e grandezze oggettive.

La Tabella 1.2 riassume i parametri psicoacustici trattati descrivendo l'aspetto percettivo associato e la relativa unità di misura.

Tabella 1.2 – Principali parametri psicoacustici per la descrizione del paesaggio sonoro.

Parametro	Descrizione	Unità di misura
<i>Loudness</i>	Intensità percepita in funzione della frequenza e del livello	sones
<i>Sharpness</i>	Brillantezza/acutezza legata alla prevalenza di alte frequenze	acum
<i>Roughness</i>	Asprezza/ruvidità dovuta alla variabilità temporale del segnale	asper

La relazione tra misure acustiche oggettive e valutazioni soggettive non può essere intesa come un legame diretto e deterministico. Valori simili di parametri psicoacustici possono condurre a percezioni differenti, in funzione di fattori contestuali, culturali e funzionali dello spazio. Per questo motivo, l'analisi del *soundscape* si avvale di approcci statistici che consentono di indagare le correlazioni tra dati fisici e giudizi percettivi, riducendo la variabilità individuale e mettendo in evidenza tendenze comuni. Queste relazioni rafforzano la validità scientifica dell'analisi percettivo-oggettiva e consentono di costruire modelli predittivi a supporto della progettazione acustica degli spazi urbani e culturali, orientandola non soltanto alla riduzione del rumore, ma alla valorizzazione della qualità sonora percepita. In questo modo, l'integrazione tra i diversi parametri produce una lettura più articolata e completa, capace di cogliere sfumature percettive che emergono soltanto attraverso l'analisi congiunta e che risultano essenziali per comprendere appieno la complessità dei contesti acustici reali. Per rendere operativa questa integrazione, è quindi fondamentale disporre di tecniche di acquisizione e metodi di correlazione in grado di mettere in relazione i dati oggettivi con le valutazioni soggettive.

1.2 Tecniche di acquisizione e analisi dei dati percettivi e fisici

L'analisi del paesaggio sonoro richiede l'impiego di tecniche che consentano di raccogliere dati percettivi e oggettivi in modo sistematico e confrontabile. In questo sottocapitolo vengono descritte le principali metodologie operative per la valutazione del *soundscape*, con particolare attenzione a tre aspetti:

1.2.1 Questionari standardizzati,

1.2.2 RegISTRAZIONI binaurali,

1.2.3 Strumenti di analisi,

1.2.4 Integrazione tra percezioni soggettive e misure oggettive.

Queste tecniche costituiscono la base per integrare dimensione soggettiva e misurazioni oggettive, permettendo un'analisi completa e scientificamente corretta del paesaggio sonoro.

1.2.1 Questionari standardizzati

I questionari standardizzati costituiscono il principale strumento per la raccolta delle valutazioni soggettive nei contesti di analisi del paesaggio sonoro. Essi permettono di tradurre le percezioni individuali in dati strutturati, fornendo una base confrontabile e replicabile a livello internazionale (ISO/TS 12913-2:2018).

La parte 2 della norma ISO 12913 stabilisce che i questionari per la raccolta dei dati sul paesaggio sonoro debbano includere principalmente domande chiuse, formulate in modo da garantire la confrontabilità dei risultati tra diversi studi e contesti. Le domande aperte possono essere utilizzate in aggiunta, ma solo come supporto qualitativo per raccogliere osservazioni spontanee dei partecipanti, non come nucleo principale dello strumento. L'utilizzo delle domande aperte infatti, risulta particolarmente utile quando si vuole indagare aspetti culturali e linguistici specifici del paesaggio sonoro in esame. La normativa inoltre propone un'articolazione modulare del questionario, le domande sono organizzate in blocchi coerenti che seguono un ordine logico: inizialmente l'individuazione delle sorgenti percepite, poi gli attributi qualitativi, seguiti dal giudizio complessivo e dalla valutazione dell'appropriatezza rispetto al contesto. Questo ordine è pensato per guidare il partecipante da osservazioni più analitiche e descrittive a valutazioni sintetiche e contestuali, minimizzando fenomeni di influenza reciproca tra le risposte.

La scelta della scala di risposta è un aspetto fondamentale nella progettazione dei questionari, poiché influenza sia la qualità dei dati raccolti sia la loro confrontabilità tra diversi studi. La ISO/TS 12913-2:2018 raccomanda l'impiego di scale standardizzate che riducano al minimo l'ambiguità interpretativa e consentano un'analisi statistica robusta. Le scale Likert a 5 o 7 punti rappresentano la

soluzione più diffusa per misurare il grado di accordo o l'intensità di una percezione. Esse permettono di trasformare valutazioni soggettive in dati numerici ordinati, facilitando il confronto tra individui e contesti. Studi metodologici hanno dimostrato che un numero limitato di punti rappresenta un buon compromesso tra sensibilità della misura e facilità di utilizzo da parte dei partecipanti¹⁹. Per la valutazione di attributi qualitativi contrapposti come ad esempio piacevole/spiacevole, o calmo/caotico, vengono impiegate scale semantico-differenziali. In questo caso al partecipante viene richiesto di collocarsi lungo un continuum tra due estremi, esprimendo in che misura l'ambiente sonoro tende verso un polo o l'altro. La Tabella 1.3 sintetizza la struttura tipica dei questionari previsti dalla ISO/TS 12913-2, riportando le sezioni, la tipologia di domanda e la relativa scala di risposta.

Tabella 1.3 – Struttura tipica dei questionari per l'analisi del paesaggio sonoro (ISO/TS 12913-2:2018).

Sezione	Tipologia di domanda	Scala
Identificazione delle sorgenti sonore	Domanda chiusa	Scelta multipla
Attributi qualitativi	Domanda chiusa	Scala semantico-differenziale
Giudizio complessivo sulla qualità sonora	Domanda chiusa	Scala Likert
Appropriatezza rispetto al contesto	Domanda chiusa	Scala Likert
Osservazioni aggiuntive	Domanda aperta	Risposta libera

La somministrazione dei questionari per l'analisi del paesaggio sonoro può avvenire secondo diverse modalità, che riflettono approcci metodologici e obiettivi di ricerca distinti. La norma ISO/TS 12913-2:2018 definisce le linee guida per garantire uniformità e comparabilità dei dati, indicando tre contesti principali: in situ, post-ascolto in laboratorio e *soundwalks*.

La modalità in situ prevede che i partecipanti compilino il questionario direttamente all'interno dell'ambiente sonoro da analizzare, restando in un punto fisso per un periodo limitato di tempo. L'obiettivo è cogliere l'esperienza percettiva immediata legata a un preciso contesto spaziale e temporale. Questo metodo è utile per documentare la qualità sonora percepita in luoghi specifici come ad esempio una piazza o un cortile, e restituisce valutazioni strettamente ancorate alle condizioni contingenti. I limiti principali sono dovuti principalmente alla variabilità ambientale e all'assenza di una visione complessiva di aree più estese²⁰.

¹⁹ Cfr. K.-M. Loewenthal, *An Introduction to Psychological Tests and Scales*, Hove, Psychology Press, 2001.

²⁰ Cfr. A. L. Brown, J. Kang e T. Gjestland, "Towards Standardization in Soundscape Preference Assessment", *«Applied Acoustics»*, vol. 72, n. 6, 2011, pp. 387-392.

Durante la somministrazione post-ascolto in laboratorio, invece, i partecipanti ascoltano registrazioni sonore (spesso realizzate con tecniche binaurali) in condizioni acustiche controllate e compilano successivamente il questionario. Ciò permette di confrontare diversi scenari sonori eliminando la variabilità dovuta a fattori esterni, garantendo una maggiore ripetibilità sperimentale. Tuttavia, la riproduzione in laboratorio può ridurre la fedeltà dell'esperienza reale, poiché la percezione del paesaggio sonoro non dipende solo dall'udito ma anche da componenti visive, sociali e contestuali.

Infine, il *soundwalk* rappresenta una metodologia distinta rispetto al metodo in situ, pur svolgendosi anch'esso in ambiente reale. A differenza della permanenza in un singolo punto, il *soundwalk* prevede un percorso prestabilito con più stazioni di ascolto (*spot*). Durante il cammino, i partecipanti si fermano in ciascun punto, ascoltano attivamente per un periodo prefissato tipicamente di circa 2–5 minuti e compilano il questionario. La scelta dei punti di sosta è un aspetto metodologico fondamentale: essi devono rappresentare la varietà delle sorgenti sonore presenti nell'area e includere tipologie di spazi con funzioni d'uso differenziate, garantendo al tempo stesso sicurezza e accessibilità. Studi applicativi suggeriscono un numero tipico di 6–10 punti di ascolto distribuiti lungo un percorso della durata complessiva di 20–40 minuti, così da mantenere un equilibrio tra rappresentatività dei dati e capacità di attenzione degli osservatori²¹. Questo approccio consente di mappare le variazioni spaziali della qualità sonora nell'ambiente studiato, favorisce un ascolto intenzionale e comparativo che rende più evidente le differenze tra i vari punti, e integra le percezioni individuali con quelle collettive, permettendo di analizzare convergenze e divergenze nelle valutazioni all'interno dello stesso contesto²². Il *soundwalk* si è affermato come uno degli strumenti più efficaci per la ricerca sul *soundscape*, poiché permette di combinare dati quantitativi (questionari standardizzati) con osservazioni qualitative, ed è stato ampiamente utilizzato per valutare la qualità sonora in progetti di pianificazione urbana e di valorizzazione degli spazi pubblici²³. Le principali modalità di somministrazione dei questionari, con i rispettivi vantaggi e limiti, sono riassunte nella Tabella 1.4.

²¹ Cfr. M. Çağlar, "Soundwalking: A Methodological Suggestion for Studying the Urban Areas", «Akademik Aç», vol. 1, n. 1, 2021, pp. 5-30.

²² Cfr. J. L. Drever, "Listening as Methodological Tool: Sounding Soundwalking", *Soundwalking Methodology Guide*, 2019.

²³ Cfr. M. Adams, N. Bruce, W. Davies, R. Cain, P. Jennings e A. Carlyle, "Soundwalking as a Methodology for Understanding Soundscapes", «Proceedings of the Institute of Acoustics», 2008.

Tabella 1.4 – Modalità di somministrazione dei questionari per l’analisi del paesaggio sonoro (ISO/TS 12913-2:2018).

Modalità	Descrizione	Vantaggi	Limiti
In situ	Compilazione in un punto fisso nell’ambiente sonoro	Immediatezza e aderenza alla realtà	Variabilità ambientale e visione limitata
Post-ascolto in laboratorio	Compilazione dopo l’ascolto in laboratorio	Ripetibilità e confronto tra scenari	Ridotta fedeltà dell’esperienza reale
<i>Soundwalk</i>	Compilazione ad ogni sosta lungo il percorso prestabilito	Mappatura spaziale, immediatezza, aderenza alla realtà e comparabilità	Maggior tempo e impegno organizzativo

1.2.2 RegISTRAZIONI binaurali

Le registrazioni binaurali rappresentano la tecnica di riferimento per l’acquisizione dei parametri fisici e psicoacustici, in quanto consentono di riprodurre fedelmente l’esperienza percettiva umana registrando il campo sonoro così come viene ricevuto dall’apparato uditivo. Esse permettono di catturare non solo la pressione sonora, ma anche le modificazioni introdotte dalla morfologia della testa e del padiglione auricolare, preservando le caratteristiche spaziali indispensabili alla localizzazione tridimensionale delle sorgenti durante la riproduzione in cuffia²⁴. A differenza delle registrazioni monofoniche, limitate a un solo canale, e di quelle stereofoniche, che restituiscono una spazialità ridotta al piano orizzontale, le registrazioni binaurali offrono una rappresentazione più completa e realistica della scena acustica, includendo direzione, distanza e movimento delle sorgenti, e risultano lo strumento più idoneo per lo studio del paesaggio sonoro²⁵.

L’impiego delle registrazioni binaurali negli studi di *soundscape* risponde a due esigenze principali: documentare fedelmente l’ambiente sonoro in condizioni reali, creando un archivio confrontabile, e ricreare in laboratorio esperienze di ascolto comparabili a quelle in situ, necessarie per la somministrazione di questionari in condizioni controllate²⁶. Tale approccio è coerente con la normativa ISO 12913, che sottolinea l’importanza di integrare misurazioni oggettive e valutazioni soggettive mantenendo la coerenza percettiva tra i due ambiti.

²⁴ Cfr. H. Møller, M. F. Sørensen, C. B. Jensen e D. Hammershøi, “Binaural Technique: Do We Need Individual Recordings?”, «Journal of the Audio Engineering Society», vol. 43, n. 6, 1995, pp. 448-460.

²⁵ Cfr. D. R. Begault, *3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia*, Academic Press, 2000.

²⁶ Cfr. C. Guastavino, B. Katz, J. Polack, D. J. Levitin e D. Dubois, “Ecological Validity of Soundscape Reproduction”, «Acta Acustica united with Acustica», vol. 91, n. 2, 2005, pp. 333-341.

Le registrazioni binaurali possono essere effettuate con differenti dispositivi, che si distinguono per grado di fedeltà percettiva e possibilità di standardizzazione dei dati.

I microfoni *in-ear*, Figura 1.1a, indossati direttamente dal partecipante, consentono di documentare l'esperienza sonora dal punto di vista individuale, includendo le caratteristiche anatomiche personali dell'orecchio. Questa soluzione restituisce una rappresentazione ecologica, ma presenta il limite di non essere comparabile tra diversi soggetti, riducendo l'applicabilità in studi a carattere sistematico.

Un approccio intermedio è rappresentato dai dispositivi compatti, Figura 1.1b, costituiti da due capsule microfoniche montate su supporti di piccole dimensioni. Essi offrono vantaggi pratici in termini di portabilità e semplicità d'uso, ma non garantiscono una riproduzione accurata della spazialità, risultando quindi meno adatti quando l'obiettivo è mantenere la coerenza percettiva in studi comparativi.

Le teste artificiali, Figura 1.1c, costituiscono invece lo strumento di riferimento negli studi scientifici sul *soundscape*. Dotate di microfoni posizionati nei condotti uditivi e progettate per replicare le caratteristiche geometriche della testa e del torso, esse permettono di preservare con elevata fedeltà le caratteristiche spaziali necessarie alla localizzazione delle sorgenti sonore²⁷. L'elevato grado di standardizzazione e la ripetibilità dei risultati rendono queste soluzioni le più affidabili per analisi comparabili a livello internazionale. I principali limiti restano i costi elevati e l'ingombro operativo, che possono complicarne l'impiego in contesti urbani complessi.

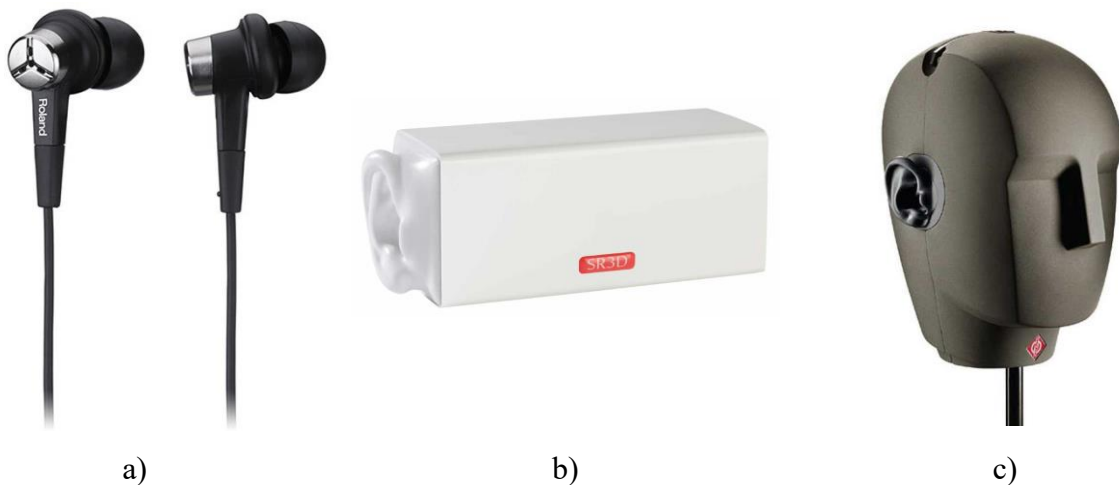


Figura 1.1 – Esempi di configurazioni tipiche di microfoni binaurali: a) microfoni *in-ear*, b) microfoni compatti, c) microfoni con testa artificiale.

²⁷ Cfr. H. Møller, D. Hammershøi, C. B. Jensen e M. F. Sørensen, "Evaluation of Artificial Heads in Listening Tests", «Journal of the Audio Engineering Society», vol. 44, n. 6, 1996, pp. 445-469.

Le teste artificiali, riproducendo la morfologia della testa, del busto e del padiglione auricolare, permettono di simulare fedelmente la percezione uditiva umana e la localizzazione tridimensionale delle sorgenti. Le proprietà fisiche di queste strutture modificano il segnale incidente prima che raggiunga la membrana timpanica. L'insieme di tali modificazioni è descritto dalle *Head-Related Transfer Functions* (HRTF), che rappresentano matematicamente la relazione tra il suono incidente e quello percepito dall'orecchio umano²⁸.

Un primo meccanismo fondamentale è costituito dalle alterazioni spettrali, dovute alla diffrazione e riflessione del suono sulle strutture anatomiche esterne. Il padiglione auricolare introduce variazioni di ampiezza e fase che dipendono dalla direzione di provenienza del segnale, generando picchi e cancellazioni nello spettro di frequenza percepito. Queste cancellazioni spettrali consentono all'ascoltatore di distinguere con precisione la posizione della sorgente lungo l'asse verticale²⁹.

Le differenze temporali interaurali (ITD) rappresentano il ritardo con cui un fronte d'onda raggiunge i due orecchi. Un suono che proviene lateralmente raggiunge prima l'orecchio più vicino e, dopo un intervallo di tempo proporzionale alla distanza interaurale, quello opposto. Questo indizio è particolarmente rilevante alle basse frequenze ($\leq 1,5$ kHz), per le quali la lunghezza d'onda è superiore alla distanza tra le orecchie e le differenze di fase sono elaborabili dal sistema uditivo³⁰.

Le differenze interaurali di livello (ILD) indicano invece la variazione di intensità del suono percepito tra i due orecchi. Esse sono dovute all'effetto di schermatura esercitato dalla testa, che blocca parte dell'energia sonora generando un'ombra acustica sull'orecchio opposto. Questo indizio è particolarmente rilevante alle alte frequenze ($> 1,5$ kHz), nelle quali la lunghezza d'onda è confrontabile o inferiore alle dimensioni della testa.

L'integrazione delle alterazioni spettrali con le differenze temporali ITD e di livello interaurale ILD consente al sistema uditivo di elaborare una rappresentazione spaziale tridimensionale dell'ambiente acustico, condizione che le teste artificiali sono in grado di riprodurre fedelmente.

Per garantire validità scientifica e confrontabilità dei dati, le registrazioni binaurali devono seguire protocolli standardizzati che assicurino condizioni operative omogenee e limitino l'influenza di variabili esterne (ISO/TS 12913-2:2018). Nello studio del *soundscape*, la testa artificiale viene

²⁸ Cfr. J. Blauert, *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*, MIT Press, 1997.

²⁹ Cfr. J. C. Middlebrooks e D. M. Green, "Sound Localization by Human Listeners", «Annual Review of Psychology», vol. 42, n. 1, 1991, pp. 135-159.

³⁰ Cfr. E. A. Macpherson e J. C. Middlebrooks, "Listener Weighting of Cues for Lateral Angle: The Duplex Theory of Sound Localization Revisited", «Journal of the Acoustical Society of America», vol. 111, n. 5, 2002, pp. 2219-2236.

solitamente posizionata all'altezza media dell'orecchio umano (1,50–1,60 m) e orientata frontalmente, così da simulare la prospettiva di un ascoltatore tipico; eventuali variazioni di altezza o orientamento sono ammesse se adeguatamente documentate per garantirne la replicabilità. La durata delle registrazioni deve essere sufficiente a rappresentare il contesto acustico: studi applicativi raccomandano almeno 1–2 minuti per punto di misura, estendibili fino a 5 minuti in ambienti complessi o caratterizzati da forte variabilità temporale. È inoltre necessario considerare fattori esterni che possono alterare la qualità del segnale, come vento o rumori imprevisti, e registrare metadati ambientali (ora, data, densità di persone). Infine, la replicabilità richiede la documentazione completa di luogo, durata, posizionamento e caratteristiche dello strumento, così da consentire il confronto dei dati e la loro integrazione con le valutazioni soggettive raccolte mediante questionari standardizzati.

1.2.3 Strumenti di analisi

Le registrazioni binaurali forniscono segnali acustici grezzi nel dominio del tempo, che devono essere convertiti in indicatori quantitativi per descrivere in modo sintetico e confrontabile il paesaggio sonoro. L'elaborazione tramite software dedicati, come ArtemiS Suite di HEAD Acoustics³¹, consente di estrarre parametri fisici e psicoacustici, essenziali per correlare misure oggettive e percezioni soggettive.

L'analisi nel dominio del tempo costituisce il passaggio iniziale per lo studio dei dati raccolti. Le registrazioni binaurali producono due segnali distinti, corrispondenti ai canali sinistro e destro, che riflettono la pressione sonora istantanea rilevata nei punti corrispondenti ai timpani dell'ascoltatore. La rappresentazione grafica di tali segnali, nota come *waveform*, consente di valutare la distribuzione temporale degli eventi sonori, l'intensità relativa e l'asimmetria tra i due canali. Nella forma d'onda si osservano differenze tra i due segnali, dovute alla posizione della sorgente sonora rispetto alla testa binaurale. Se un evento sonoro proviene lateralmente, esso raggiungerà prima l'orecchio più vicino e con un livello di pressione maggiore, generando differenze temporali ITD e di intensità ILD chiaramente riconoscibili nel dominio del tempo. Pur non fornendo informazioni spettrali, l'analisi temporale è utile per individuare eventi impulsivi o transitori, monitorare l'andamento del rumore di fondo e le variazioni di intensità, e riconoscere fenomeni di mascheramento temporale, in cui suoni più intensi coprono segnali deboli simultanei. La Figura 1.2 mostra l'andamento pressione-tempo, con il segnale del canale sinistro in verde e quello destro in

³¹ HEAD acoustics GmbH, "ArtemiS Suite (versione 15.2) – Software", reperibile su [<https://www.head-acoustics.com>]

rosso, evidenziando le differenze di risposta a un singolo evento acustico. Il grafico consente inoltre di riconoscere la presenza di eventi impulsivi.

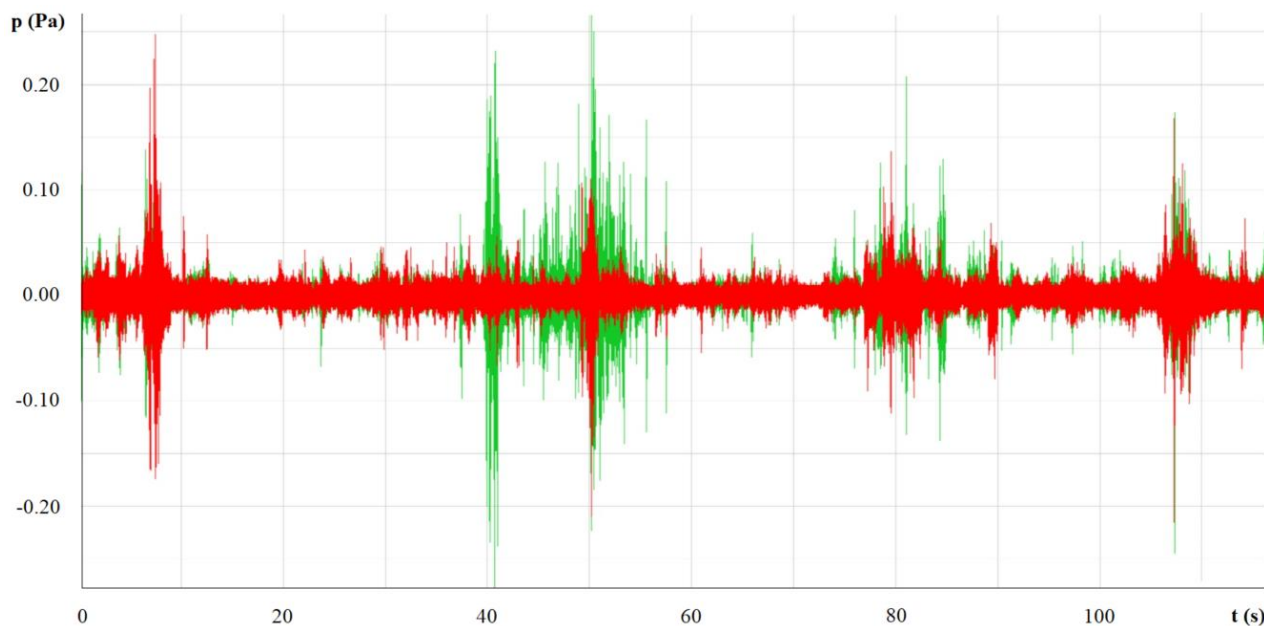


Figura 1.2 – Andamento pressione-tempo dei canali sinistro (verde) e destro (rosso), con evidenza delle differenze interaurali e della presenza di eventi impulsivi.

La rappresentazione del segnale acustico nel solo dominio temporale fornisce informazioni limitate, poiché mostra l'andamento della pressione sonora nel tempo senza evidenziare come l'energia sia distribuita sulle diverse frequenze. È necessario dunque utilizzare la trasformata di Fourier applicata su finestre temporali (FFT). Questo procedimento consente di scomporre il segnale in componenti spettrali, e permette di ricostruire l'evoluzione della distribuzione energetica nel tempo. In questo modo è possibile osservare non soltanto la variazione di intensità, ma anche il contenuto frequenziale che caratterizza ciascun evento acustico.

L'analisi spettrale consente infatti di distinguere la natura delle sorgenti sonore in base al loro contenuto frequenziale: i segnali a banda larga (traffico, vento) si distribuiscono su ampi intervalli di frequenza; le sorgenti tonali (campane, strumenti musicali) producono componenti concentrate e persistenti; gli eventi impulsivi (colpi, urti) si manifestano invece come picchi di breve durata estesi sull'intero spettro. Questa capacità di discriminazione è particolarmente rilevante nello studio del *soundscape*, dove la percezione globale deriva dalla sovrapposizione di contributi eterogenei.

La Figura 1.3 mostra lo spettrogramma, rappresentazione grafica fondamentale per l'analisi spettrale del segnale acustico registrato.

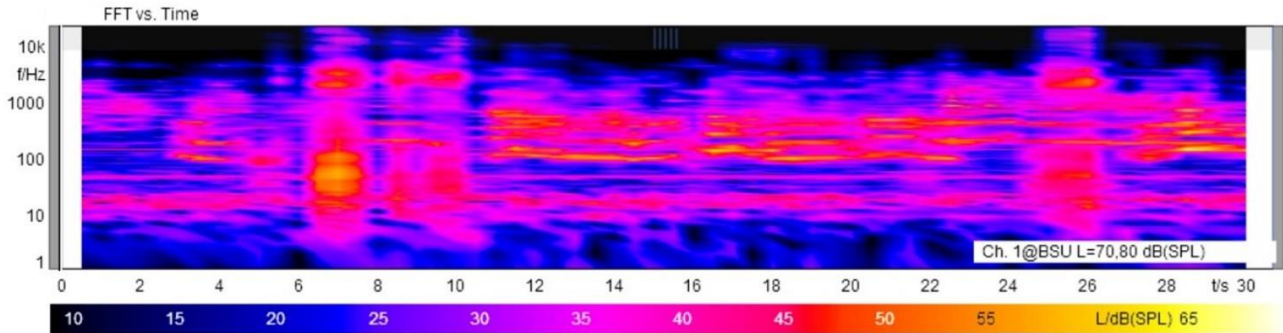


Figura 1.3 – Spetrogramma del segnale registrato: l’asse verticale riporta la frequenza (Hz) in scala logaritmica, l’asse orizzontale il tempo (s), mentre la scala cromatica rappresenta il livello di pressione sonora *SPL* in dB.

Il valore metodologico dello spettrogramma risiede nella capacità di integrare dimensione temporale e frequenziale, offrendo una lettura sintetica della complessità sonora di un ambiente. Pur essendo uno strumento descrittivo, esso costituisce la base per analisi quantitative più avanzate, come il calcolo dei parametri psicoacustici e dei livelli statistici di pressione sonora.

Tra i principali parametri ricavati dall’elaborazione delle registrazioni binaurali vi sono i livelli di pressione sonora *SPL*, misurati in decibel (dB), grandezze fisiche fondamentali per descrivere l’energia acustica, che consentono valutazioni comparative e collegamenti con le condizioni percettive degli osservatori ISO12913–3:2019.

Il livello equivalente ponderato A, L_{Aeq} , esprime l’energia sonora media, calcolata su un intervallo temporale definito e filtrata secondo la curva di ponderazione A, che simula la sensibilità dell’orecchio umano alle diverse frequenze. Si tratta del parametro più comunemente utilizzato per descrivere l’esposizione sonora e per confrontare ambienti diversi in termini di intensità percepita.

Il livello equivalente ponderato C, L_{Ceq} , si distingue dal precedente per l’impiego della curva di ponderazione C, caratterizzata da una risposta alle basse frequenze. Questo parametro è particolarmente utile quando si intende analizzare componenti sonore a bassa frequenza, che incidono significativamente sulla percezione di vibrazioni e sul comfort acustico³².

Oltre ai valori equivalenti, l’analisi dei livelli statistici consente di descrivere la distribuzione temporale del segnale acustico. Il parametro L_{95} , superato nel 95% del tempo di misurazione, rappresenta il livello sonoro di fondo stabile che caratterizza l’ambiente acustico e definisce l’intensità minima del segnale. Al contrario, L_5 , superato solo nel 5% del tempo, quantifica i valori di *SPL* associati agli eventi energeticamente più intensi, fornendo un’indicazione oggettiva dei picchi

³² Cfr. B. C. J. Moore, *An Introduction to the Psychology of Hearing* (6th ed.), Brill, 2013.

acustici presenti nell'ambiente sonoro. L'analisi congiunta di L_{95} e L_5 permette di delineare l'escursione dinamica oggettiva del segnale, espressa in termini energetici e misurata in dB³³.

La Tabella 1.5 riporta i principali parametri fisici ottenuti dall'analisi acustica software.

Tabella 1.5 – Parametri fisici ottenuti dall'elaborazione con software di analisi acustica, con relative descrizioni e significato applicativo.

Parametro	Descrizione	Significato applicativo
L_{Aeq}	Livello equivalente ponderato A	Energia sonora media percepita secondo la sensibilità umana
L_{Ceq}	Livello equivalente ponderato C	Energia sonora media pesata alle basse frequenze
L_{95}	Livello superato nel 95% del tempo	Rumore di fondo
L_5	Livello superato nel 5% del tempo	Livello dei picchi energetici

Accanto ai livelli di pressione sonora, i software di analisi calcolano parametri psicoacustici che, oltre al valore medio, descrivono anche la variabilità temporale e l'escursione dinamica del segnale acustico.

Il parametro *Loudness Average*, N_{avg} , rappresenta la media temporale del *loudness* lungo l'intera registrazione e sintetizza la sensazione sonora complessiva percepita nell'ambiente.

Il valore *Loudness Cubic Mean*, N_{rmc} , corrisponde alla media cubica del *loudness* ed è maggiormente sensibile ai picchi rispetto alla media aritmetica. Questo parametro evidenzia la presenza di eventi intensi che, pur non predominando nella durata totale, influenzano significativamente la percezione.

I parametri N_5 e N_{95} rappresentano rispettivamente i valori di *loudness* superati per il 5% e per il 95% del tempo di misurazione. N_5 rappresenta la soglia percettiva superiore, ossia la sensazione uditiva con cui i suoni più dominanti vengono avvertiti dall'ascoltatore. L'indice N_{95} , invece, identifica il valore minimo di *loudness* avvertito anche nelle condizioni più quiete. Il rapporto N_5/N_{95} costituisce un indicatore sintetico della variabilità del *loudness* e consente di caratterizzare l'escursione percettiva della sensazione sonora di un ambiente: valori elevati segnalano una forte differenza di esperienza uditiva tra picchi e fondo sonoro, mentre valori più contenuti indicano una percezione sonora più stabile e uniforme.

L'indicatore percentile S_5 identifica i valori di *sharpness* superati solo per il 5% del tempo, corrispondenti alle componenti più acute e concentrate nelle alte frequenze del segnale, mentre S_{95}

³³ Cfr. M. Barron, *Auditorium Acoustics and Architectural Design* (2nd ed.), Spon Press, 2009.

rappresenta il livello di base, superato nel 95% del tempo, e descrive le condizioni di acutezza più stabili e ricorrenti dell'ambiente sonoro.

Il valore statistico R_{10} indica il livello di *roughness* superato per almeno il 10% del tempo di osservazione. Esso evidenzia la presenza di modulazioni rapide di ampiezza o frequenza che si manifestano in modo ricorrente nel segnale, fornendo un'indicazione oggettiva della componente temporale irregolare del campo sonoro. Valori elevati di R_{10} denotano quindi un contenuto significativo di fluttuazioni rapide, tipiche di segnali complessi, e permettono di caratterizzare quantitativamente la variabilità della modulazione acustica. Il parametro R_{50} , invece, corrisponde al valore mediano della *roughness*, ossia al livello superato per il 50% del tempo di misurazione. Esso fornisce una misura stabile e rappresentativa della tendenza centrale delle fluttuazioni temporali del segnale, risultando utile per sintetizzare il comportamento tipico delle modulazioni rapide.

La Tabella 1.6 presenta una sintesi dei principali parametri psicoacustici ottenuti mediante i software di analisi acustica, includendo la descrizione e il loro significato applicativo nello studio del paesaggio acustico.

Tabella 1.6 – Parametri psicoacustici calcolati dai software di analisi acustica, con relative descrizioni e significati applicativi sintetici.

Parametro	Descrizione	Significato applicativo
N_{avg}	Media temporale del <i>loudness</i>	Intensità media percepita
N_{rmc}	Media cubica del <i>loudness</i>	Enfatizza i picchi intensi
N_5	Valore di <i>loudness</i> superato nel 5% del tempo	Eventi di massima percezione sonora
N_{95}	Valore di <i>loudness</i> superato nel 95% del tempo	Valore minimo di <i>loudness</i> percepito
N_5/N_{95}	Rapporto tra N_5 e N_{95}	Indicatore della variabilità percettiva
S	Valore totale di <i>sharpness</i>	Percezione complessiva di acutezza
S_5	<i>Sharpness</i> superato nel 5% del tempo	Eventi sonori acuti ad alta frequenza
S_{95}	<i>Sharpness</i> superato nel 95% del tempo	Livello di acutezza di base stabile percepito
R	Valore totale di <i>roughness</i>	Percezione complessiva di asprezza
R_{10}	<i>Roughness</i> superata nel 10% del tempo	Condizioni ricorrenti di asprezza
R_{50}	<i>Roughness</i> mediana	Asprezza tipica/mediana

1.2.4 Integrazione tra percezioni soggettive e misure oggettive

Negli studi sul paesaggio sonoro, un aspetto fondamentale è la correlazione tra dati percettivi e dati fisici³⁴. I questionari strutturati raccolgono valutazioni soggettive sulla qualità e l'appropriatezza del paesaggio sonoro, mentre le registrazioni binaurali e l'analisi psicoacustica forniscono valori numerici oggettivi (*SPL*, *loudness*, *sharpness* e *roughness*). Poiché le due dimensioni non coincidono automaticamente, il ruolo dei modelli analitici e statistici non è predire con precisione matematica la percezione, ma fornire criteri sistematici di confronto che consentano di ridurre la distanza tra osservazione soggettiva e misurazione strumentale. L'obiettivo è definire un quadro teorico in cui i dati percettivi siano resi confrontabili attraverso scale numeriche normalizzate, i parametri oggettivi vengano scelti in funzione della loro rilevanza psicoacustica e la relazione tra i due insiemi sia analizzata secondo criteri di coerenza e replicabilità.

La forma più comune di integrazione tra dati percettivi e oggettivi si realizza tramite analisi descrittive, che consentono di individuare tendenze generali e di rendere comparabili i due insiemi di informazioni. I giudizi raccolti tramite questionari vengono sintetizzati con strumenti statistici di base, come medie e deviazioni standard, che permettono di ottenere una misura della centralità e della dispersione delle valutazioni soggettive. I parametri acustici e psicoacustici invece, vengono rappresentati tramite valori medi, mediane e percentili, così da restituire una descrizione più completa della distribuzione temporale del segnale e renderli direttamente confrontabili con le valutazioni percettive.

In questo processo è fondamentale la normalizzazione delle scale, necessaria per mettere in relazione valutazioni soggettive (tipicamente espresse in scale ordinali da -2 a +2 o da 0 a 4), con parametri oggettivi caratterizzati da unità eterogenee (dB, sone, asper, acum). Questa operazione consente di costruire rappresentazioni comuni, come grafici radar o istogrammi comparativi, che costituiscono un collegamento immediato tra percezione e misura e rendono possibile un confronto e un'analisi coerente dei dati.

Il confronto tra misure oggettive e giudizi percettivi può generare tre principali esiti interpretativi. Il primo è la coerenza, condizione in cui i valori numerici e le valutazioni soggettive convergono, delineando una rappresentazione univoca dello scenario sonoro. Il secondo è la discrepanza, che emerge quando le misure strumentali non risultano in accordo con le percezioni, mettendo in evidenza un divario tra ciò che viene registrato e ciò che viene descritto dagli ascoltatori. Il terzo esito è la complementarità, che si verifica quando misure e percezioni descrivono aspetti

³⁴ Cfr. F. Aletta, J. Kang e Ö. Axelsson, "Soundscape Descriptors and a Conceptual Framework for Developing Predictive Soundscape Models", «Landscape and Urban Planning», vol. 149, 2016, pp. 65-74.

differenti, ma non incompatibili, dello stesso scenario sonoro. In questo caso, i dati fisici e soggettivi non si oppongono, bensì forniscono prospettive diverse che, combinate, offrono una rappresentazione più completa della scena acustica. Questa triplice struttura interpretativa consente di analizzare in modo sistematico la relazione tra dimensione oggettiva e percettiva, riducendo il rischio di letture ridondanti o semplificate e garantendo una valutazione più completa e articolata del paesaggio sonoro. Quando i risultati convergono si rafforza l'interpretazione, quando divergono si aprono spazi di analisi più complessi, e nei casi complementari emerge una rappresentazione multidimensionale della scena.

Alcuni parametri oggettivi ricorrono con maggiore frequenza perché risultano più efficaci nel descrivere aspetti della percezione sonora. Questi indici non spiegano in maniera esauriente i giudizi soggettivi, ma rappresentano indicatori interpretativi che aiutano a collegare misure e valutazioni.

Un primo indicatore è il differenziale $L_{Ceq}-L_{Aeq}$, che quantifica l'apporto delle basse frequenze. Valori elevati sono associati alla predominanza di sorgenti acustiche a bassa frequenza, come il traffico distante o i sistemi meccanici di fondo. Dal punto di vista percettivo, ciò può tradursi in sensazioni di monotonia o pesantezza e spesso accompagnate da una riduzione della piacevolezza.

Indicatori come la differenza L_5-L_{95} e il rapporto N_5/N_{95} risultano spesso correlati alla percezione soggettiva della variabilità sonora. Valori moderati tendono ad associarsi a sensazioni di vivacità e stimolazione, mentre oscillazioni ampie sono generalmente percepite come caos o complessità sonora difficilmente prevedibile.

Valori elevati di *sharpness*, S , sono generalmente associati a sensazioni di fastidio o sgradevolezza, anche quando i livelli di *loudness* medi, N_{avg} e N_{rmc} , non risultano particolarmente elevati. In termini percettivi, un incremento dello *sharpness* riduce il gradimento complessivo del paesaggio acustico e tende ad accentuare la percezione di complessità o disordine, soprattutto in ambienti già caratterizzati da un'elevata variabilità sonora. Il percentile S_5 , se elevato, evidenzia episodi isolati ma penetranti che possono disturbare anche in un contesto altrimenti stabile. L'indicatore S_{95} invece, se alto, è associabile a una percezione di fastidio persistente e costante.

Valori elevati di *roughness*, R , sono generalmente associati a una sensazione di fastidio e a un incremento della fatica uditiva, soprattutto in contesti complessi o prolungati. Sul piano percettivo, un aumento del *roughness* segnala una scena acustica meno gradevole e più impegnativa da elaborare, poiché caratterizzata da stimoli che rendono difficile un ascolto rilassato o confortevole. In tal senso, *roughness* elevato può tradursi in una percezione di caos o di sovraccarico sonoro, anche quando i livelli energetici SPL complessivi non sono particolarmente alti. Il parametro R_{10} , se presenta valori elevati, indica solitamente condizioni disturbanti e ricorrenti, generalmente associate a un maggiore rischio di affaticamento uditivo e a una percezione acustica meno confortevole. L'indice R_{50} invece,

quando presenta valori elevati, spesso segnala che la scena sonora è globalmente caratterizzata da un contenuto vibrante e affaticante, non limitato a episodi isolati. Tale parametro è impiegato come descrittore delle condizioni percepite come più ruvide o aspre.

La Tabella 1.7 propone una sintesi delle corrispondenze comunemente osservate in letteratura tra i parametri oggettivi e le valutazioni soggettive. La tabella non ha valore deterministico, ma evidenzia quali percezioni tendono a emergere in relazione a specifici indicatori acustici.

Tabella 1.7 – Relazioni tra parametri oggettivi/psicoacustici e percezioni soggettive tipiche del paesaggio sonoro.

Parametro	Aspetto fisico misurato	Percezione soggettiva associata
$L_{Ceq}-L_{Aeq}$	Presenza di componenti a bassa frequenza	Monotonia, pesantezza e riduzione della gradevolezza
L_5-L_{95} N_5/N_{95}	Variabilità di SPL e N	Percezione di caos e discontinuità
S_5	Episodi di forte acutezza	Fastidio transitorio e penetrante
S_{95}	Acutezza costante di fondo	Fastidio continuo e minore piacevolezza complessiva
R_{10}	Condizioni ricorrenti di asprezza	Suono ruvido e fatica uditiva frequente
R_{50}	Valore complessivo del <i>roughness</i>	Ambiente globalmente vibrante e affaticante

L'analisi integrata tra dati oggettivi e percezioni soggettive fornisce una descrizione articolata del paesaggio sonoro, ma presenta anche limiti metodologici. Un primo aspetto riguarda la variabilità individuale delle risposte ai questionari: fattori come età, sensibilità uditiva, *background* culturale possono influenzare i giudizi, introducendo dispersioni non spiegabili attraverso i soli parametri acustici. Un secondo limite è legato alla parzialità delle misure oggettive. Indicatori come *loudness*, *sharpness* e *roughness* descrivono specifiche dimensioni psicoacustiche, ma non colgono aspetti contestuali ed esperienziali, quali il significato attribuito alle sorgenti o l'interazione con l'ambiente visivo. Inoltre, l'uso di medie, percentili e rapporti permette di individuare tendenze generali, ma non consente di inferire relazioni causali o di prevedere con precisione le risposte soggettive in contesti diversi, con il rischio di produrre semplificazioni.

Infine, emerge la necessità di validazione e replicabilità, affinché le correlazioni individuate possano assumere un valore realmente generale. Questo richiede la verifica dei risultati su campioni più ampi e diversificati, nonché in scenari acustici eterogenei, così da ridurre l'influenza delle specifiche condizioni sperimentali. In assenza di questo passaggio, i risultati restano necessariamente

circoscritti alle condizioni sperimentali considerate e non possono essere estese con sicurezza ad altri ambienti. L'approccio integrato rappresenta quindi uno strumento molto efficace per interpretare il *soundscape*, ma deve essere applicato con consapevolezza dei suoi limiti metodologici e delle condizioni entro cui i dati vengono raccolti e analizzati e confrontati.

La Figura 1.4 mostra una rappresentazione schematica del processo metodologico di integrazione tra dati percettivi e oggettivi.

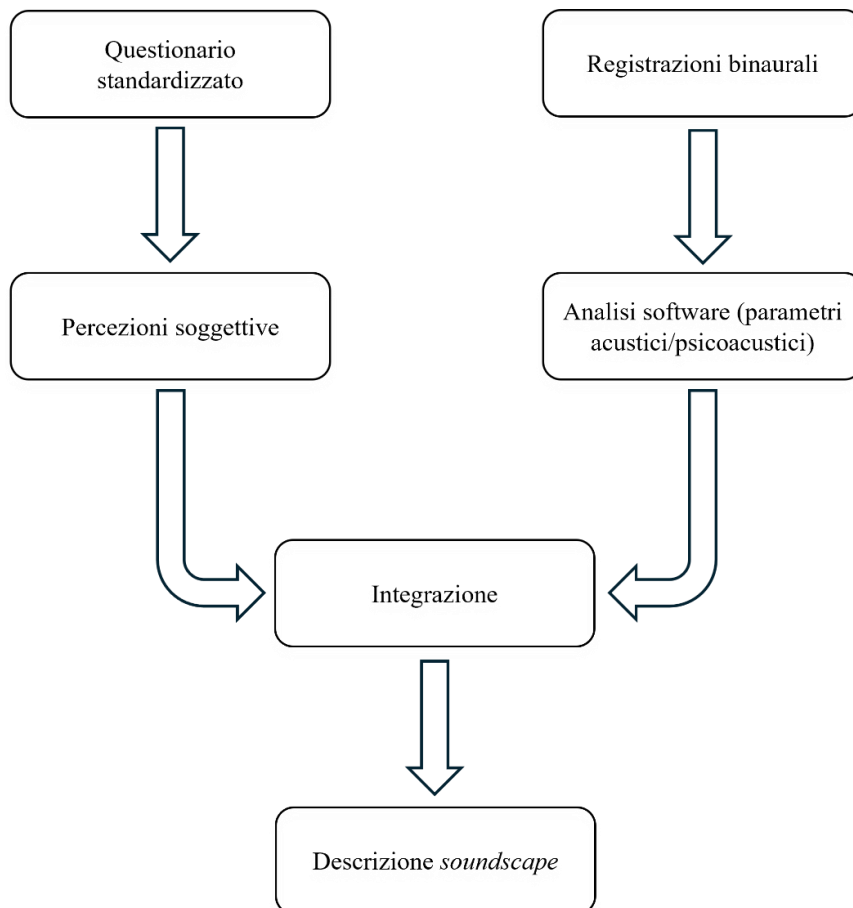


Figura 1.4 – Schema a blocchi del processo di raccolta e integrazione dei dati soggettivi e oggettivi per la descrizione del paesaggio sonoro.

1.3 Caso studio all'ex Mattatoio di Testaccio

L'analisi del *soundscape*, come illustrato nei paragrafi precedenti, rappresenta un approccio integrato per valutare la qualità acustica degli spazi pubblici, tenendo conto sia dei parametri oggettivi sia delle percezioni soggettive degli utenti. Per verificare operativamente la validità di tale approccio, è stato condotto uno studio sperimentale presso l'ex Mattatoio di Testaccio, complesso architettonico romano di rilevante interesse culturale e urbano, attualmente sede di attività artistiche, performative e universitarie.

L'obiettivo principale è stato quello di correlare i dati oggettivi ottenuti mediante registrazioni binaurali e analisi psicoacustiche con le valutazioni soggettive raccolte tramite questionari standardizzati, al fine di comprendere se e come le caratteristiche fisiche del paesaggio sonoro influenzino la percezione e l'esperienza sonora degli utenti.

Il presente paragrafo descrive nel dettaglio il protocollo sperimentale adottato, i risultati ottenuti su entrambi i versanti (acustico e percettivo), e le considerazioni progettuali che emergono dall'integrazione dei due insiemi di dati.

1.3.1 Inquadramento urbano, architettonico e funzionale del sito

L'ex Mattatoio di Testaccio si colloca all'interno del quadrante sud-ovest del centro storico di Roma, all'interno del Municipio I, in un settore urbano delimitato a ovest dal fiume Tevere e Largo Giovanni Battista Marzi, a sud dalla linea ferroviaria Roma-Trastevere, a est dal Monte dei Cocci e da Via Beniamino Franklin, e a nord da Via Aldo Manunzio. Dal punto di vista morfologico, il complesso insiste su un'area pianeggiante adiacente al Monte dei Cocci, in una zona originariamente destinata alla concentrazione delle attività mercatali, artigianali e industriali di Roma postunitaria.

La collocazione del Mattatoio nell'area fu determinata da esigenze di separazione funzionale tra attività insalubri e ambiti residenziali, in linea con i principi igienico-sanitari dell'epoca. Il sito garantiva sufficiente distanza dal centro storico e al contempo vicinanza ai quartieri popolari in espansione (Testaccio, Ostiense), risultando logisticamente efficiente per le attività connesse alla macellazione. La scelta fu rafforzata dalla prossimità alla linea ferroviaria e al porto fluviale sul Tevere, che consentivano un efficace collegamento con le filiere di approvvigionamento e distribuzione. Il sito integrava così le principali modalità di trasporto disponibili a fine Ottocento. Il Mattatoio fu tra i primi insediamenti produttivi previsti dai piani regolatori post-unitari. Il progetto di Gioacchino Ersoch, del 1888, ne definì la posizione in modo coerente con le logiche di zonizzazione emergenti, prevedendo un comparto chiuso, funzionalmente autonomo, ma connesso alla rete urbana. La Figura 1.5 rappresenta l'inquadramento territoriale e urbano del caso di studio. In Figura 1.5a è

riportata la collocazione del quartiere Testaccio all'interno della città di Roma, mentre la Figura 1.5b evidenzia, in scala di maggior dettaglio, la posizione dell'ex Mattatoio all'interno del quartiere.



Figura 1.5 – Inquadramento territoriale e urbano del quartiere Testaccio. In (a) sono riportati i confini del Comune di Roma (linea nera) e l'area del quartiere Testaccio (linea rossa con riempimento rosso). In (b) è rappresentata una porzione di città in cui la linea rossa delimita il quartiere Testaccio, mentre l'area evidenziata in rosso trasparente indica l'ex Mattatoio.

Dopo la dismissione del 1975, l'ex Mattatoio ha conosciuto una riconfigurazione urbana priva inizialmente di un progetto unitario di riuso. Il sito è stato a lungo sottoutilizzato, ospitando interventi puntuali, occupazioni temporanee e pratiche culturali informali, che ne hanno progressivamente ridefinito le funzioni. Ne è derivata una struttura stratificata e disomogenea, frutto di adattamenti incrementali e sovrapposizioni d'uso che ancora oggi ne influenzano fruizione e qualità ambientale.

L'ex Mattatoio si caratterizza per un impianto planimetrico regolare, organizzato secondo una maglia ortogonale composta da padiglioni isolati, cortili interni e percorsi di servizio. La configurazione originaria seguiva un criterio di suddivisione funzionale per comparti, con una netta distinzione tra le diverse fasi del ciclo di macellazione e le attività ausiliarie. Questo principio ha prodotto una disposizione simmetrica e ripetitiva dei volumi, impostati lungo assi principali nord-sud e trasversali est-ovest, funzionali sia alla movimentazione delle merci sia al controllo sanitario dei flussi. L'alternanza tra padiglioni in muratura e spazi aperti o semi-aperti conferisce al complesso una struttura porosa e permeabile, in cui i cortili interni, un tempo destinati alle attività mercatali, assumono oggi un ruolo centrale di connessione e transizione. La maglia planimetrica, in larga parte conservata, continua a condizionare accessi, localizzazione delle funzioni e articolazione delle sequenze spaziali, determinando un assetto complesso che influisce direttamente sulle modalità di fruizione.

Le tipologie edilizie presenti all'interno del complesso dell'ex Mattatoio si basano su una ripetizione modulare di padiglioni isolati, sviluppati su uno o due livelli, con pianta rettangolare allungata e copertura a capriata. Questa scelta compositiva rifletteva criteri funzionali legati all'organizzazione razionale delle attività produttive, favorendo l'indipendenza operativa dei diversi comparti e la ventilazione naturale degli ambienti. Le strutture portanti sono realizzate prevalentemente in muratura piena, con uso estensivo del laterizio a vista, mentre gli elementi orizzontali e di copertura impiegano travature metalliche (capriate in ferro rivettato) e solai in legno o laterocemento nelle porzioni più recenti. Gli spazi maggiori sono contraddistinti da altezze utili significative e ampie aperture finestrate, pensate per garantire illuminazione e ricambio d'aria, in linea con le prescrizioni igienico-sanitarie del periodo.

Il complesso dell'ex Mattatoio è delimitato da un perimetro murario continuo ma interrotto da una serie di varchi che ne garantiscono l'accessibilità da più direzioni. Gli accessi principali sono collocati su via Aldo Manuzio, Piazza Orazio Giustiniani e Largo Dino Frisullo, mentre gli ingressi secondari sono presenti lungo il lato ovest, in prossimità del lungotevere Testaccio. Questa configurazione consente una permeabilità parziale, regolata da recinzioni e portoni che ne definiscono l'apertura al pubblico in funzione delle attività insediate.

La configurazione attuale del complesso riflette una situazione di parziale rifunzionalizzazione, con un'evidente disomogeneità nello stato di conservazione e nell'uso dei diversi comparti. Alcuni padiglioni risultano pienamente recuperati e operativi, destinati a funzioni culturali, accademiche o espositive, mentre altre porzioni dell'area versano in condizioni di degrado o risultano inaccessibili, in attesa di interventi di restauro. Gli interventi di recupero effettuati a partire dagli anni Duemila si sono concentrati principalmente nella zona nord-orientale del sito, secondo una logica di intervento per lotti funzionali, senza un coordinamento generale immediato. A questa frammentarietà corrisponde una morfologia d'uso articolata, in cui si alternano spazi pubblici, semi-pubblici e chiusi, ciascuno con differenti condizioni di accessibilità, controllo e gestione.

L'ex Mattatoio ospita oggi un insieme articolato di soggetti istituzionali, accademici e associativi che ne definiscono il carattere multifunzionale. La presenza della Facoltà di Architettura dell'Università Roma Tre, insediata in più padiglioni del comparto nord, rappresenta una delle componenti più stabili e strutturate dell'intero complesso, con attività didattiche e di ricerca distribuite lungo tutto l'anno accademico. Accanto alla funzione universitaria, il sito include le strutture gestite dall'Azienda Speciale Palaexpo, tra cui il complesso denominato Pelanda, destinato a mostre, installazioni e progetti interdisciplinari di arti visive e performative. Nella porzione sud-orientale del complesso è attiva la Scuola Popolare di Musica di Testaccio, istituzione con funzione didattica e concertistica, storicamente radicata nel quartiere. A essa si affianca l'Accademia di Belle

Arti di Roma, che utilizza alcuni padiglioni per laboratori artistici e attività formative. Nel comparto occidentale, in prossimità dell'ingresso su Largo Dino Frisullo, si colloca la Città dell'Altra Economia, spazio polifunzionale dedicato a temi ambientali, sociali e di economia solidale. Altri padiglioni ospitano realtà associative attive in ambito culturale, sociale e migratorio, tra cui Ararat, Senza Confine e Villaggio Globale, con livelli variabili di strutturazione formale e continuità operativa. Nel loro insieme, tali presenze delineano un sistema policentrico, privo di una direzione unitaria, ma caratterizzato da un'elevata eterogeneità funzionale, che riflette la stratificazione degli interventi e delle assegnazioni succedutesi negli ultimi decenni. La coesistenza di enti pubblici, organizzazioni culturali indipendenti e spazi a gestione mista costituisce una specificità rilevante nella definizione del profilo attuale del sito.

La Figura 1.6 mostra la planimetria dell'ex Mattatoio di Testaccio, evidenziando la distribuzione degli spazi e la collocazione dei diversi enti e istituzioni attualmente insediati al suo interno.

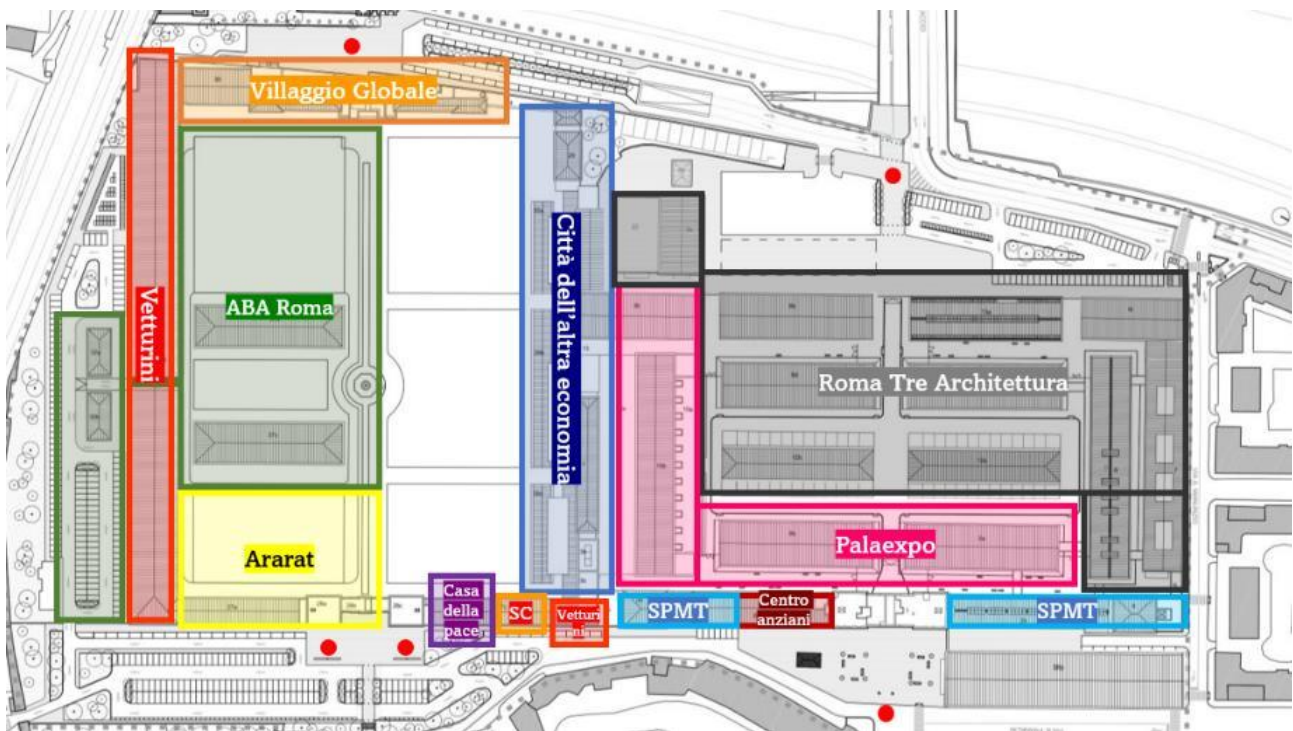


Figura 1.6 – Planimetria dell'ex Mattatoio di Testaccio con indicazione dei principali enti e istituzioni attualmente presenti all'interno del complesso.

Il contesto acustico dell'ex Mattatoio è caratterizzato da una pluralità di sorgenti sonore eterogenee per natura, durata e distribuzione. Alla presenza di suoni ambientali stabili (traffico urbano, fondo naturale, attività) si affiancano emissioni variabili generate da eventi culturali, performance musicali e attività collettive. Le sorgenti umane (voci, gruppi in transito, conversazioni)

si distribuiscono principalmente nei percorsi interni e nei cortili, contribuendo a un ambiente sonoro complesso e stratificato.

L'organizzazione per padiglioni separati, intervallati da spazi aperti e semi-aperti, determina una notevole variabilità delle condizioni acustiche interne. La geometria dei cortili, la presenza di superfici riflettenti e l'alternanza tra pieni e vuoti generano configurazioni sonore differenziate, con effetti di riverbero, assorbimento e attenuazione locale. Ogni comparto spaziale presenta caratteristiche acustiche specifiche, rilevanti per la percezione e la misurazione del *soundscape*.

Le sorgenti sonore non sono solo distribuite spazialmente, ma anche variabili nel tempo. Le attività accademiche, gli eventi espositivi, le prove musicali e le iniziative associative si alternano secondo calendari disomogenei, determinando fluttuazioni giornaliere e settimanali nella pressione sonora percepita. Tale dinamica temporale è un elemento chiave per l'analisi *soundscape* in ambito urbano. Le interazioni tra sorgenti sonore differenti possono generare fenomeni di mascheramento, in cui componenti acustiche di maggiore intensità o continuità coprono segnali più deboli. All'interno dell'ex Mattatoio si riscontrano frequentemente situazioni di dominanza sonora, specialmente in presenza di sorgenti musicali o foniche artificiali, che interferiscono con la percezione di suoni ambientali o voci umane.

La complessità morfologica e funzionale del sito rende l'ex Mattatoio un caso studio particolarmente adatto all'analisi integrata tra parametri fisici e percezione soggettiva. La coesistenza di spazi chiusi, semi-aperti e aperti, unita alla variabilità delle sorgenti e degli usi, configura un paesaggio sonoro dinamico e non standardizzato, utile per indagare fenomeni di adattamento percettivo, mascheramento acustico e fruizione multisensoriale degli spazi urbani a vocazione culturale.

1.3.2 Metodologia sperimentale

Il presente sottocapitolo descrive nel dettaglio la metodologia operativa adottata per la campagna di rilevazione condotta presso l'ex Mattatoio di Testaccio, finalizzata alla caratterizzazione del paesaggio sonoro attraverso un approccio integrato tra osservazione partecipata, misure acustiche binaurali e valutazioni soggettive. La progettazione del protocollo sperimentale si fonda sui riferimenti normativi forniti dalla serie ISO 12913, e rappresenta l'applicazione pratica dei principi esposti nei paragrafi precedenti.

Il protocollo sperimentale è stato realizzato seguendo la metodologia del *soundwalk*. I partecipanti hanno seguito un percorso prestabilito all'interno dell'ex Mattatoio di Testaccio, articolato in sei postazioni di ascolto collocate in aree rappresentative del complesso. In ciascun punto, la procedura ha previsto l'ascolto diretto della scena sonora, la compilazione del questionario

e la registrazione binaurale simultanea tramite microfono BSU di HEAD Acoustics. La compilazione in tempo reale, svolta durante l'ascolto e parallelamente alla registrazione, ha garantito uniformità nelle risposte e ridotto il rischio di distorsioni dovute alla memoria o a valutazioni retrospettive. La durata complessiva dell'attività è stata di circa 60 minuti, includendo i tempi di percorrenza tra le postazioni, le pause esplicative e le operazioni tecniche necessarie al corretto funzionamento delle registrazioni. In media, i partecipanti hanno impiegato 2–3 minuti per la compilazione del questionario in ciascun punto. Il questionario, predisposto in formato digitale tramite Google Form, è stato compilato in situ attraverso dispositivi personali (smartphone o tablet), consentendo la raccolta immediata dei dati in formato elettronico, senza necessità di trascrizioni successive e con una significativa riduzione dei margini di errore. L'intero processo è stato supervisionato dal dottorando autore della presente ricerca, con la collaborazione della collega Ilaria De Sanctis. Entrambi hanno fornito le istruzioni iniziali, garantito la comprensione del protocollo da parte dei partecipanti e monitorato costantemente le fasi di ascolto e compilazione.

La Figura 1.7 illustra il tracciato seguito dai partecipanti, evidenziando in nero il percorso svolto e in rosso la numerazione progressiva dei punti di osservazione.

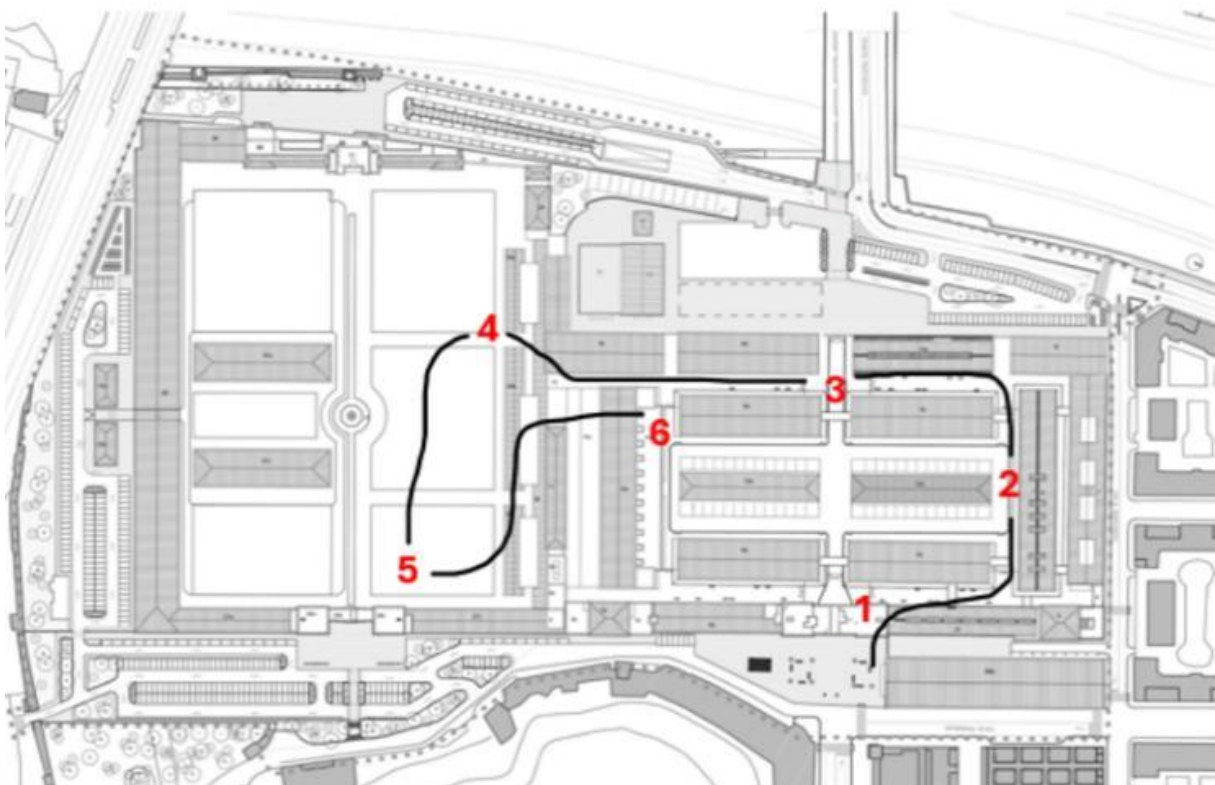


Figura 1.7 – Itinerario del soundwalk all'interno dell'ex Mattatoio di Testaccio. In nero è riportato il percorso seguito dai partecipanti, mentre i numeri in rosso indicano le sei postazioni di ascolto.

Le sei postazioni di ascolto sono state selezionate in modo da rappresentare la varietà delle condizioni acustiche e funzionali del sito. La distribuzione ha tenuto conto della presenza degli accessi principali, delle aree interne destinate ad attività culturali e di aggregazione, nonché delle zone di connessione tra i padiglioni. Tale collocazione ha permesso di includere contesti eterogenei, spaziando dal fronte urbano esposto al traffico veicolare agli spazi interni caratterizzati da maggiore riparo acustico e da una più marcata presenza di sorgenti antropiche. La scelta dei punti di ascolto è stata guidata da criteri metodologici orientati a garantire la rappresentatività del campione. Sono state privilegiate aree con funzioni differenti, in modo da valutare come l'uso degli spazi incida sulla percezione sonora, e punti caratterizzati da sorgenti sonore eterogenee, così da cogliere la varietà dei contributi acustici presenti nel complesso. È stato inoltre ricercato un gradiente di esposizione acustica, includendo situazioni di maggiore rumore urbano e altre più protette, insieme a luoghi di particolare rilevanza culturale e didattica. La logistica del percorso, infine, è stata pianificata per garantire accessibilità, fluidità e tempi di permanenza comparabili in ciascuna stazione.

Grazie a tale impostazione, l'itinerario del *soundwalk* ha permesso di restituire un quadro rappresentativo della complessità acustica dell'ex Mattatoio e di osservare come la morfologia architettonica, le funzioni d'uso e le condizioni sonore interagiscano nella definizione della qualità percettiva del paesaggio sonoro. Questo impianto metodologico costituisce la base per l'integrazione sistematica tra dati soggettivi e parametri oggettivi.

Il protocollo metodologico si articola in due sezioni operative:

- a) Questionari utilizzati per la raccolta delle percezioni soggettive: questa parte riguarda la progettazione degli strumenti per l'acquisizione delle valutazioni individuali. Vengono descritte la struttura del questionario, gli attributi percettivi presi in esame, le scale utilizzate per la valutazione delle risposte e le modalità di compilazione in situ. Viene inoltre presentato il campione dei partecipanti, specificandone le caratteristiche demografiche e le variabili rilevanti ai fini dell'interpretazione dei giudizi;
- b) Registrazioni binaurali adottate per l'analisi dei dati oggettivi: tale sezione è dedicata alla documentazione tecnica delle misure acustiche. Include la descrizione della strumentazione impiegata, le condizioni operative delle registrazioni, le modalità di acquisizione del segnale sonoro e le procedure di esportazione ed elaborazione dei dati tramite software di analisi.

Obiettivo di questa fase è documentare con rigore e replicabilità l'intero processo osservativo, integrando misure fisiche e percezioni umane secondo un approccio metodologico fondato, trasparente e conforme agli standard internazionali.

a) Questionari utilizzati per la raccolta delle percezioni soggettive:

Il questionario impiegato durante la campagna sperimentale è stato elaborato in conformità con la norma ISO 12913-2, che fornisce le linee guida per la rilevazione dei dati soggettivi sul paesaggio sonoro. Lo strumento adottato ha previsto 14 domande a risposta chiusa e una domanda facoltativa a risposta aperta, strutturate in modo da indagare sia la percezione qualitativa sia la valutazione complessiva dell'ambiente sonoro.

Il questionario è stato articolato in tre sezioni principali: la prima riguardava la classificazione delle sorgenti sonore percepite, chiedendo ai partecipanti di valutare il grado di udibilità di diverse categorie, tra cui traffico veicolare, suoni meccanici e ambientali, suoni antropici e suoni naturali. Le risposte erano espresse su una scala ordinale a 5 punti, da "0 – Assolutamente non udibile" a "4 – Domina completamente". Questa scala permette di stimare la percezione relativa dell'udibilità delle diverse sorgenti sonore e di ricostruire la loro dominanza all'interno dello scenario acustico.

La seconda sezione era dedicata alle percezioni soggettive della qualità sonora del luogo, indagate attraverso coppie di descrittori bipolari (piacevole/spiacevole, vivace/stabile, calmo/caotico, monotono/dinamico), valutate su scala semantico-differenziale a 5 valori, da "-2 – Fortemente in disaccordo" a "+2 – Fortemente d'accordo". Tale impostazione consente di indagare la direzione e l'intensità del giudizio percepito, posizionando le valutazioni lungo un continuum che integra dimensione cognitiva ed emozionale.

La terza sezione del questionario era finalizzata alla valutazione complessiva del paesaggio sonoro, considerando sia la qualità percepita sia l'appropriatezza rispetto al contesto. La qualità è stata indagata attraverso una scala semantico-differenziale a 5 valori, da -2 ("molto scarso") a +2 ("molto buono"), mentre l'appropriatezza è stata valutata mediante una scala Likert a 5 valori compresa tra 0 ("non appropriato") e 4 ("perfettamente appropriato"). L'impiego congiunto di queste due scale ha permesso di ottenere un indicatore sintetico in grado di riassumere il giudizio globale e di rappresentare il grado di coerenza tra esperienza percettiva e caratteristiche contestuali.

A completamento del questionario era stata inserita una domanda aperta, finalizzata a raccogliere suggestioni personali, commenti liberi e osservazioni qualitative non coperte dalle domande chiuse. Questo spazio ha consentito ai partecipanti di esprimere percezioni individuali, impressioni soggettive o aspetti contestuali non immediatamente traducibili in valori numerici, fornendo così un contributo utile all'interpretazione complessiva dei risultati.

La struttura del questionario somministrato ai partecipanti è riportata in Tabella 1.8. Essa evidenzia le diverse sezioni indagate (sorgenti sonore percepite, attributi qualitativi, giudizio complessivo e osservazioni libere), con l'indicazione del contenuto delle domande, delle categorie e della tipologia di scala adottata.

Tabella 1.8 – Struttura del questionario utilizzato nel caso studio presso l'ex Mattatoio di Testaccio (ISO 12913-2).

Sezione	Contenuto	Categorie	Scala di risposta
Identificazione delle sorgenti sonore	Udibilità di diverse categorie di suoni	Traffico veicolare, suoni antropici, suoni naturali, altri suoni	Scala ordinale (0–4: da “Non udibile” a “Domina completamente”)
Attributi qualitativi	Giudizio tramite descrittori bipolari	Piacevole/spiacevole, Calmo/caotico, Vivace/stabile, Monotono/dinamico	Scala semantico-differenziale (da –2 “Fortemente in disaccordo” a +2 “Fortemente d’accordo”)
Valutazione complessiva	Giudizio globale sulla qualità sonora	“Come descriveresti complessivamente il paesaggio sonoro?”	Scala semantico-differenziale (da –2 “Molto scarso” a +2 “Molto buono”)
	Giudizio di appropriatezza	“Ritieni appropriato l’ambiente sonoro rispetto al luogo?”	Scala Likert (0–4: da “Non appropriato” a “Perfettamente appropriato”)
Osservazioni aggiuntive	Domanda aperta	“Altre suggestioni derivate dalla tua percezione personale”	Risposta libera

All’attività sperimentale hanno preso parte 24 partecipanti, reclutati nell’ambito del laboratorio svolto presso l'ex Mattatoio di Testaccio. Tutti i partecipanti hanno compilato almeno una parte del questionario, garantendo così la validità del contributo ai fini dell’analisi. Dei 24 partecipanti, 22 ($\approx 92\%$) hanno completato integralmente il percorso previsto nelle sei postazioni del *soundwalk*, fornendo un set completo di dati soggettivi. I restanti due ($\approx 8\%$) partecipanti hanno interrotto la compilazione dopo i primi due punti di osservazione, producendo quindi risposte parziali ma comunque utilizzabili per l’analisi relativa alle postazioni iniziali. Questa suddivisione ha permesso di mantenere un campione adeguato per l’analisi comparativa tra i diversi *spot*, rispettando le raccomandazioni della norma ISO 12913-2 in merito alla raccolta dati sul paesaggio sonoro.

Il campione era composto in prevalenza da partecipanti di genere femminile, pari a 19 persone ($\approx 79\%$), mentre i partecipanti di genere maschile erano 5 ($\approx 21\%$). Pur non essendo perfettamente bilanciata tra i due generi, la numerosità complessiva del campione risulta comunque adeguata ai fini dell’indagine esplorativa sul paesaggio sonoro.

L’età dei partecipanti presentava una certa variabilità, con un intervallo compreso tra i 22 e i 59 anni. L’età media risultava pari a circa 30 anni, con una deviazione standard σ di circa 10 anni, indice

di una distribuzione eterogenea ma concentrata principalmente nella fascia giovanile-adulta. La maggioranza dei partecipanti apparteneva infatti alla fascia 24–35 anni, corrispondente agli studenti e ai giovani ricercatori coinvolti nei corsi universitari. Sono stati registrati anche casi isolati oltre i 45 anni, che hanno contribuito a estendere la copertura anagrafica del campione, pur rappresentando una percentuale ridotta rispetto al totale. Questa distribuzione ha permesso di includere prospettive percettive differenziate per età, garantendo al contempo un nucleo centrale omogeneo legato alla popolazione studentesca universitaria.

La quasi totalità dei partecipanti proveniva dall'ambito accademico, in prevalenza studenti del DAMS dell'Università Roma Tre, affiancati da alcuni dottorandi e ricercatori in discipline affini. Il campione risultava quindi fortemente orientato alle arti visive, musicali, teatrali e cinematografiche, con una presenza marginale di studenti provenienti da aree tecnico-scientifiche. La maggior parte non possedeva una formazione specifica in acustica o esperienze di ascolto tecnico-professionale, ma mostrava una sensibilità culturale e performativa in linea con i percorsi formativi seguiti.

Dal punto di vista socio-demografico, i partecipanti erano prevalentemente residenti a Roma e nei comuni limitrofi, senza variazioni significative legate al *background* geografico. Pur non rappresentando la popolazione generale, questo campione ha offerto un contributo mirato e pertinente agli obiettivi della ricerca, centrati sulla fruizione culturale e performativa degli spazi dell'ex Mattatoio.

I partecipanti sono stati reclutati nell'ambito delle attività didattiche e seminariali organizzate presso l'ex Mattatoio di Testaccio. La partecipazione era volontaria e non prevedeva alcuna forma di incentivo, se non l'interesse diretto a prendere parte a un'esperienza di ascolto guidato e a un esercizio di valutazione critica del paesaggio sonoro. Tale modalità di reclutamento spontaneo ha garantito la presenza di partecipanti caratterizzati da una motivazione intrinseca, elemento che ha inciso positivamente sia sulla qualità della compilazione dei questionari, svolta con maggiore attenzione e accuratezza, sia sul livello di coinvolgimento durante l'intera esperienza collettiva. L'adesione volontaria, non condizionata da incentivi esterni, ha infatti favorito una partecipazione attiva e consapevole, stimolando un atteggiamento più concentrato nelle fasi di ascolto e una disponibilità più intensa a contribuire alla valutazione critica del paesaggio sonoro, con effetti rilevanti sulla coerenza e sull'affidabilità dei dati raccolti.

La Tabella 1.9 riassume le caratteristiche socio-demografiche e formative del campione di partecipanti al *soundwalk* presso l'ex Mattatoio di Testaccio, includendo informazioni relative alla numerosità, alla distribuzione di genere, all'età, alla provenienza accademica e residenziale, al *background* acustico e alle modalità di reclutamento.

Tabella 1.9 – Caratteristiche del campione dei partecipanti al *soundwalk* presso l'ex Mattatoio di Testaccio.

Categoria	Valore
Numero totale partecipanti	24
Partecipanti con percorso completo	22 ($\approx 92\%$)
Partecipanti con percorso parziale	2 ($\approx 8\%$)
Genere	19 ($\approx 79\%$) femmine, 5 ($\approx 21\%$) maschi
Età	Media ≈ 30 anni, Range $\approx 22-59$ anni, $\sigma \approx 10$ anni
Provenienza	Prevalenza studenti/dottorandi del DAMS (arti visive, musica, cinema, teatro), residenza prevalente a Roma e comuni limitrofi
<i>Background</i> acustico	Nessuna formazione tecnica specifica, sensibilità culturale legata agli studi artistico-performativi
Modalità di reclutamento	Attività didattiche e seminariali presso l'ex Mattatoio e partecipazione volontaria senza incentivi

b) Registrazioni binaurali adottate per l'analisi dei dati oggettivi:

Per l'acquisizione dei segnali acustici è stata impiegata la testa binaurale BSU di HEAD Acoustics, uno strumento ampiamente utilizzato in ambito di ricerca psicoacustica e *soundscape analysis* per la capacità di riprodurre in modo fedele e realistico la scena sonora così come viene percepita da un ascoltatore reale. Il dispositivo è dotato di due microfoni omnidirezionali miniaturizzati, integrati nei condotti uditivi artificiali, progettati per replicare accuratamente la risposta in frequenza dell'orecchio umano e le relative Head-Related Transfer Functions (HRTF). La connessione diretta a un computer portatile dedicato ha permesso di gestire in tempo reale le registrazioni e l'archiviazione dei file, assicurando stabilità operativa e controllo continuo della qualità del segnale. Questa configurazione consente di acquisire con elevata fedeltà non solo l'energia acustica ma anche le informazioni spaziali indispensabili per analisi percettive e per l'integrazione tra misure oggettive e valutazioni soggettive.

La Figura 1.8 mostra un esempio di configurazione strumentale in situ, con la testa binaurale posizionata su treppiede all'interno del complesso dell'ex Mattatoio di Testaccio durante una sessione di registrazione.



Figura 1.8 – Posizionamento della testa binaurale BSU di HEAD Acoustics su treppiede durante la campagna di registrazioni presso l'ex Mattatoio di Testaccio.

Le registrazioni sono state effettuate con risoluzione e frequenza di campionamento standard per misure ad alta fedeltà, in conformità con le specifiche del sistema HEAD Acoustics. I file sono stati archiviati nel formato proprietario .hdf, nativo della piattaforma, che consente la memorizzazione integrata dei metadati e l'elaborazione diretta all'interno del software ArtemiS Suite, garantendo coerenza e tracciabilità in tutte le fasi di analisi. Questo formato è progettato specificamente per applicazioni di analisi psicoacustica e acustica tecnica, in quanto consente di preservare l'integrità del segnale e di associare ai file informazioni aggiuntive relative alla sessione di misura (parametri di

acquisizione, data, punto di registrazione, eventuali annotazioni). L'utilizzo del formato .hdf ha quindi rappresentato la modalità principale per l'elaborazione quantitativa dei dati, in particolare per l'estrazione dei parametri oggettivi quali livelli di pressione sonora (*SPL*), *loudness*, *sharpness* e *roughness*.

Parallelamente, per garantire la possibilità di una riproduzione immersiva in cuffia e facilitare eventuali attività di ascolto comparativo, le registrazioni sono state esportate anche in formato .wav non compresso, con caratteristiche standard di alta fedeltà. Tale conversione non era destinata alle analisi numeriche, ma esclusivamente alla riascolto diretto delle scene sonore da parte dei ricercatori o di eventuali gruppi di valutazione. In questo modo è stato possibile disporre di una doppia modalità di utilizzo dei dati: da un lato l'elaborazione scientifica tramite .hdf e ArtemiS, dall'altro la riproduzione fedele e immediata dei paesaggi sonori registrati tramite file .wav, utile anche per attività dimostrative e divulgative.

La testa binaurale è stata posizionata su un treppiede regolabile all'altezza media delle orecchie di un adulto in piedi ($\approx 1,60$ m dal suolo), in accordo con le raccomandazioni riportate in letteratura per le registrazioni del paesaggio sonoro. In ciascuna postazione del *soundwalk*, il microfono è stato collocato in prossimità dei partecipanti e orientato frontalmente rispetto alla scena acustica, in modo da essere esposto alle stesse condizioni sonore percepite durante la compilazione del questionario. Tale accorgimento ha reso le registrazioni direttamente confrontabili con le valutazioni soggettive, assicurando coerenza metodologica nell'integrazione dei due insiemi di dati e garantendo la replicabilità del protocollo sperimentale.

Prima dell'avvio della campagna, sono state condotte registrazioni di prova finalizzate alla verifica del corretto funzionamento del sistema, all'individuazione di eventuali interferenze e all'ottimizzazione della configurazione strumentale.

Durante l'intero svolgimento del *soundwalk*, la registrazione è stata monitorata in tempo reale tramite il software ArtemiS Suite di HEAD Acoustics, che ha consentito la calibrazione iniziale, il controllo costante dei livelli di acquisizione e la validazione immediata della qualità del segnale. Questo approccio ha garantito l'affidabilità dei dati raccolti e la possibilità di un confronto accurato tra misure oggettive e percezioni soggettive.

Per completezza metodologica, la Tabella 1.10 riassume le principali specifiche tecniche adottate durante la campagna di registrazioni binaurali, sintetizzando gli aspetti operativi più rilevanti riguardanti strumentazione, configurazione, formati di acquisizione e modalità di posizionamento.

Tabella 1.10 – Specifiche di configurazione e modalità operative delle registrazioni binaurali condotte presso l'ex Mattatoio di Testaccio.

Sezione	Specifica
Strumentazione principale	Testa binaurale BSU (HEAD Acoustics)
Microfoni	Omnidirezionali miniaturizzati, integrati nei condotti auricolari
Collegamento	Connessione diretta a PC portatile
Software di controllo	HEAD Acoustics ArtemiS Suite
Altezza di posizionamento	1,60 m (orecchio umano medio in piedi)
Posizionamento	Accanto ai partecipanti, durante compilazione questionari
Formato di acquisizione	.hdf (analisi ed elaborazione dati)

Le registrazioni binaurali sono state condotte in un'unica giornata, così da garantire omogeneità delle condizioni ambientali ed evitare variazioni dovute a cambiamenti meteorologici o stagionali, che avrebbero potuto introdurre variabili non controllabili nei dati acquisiti. L'attività si è svolta in orario diurno, nella fascia compresa tra la tarda mattinata e il primo pomeriggio, a partire dalle ore 13:00 del 25 marzo 2025, orario selezionato per rappresentare condizioni d'uso e fruizione tipiche degli spazi oggetto di studio.

Durante la campagna, le condizioni meteorologiche sono rimaste stabili e favorevoli: cielo sereno, temperatura mite pari a circa 17 °C e umidità relativa intorno al 71%, senza presenza di vento significativo né precipitazioni. Questi fattori hanno assicurato una qualità ottimale dell'acquisizione, riducendo il rischio di disturbi dovuti a raffiche d'aria o a fenomeni atmosferici improvvisi. L'assenza di pioggia e di umidità eccessiva ha inoltre evitato potenziali interferenze sulla sensibilità dei microfoni e sulla propagazione del suono negli spazi aperti, garantendo registrazioni affidabili e direttamente confrontabili tra le diverse postazioni del *soundwalk*.

La Tabella 1.11 indica le principali condizioni ambientali durante la campagna di registrazione.

Tabella 1.11 – Condizioni ambientali durante la campagna di registrazioni binaurali presso l'ex Mattatoio di Testaccio.

Parametro	Valore
Data di campagna	25/03/2025
Orario di inizio	≈ 13:00
Durata complessiva	≈ 1 ora
Temperatura	≈ 17°C
Umidità relativa	≈ 71%
Condizioni metereologiche	Soleggiato
Vento	Non significativo
Precipitazioni	Assenti

1.3.3 Risultati dell'analisi soundscape

A partire dai dati raccolti attraverso la metodologia descritta nel paragrafo precedente, il presente sottocapitolo presenta i risultati emersi dall'indagine *soundscape* svolta presso l'ex Mattatoio di Testaccio. L'obiettivo è quello di descrivere e confrontare, per ciascuno dei sei punti di registrazione, sia le valutazioni soggettive espresse dai partecipanti ai questionari standardizzati (ISO 12913-2), sia i parametri acustici e psicoacustici estratti dalle registrazioni binaurali effettuate in situ.

L'analisi è articolata in due sezioni:

- a) Risultati soggettivi: percezioni e valutazioni dei partecipanti: la prima parte riguarda l'elaborazione delle percezioni soggettive, con riferimento agli attributi ISO, alla qualità e appropriatezza percepita e alla dominanza delle sorgenti sonore;
- b) Risultati oggettivi: parametri acustici e psicoacustici: la seconda parte espone i risultati oggettivi, basati su parametri fisico-acustici e psicoacustici calcolati con software ArtemiS Suite di HEAD Acoustics a partire dalle tracce binaurali;

Tutti i dati sono presentati per confronto diretto tra le sei postazioni di ascolto, con l'ausilio di tabelle, volte a evidenziare i principali pattern percettivi e acustici emersi dall'indagine.

- a) Risultati soggettivi: percezioni e valutazioni dei partecipanti:

Le risposte alla prima sezione del questionario (Tabella 1.8) riguardano l'udibilità percepita delle principali categorie di sorgenti sonore (traffico veicolare, suoni antropici, suoni naturali e altri suoni) nei sei punti di osservazione individuati all'interno dell'ex Mattatoio. I valori medi espressi dai partecipanti sono stati raccolti su una scala ordinale a 5 livelli, compresa tra 0 ("Assolutamente non udibile") e 4 ("Domina completamente"), con valori intermedi pari a 1 ("Un po' udibile"), 2 ("Moderatamente udibile") e 3 ("Molto udibile"). L'utilizzo di questa scala consente di quantificare la percezione dell'udibilità in modo comparabile e di mettere in evidenza la variabilità spaziale della scena acustica, riflettendo le differenze di esposizione sonora tra i diversi *spot*.

Nel primo punto di osservazione, situato presso l'ingresso di Piazza Orazio Giustiniani, il paesaggio sonoro è stato caratterizzato dalla forte presenza del traffico veicolare, con un valore medio prossimo a 2,9, corrispondente alla condizione di "molto udibile" e chiaramente identificabile come componente dominante. Le altre categorie di suono hanno riportato valori inferiori a 2, risultando quindi percepite come poco o mediamente udibili, mentre i suoni naturali sono risultati pressoché assenti.

Nella seconda postazione, localizzata in prossimità della Facoltà di Architettura, la scena acustica ha evidenziato una maggiore incidenza dei suoni antropici $\approx 2,3$, legati alle attività umane interne al complesso, seguiti dai suoni naturali $\approx 2,1$. In questo caso il traffico veicolare ha registrato

un valore medio molto più basso $\approx 1,1$, segnalando un effetto evidente della schermatura architettonica che attenua l'esposizione alle sorgenti urbane esterne.

Nel terzo *spot*, collocato all'uscita carrabile su Largo Giovanni Battista Marzi, il traffico veicolare si conferma la sorgente prevalente $\approx 2,4$, pur non raggiungendo un livello di assoluta dominanza. A questo si affiancano i suoni antropici e la categoria degli altri suoni, entrambi attestati su valori medi compresi tra 1,7 e 1,8, che ne evidenziano una presenza percepibile ma non primaria. I suoni naturali rimangono invece marginali, con un valore medio intorno a 0,7.

Una configurazione opposta è stata osservata presso la quarta postazione, situata in corrispondenza del bar della Città dell'Altra Economia, dove risultano dominanti i suoni antropici $\approx 2,9$, coerenti con le attività sociali e di aggregazione dell'area. Anche gli altri suoni urbani registrano valori elevati $\approx 2,5$, mentre il traffico veicolare risulta quasi assente $\approx 0,6$. I suoni naturali raggiungono valori medi pari a 1,6, segnalando una presenza percepibile, sebbene discontinua.

Il quinto punto di osservazione, in corrispondenza dell'ingresso da Largo Dino Frisullo, è stato caratterizzato dalla prevalenza degli altri suoni, comprendenti rumori di cantiere e sorgenti tecniche $\approx 2,6$. Seguono i suoni naturali, con un valore medio di circa 2, mentre i suoni antropici hanno registrato livelli inferiori $\approx 1,2$. Il traffico veicolare, con un valore residuo di circa 0,8, riflette la posizione interna e schermata della postazione, che riduce in modo significativo l'influenza delle sorgenti stradali.

Infine, nell'ultimo *spot*, presso l'ingresso de La Pelanda, la scena acustica è stata dominata in modo netto dagli altri suoni, principalmente riconducibili a impianti e attività infrastrutturali, con un valore medio pari a 2,9. A questi si affiancano i suoni antropici $\approx 2,0$, mentre il traffico veicolare, pur presente, ha inciso in misura ridotta $\approx 1,0$. I suoni naturali, infine, risultano quasi assenti, con valori medi intorno a 0,5.

Dunque, nelle aree prossime agli ingressi maggiormente esposti alla viabilità urbana, come le postazioni 1 e 3, prevale il contributo del traffico veicolare, con valori medi prossimi alla soglia di "molto udibile", a conferma del ruolo dominante che questa sorgente esercita sull'esperienza acustica complessiva. Al contrario, nelle zone legate ad attività sociali e di aggregazione, come nel caso dei punti di osservazione 2 e 4, la scena sonora è caratterizzata soprattutto dai suoni antropici, che costituiscono la componente predominante, affiancata da una presenza secondaria ma significativa di suoni naturali, capaci di arricchire il profilo percettivo e di conferirgli maggiore varietà. Infine, negli spazi interni più connotati da funzioni tecniche e infrastrutturali, rappresentati dagli *spot* 5 e 6, risultano prevalenti i cosiddetti "altri suoni", riconducibili a impianti, macchinari e attività a carattere semi-industriale. In questi contesti, il traffico veicolare assume un ruolo marginale, mentre i suoni

naturali si riducono a presenze limitate e poco percepibili, delineando un paesaggio acustico segnato da componenti artificiali e tecnologiche.

Per sintetizzare i risultati relativi all’udibilità delle diverse categorie di sorgenti sonore nei sei punti di osservazione, la Tabella 1.12 riporta i valori medi espressi dai partecipanti, su scala 0–4, distinguendo tra traffico veicolare, suoni antropici, suoni naturali e altri suoni.

Tabella 1.12 – Valori medi di udibilità (scala 0 / 4) delle categorie di sorgenti sonore percepite nelle sei postazioni dell’ex Mattatoio di Testaccio, ottenuti dalle risposte ai questionari (ISO 12913-2).

<i>Spot</i>	Traffico veicolare	Suoni antropici	Suoni naturali	Altri suoni
1	2.9	1.5	0.5	1.2
2	1.1	2.3	2.1	1.3
3	2.4	1.7	0.7	1.7
4	0.6	2.9	1.6	2.5
5	0.8	1.2	2.0	2.6
6	1.0	2.0	0.5	2.9

Le valutazioni soggettive per la descrizione qualitativa del *soundscape*, raccolte tramite la scala semantico-differenziale (Tabella 1.8), permette di delineare il profilo percettivo delle sei postazioni analizzate. I punteggi medi sono stati espressi su una scala da –2 a +2, in cui –2 corrisponde a “fortemente in disaccordo”, –1 a “in disaccordo”, 0 a “né d’accordo né in disaccordo”, +1 a “d’accordo” e +2 a “fortemente d’accordo”. L’analisi di tali valori mette in evidenza andamenti differenziati in funzione del contesto acustico e delle caratteristiche funzionali di ciascun luogo, offrendo un quadro articolato della percezione sonora lungo il percorso del *soundwalk*.

L’analisi delle percezioni soggettive mostra differenze significative tra i sei punti osservati, delineando profili qualitativi distinti.

Il primo punto di ascolto, situato presso l’ingresso di Piazza Orazio Giustiniani, è stato valutato in modo globalmente neutro, o comunque non negativo, rispetto alla dimensione piacevole/spiacevole, ma descritto come vivace e dinamico, con elementi di disordine riconducibili al traffico e alla variabilità dei rumori presenti.

Al contrario, la postazione 2, collocata presso la Facoltà di Architettura, ha ricevuto giudizi tendenzialmente positivi, caratterizzati da valori più elevati per le dimensioni di calma e stabilità, in associazione a un ambiente percepito come ordinato, tranquillo e privo di intrusività marcata.

Un quadro opposto emerge invece nel terzo punto di osservazione, in corrispondenza dell’uscita carrabile su Largo G. B. Marzi, percepito come poco piacevole e caotico, con punteggi negativi nelle dimensioni calmo e stabile. Il paesaggio sonoro viene interpretato come confuso e scarsamente

controllato, in coerenza con la funzione di collegamento e transito tra l'interno del complesso e l'area urbana esterna.

Una percezione più positiva si riscontra nella postazione 4, presso il bar della Città dell'Altra Economia, giudicato piacevole e animato. I valori elevati nelle scale vivace e dinamico riflettono il ruolo delle interazioni sociali e delle attività legate al bar, che conferiscono allo spazio una connotazione attiva e stimolante, coerente con la sua funzione aggregativa.

Il quinto *spot*, situato all'ingresso di Largo Dino Frisullo, è stato interpretato come un contesto tranquillo e stabile, con valutazioni mediamente positive sulle dimensioni di calma e stabilità, e sostanzialmente positivo sul piano piacevole/spiacevole. L'ambiente risulta pertanto equilibrato e privo di caos evidente, pur senza emergere come particolarmente vivace o stimolante.

Infine, il sesto punto di osservazione, collocato in prossimità dell'ingresso de La Pelanda, ha restituito il profilo più critico: esso è stato percepito come spiacevole, instabile e caotico, con punteggi negativi su tutte le principali scale qualitative. La presenza di suoni tecnici e meccanici, derivanti da impianti e infrastrutture, è stata avvertita come disturbante e ha definito un quadro percettivo fortemente problematico.

Dall'analisi delle valutazioni emerge una distinzione netta tra differenti configurazioni percettive del paesaggio sonoro. Gli spazi a vocazione sociale e aggregativa, come quelli rilevati nelle postazioni 2 e 4, sono stati giudicati con maggiore positività, risultando piacevoli, vivaci e al tempo stesso stabili, grazie alla presenza di attività umane percepite come coerenti con la funzione dei luoghi. Diverso è il caso dei contesti di transito o delle aree esposte, rappresentati dagli *spot* 1 e 3 che, pur mostrando una certa vivacità, sono stati associati a condizioni di minore ordine, con percezioni di caos e instabilità legate soprattutto alla presenza del traffico e alla variabilità delle sorgenti. Infine, gli spazi interni o a carattere tecnico hanno restituito una duplice configurazione: il punto di ascolto 5, percepito come equilibrato e stabile, e la postazione 6, valutato in modo critico per la spiacevolezza e il disordine acustico generato dai suoni meccanici e infrastrutturali.

Per rendere comparabili i risultati delle valutazioni qualitative espresse dai partecipanti, la Tabella 1.13 riassume i valori medi ottenuti per ciascuna coppia di attributi percettivi (piacevole/spiacevole, calmo/caotico, vivace/stabile, monotono/dinamico) nelle sei postazioni analizzate, fornendo una base di riferimento oggettiva per il confronto tra aree funzionalmente differenti dell'ex Mattatoio.

Tabella 1.13 – Valori medi (scala -2 / +2) delle valutazioni soggettive relative agli attributi qualitativi del paesaggio sonoro nelle sei postazioni di osservazione dell'ex Mattatoio di Testaccio.

<i>Spot</i>	Piacevole	Spiacevole	Vivace	Stabile	Calmo	Caotico	Monotono	Dinamico
1	0.0	-0.4	0.2	-0.4	-0.5	0.3	-0.8	0.6
2	0.8	-1.1	0.2	0.2	0.7	-1.1	-0.5	0.0
3	-0.4	0.0	-0.5	-0.1	-0.6	0.2	-0.3	0.5
4	0.5	-0.5	0.5	-0.3	-0.2	-0.1	-1.0	0.7
5	0.3	-0.4	-0.1	0.2	0.2	-0.6	-0.5	-0.1
6	-0.3	0.2	-0.3	-0.7	-0.7	0.4	-0.4	0.3

Oltre agli attributi specifici, i partecipanti hanno espresso un giudizio globale sulla qualità complessiva del paesaggio sonoro e sulla sua pertinenza rispetto al contesto. Per la qualità è stata adottata una scala semantico-differenziale a 5 valori compresa tra -2 (“molto scarso”) e +2 (“molto buono”), mentre per la pertinenza è stata utilizzata una scala Likert a 5 valori da 0 (“assolutamente non appropriato”) a 4 (“perfettamente appropriato”).

L’analisi di queste valutazioni sintetiche ha consentito di distinguere in modo chiaro i diversi ambienti indagati, evidenziando differenze significative tra i sei punti individuati lungo il percorso del *soundwalk*.

All’ingresso di Piazza Orazio Giustiniani, postazione 1, la qualità sonora media si è attestata su valori neutri $\approx 0,1$, con risposte distribuite tra giudizi leggermente positivi e negativi; al contrario, la pertinenza ha raggiunto un valore elevato $\approx 2,8$ su 4, indicando che, pur con la prevalenza del traffico veicolare, il paesaggio sonoro è stato ritenuto adeguato al contesto urbano.

Presso il secondo punto d’ascolto, adiacente alla Facoltà di Architettura, i giudizi sono stati più positivi, con una qualità media di $\approx 0,7$ e una pertinenza di $\approx 2,3$, a conferma della percezione di un ambiente piacevole, ordinato e coerente con la funzione universitaria.

All’uscita carrabile di Largo G. B. Marzi, posizione 3, invece, la qualità ha registrato valori lievemente negativi $\approx -0,2$, riflettendo la percezione di un contesto caotico e poco gradevole, sebbene la pertinenza, con $\approx 2,1$, abbia mostrato che l’ambiente acustico è stato comunque considerato compatibile con la funzione di transito.

Il Bar della Città dell’Altra Economia, *spot* 4, ha restituito valutazioni complessivamente positive, con qualità pari a $\approx 0,3$ e pertinenza $\approx 2,5$, segnalando che l’ambiente sonoro, vario e dinamico, è percepito come coerente con la vocazione sociale e aggregativa dello spazio.

L’ingresso di Largo Dino Frisullo, quinta postazione, ha ottenuto giudizi moderatamente positivi (qualità $\approx 0,4$ e pertinenza $\approx 2,3$), esprimendo la percezione di uno spazio equilibrato e sobrio, adeguato alla collocazione interna pur senza elementi distintivi rilevanti.

Infine, l'ultimo punto d'ascolto, presso l'ingresso de La Pelanda, rappresenta il caso più critico: la qualità complessiva ha registrato valori negativi $\approx -0,4$, con una prevalenza di giudizi spiacevoli e disturbanti; tuttavia, la pertinenza, attestata a $\approx 1,7$, ha indicato che, pur non gradito, il paesaggio sonoro è stato comunque interpretato come funzionale e compatibile con la presenza di impianti e attività tecniche.

Per sintetizzare le valutazioni globali espresse dai partecipanti, la Tabella 1.14 riporta i valori medi relativi alla qualità sonora complessiva (scala $-2 / +2$) e alla pertinenza del paesaggio sonoro rispetto al contesto (scala $0 / 4$) per ciascuno dei sei punti d'ascolto analizzati.

Tabella 1.14 – Valori medi della qualità complessiva (scala $-2 / +2$) e della pertinenza percepita (scala $0 / 4$) del paesaggio sonoro nelle sei postazioni di osservazione dell'ex Mattatoio di Testaccio.

<i>Spot</i>	Qualità complessiva ($-2 / +2$)	Pertinenza ($0 / 4$)
1	0.1	2.8
2	0.7	2.3
3	-0.2	2.1
4	0.3	2.5
5	0.4	2.3
6	-0.4	1.7

Infine, le risposte aperte fornite dai partecipanti hanno consentito di raccogliere impressioni soggettive non vincolate a scale numeriche, offrendo una prospettiva qualitativa che arricchisce l'interpretazione complessiva dei dati. Dai commenti emergono alcuni temi ricorrenti, insieme a specificità legate ai diversi contesti acustici.

L'ingresso di Piazza Orazio Giustiniani, nella postazione 1, è stato descritto come un ambiente vivo e complesso, in cui il traffico si intreccia con voci, conversazioni e lezioni di musica, restituendo un quadro variegato che molti hanno percepito come parte integrante della vita cittadina. Pur riconosciuto come rumoroso, il luogo è stato interpretato come rappresentativo della quotidianità urbana, con una variabilità temporale significativa e con la musica capace di mitigare la percezione negativa dei suoni tecnici.

Nel secondo punto d'ascolto, alla Facoltà di Architettura, al contrario, la percezione si è orientata verso un contesto più pacato e naturale, caratterizzato da cinguettii e voci leggere in assenza quasi totale di traffico; l'ambiente è stato definito confortevole e dinamico senza risultare disturbante, con frequenti riferimenti al contrasto tra i suoni naturali e i rumori di cantiere.

L'uscita carrabile su Largo G. B. Marzi, nello *spot* 3, è stata associata a una scena caotica e di transito, dominata dal traffico veicolare e dai rumori meccanici, con percezioni di fastidio e disagio al punto che alcuni partecipanti hanno interrotto anticipatamente la permanenza. L'insieme è stato giudicato instabile e confuso, con sovrapposizioni sonore disordinate.

Il Bar della Città dell'Altra Economia, postazione 4, invece, è stato percepito come uno spazio sociale aperto e stimolante, in cui le voci si mescolano a rumori di cantiere e cinguettii: sebbene talvolta caotico, l'ambiente è stato considerato coerente con la funzione aggregativa, con la molteplicità delle sorgenti acustiche interpretata come un fattore di vitalità urbana.

Nel quinto punto di ascolto, all'ingresso di Largo Dino Frisullo, le osservazioni hanno restituito un quadro più isolato e tranquillo, in cui la presenza di suoni naturali si alternava a rumori tecnici e di cantiere. Le percezioni si sono divise tra chi ha sottolineato la piacevolezza complessiva e chi ha espresso fastidio per la prevalenza di componenti meccaniche; in ogni caso, l'ambiente è stato descritto come sobrio e adatto a un ascolto attento, capace di offrire stimoli acustici variabili.

Infine, l'ingresso de La Pelanda nella posizione 6, è stato associato prevalentemente a rumori meccanici e infrastrutturali, percepiti come dominanti e disturbanti. Pur con alcune osservazioni che riconoscevano la varietà sonora, la maggior parte dei partecipanti ha sottolineato la prevalenza di questi suoni al punto da oscurare le altre sorgenti, definendo il contesto poco piacevole, caotico e scarsamente appropriato alla vocazione culturale del sito.

b) Risultati oggettivi: parametri acustici e psicoacustici:

Per ciascun punto di misura sono stati calcolati i principali indicatori acustici e psicoacustici, al fine di descrivere in modo completo la scena sonora e confrontarla con le percezioni soggettive raccolte durante il *soundwalk*. L'analisi ha incluso i livelli di pressione sonora equivalenti ponderati A e C (L_{Aeq} e L_{Ceq}), insieme ai livelli statistici L_5 e L_{95} , rappresentativi rispettivamente delle condizioni di massimo e minimo livello sonoro rilevate nel periodo di osservazione. A questi parametri fisici si sono affiancati gli indicatori psicoacustici derivati dal processamento dei segnali binaurali, comprendenti i valori di *loudness*: N_{avg} , N_{rmc} , N_5 , N_{95} , *roughness*: R_{10} , R_{50} , R e *sharpness* S_5 , S_{95} , S , selezionati per la loro capacità di descrivere la componente percettiva del paesaggio sonoro in termini di intensità, modulazione e brillantezza spettrale.

Per garantire una rappresentazione coerente del campo acustico registrato, i parametri espressi in unità lineari, soneGF, asper e acum, sono stati mediati aritmeticamente tra i canali destro e sinistro, mentre per le grandezze espresse in decibel, dB, è stata adottata la media energetica, definita dall'Equazione 1.6:

$$L_{media} = 10 \log_{10} \left(\frac{10^{L_{dx}/10} + 10^{L_{sx}/10}}{2} \right) \quad (1.6)$$

Tale procedura assicura la conservazione della coerenza fisica tra i due canali binaurali, evitando distorsioni dovute alla natura logaritmica delle grandezze sonore, e fornisce una stima

equilibrata della distribuzione spaziale dell'energia acustica. L'insieme dei risultati ottenuti consente di delineare una caratterizzazione quantitativa di ciascuna postazione, evidenziando le differenze di intensità sonora, contenuto spettrale e variabilità temporale.

I risultati oggettivi relativi al primo punto d'ascolto, situato presso l'ingresso di Piazza Orazio Giustiniani, descrivono un ambiente acustico tipico di un contesto urbano a forte influenza veicolare. Il livello equivalente ponderato A, L_{Aeq} , è pari a circa 43,7 dB(A), mentre il livello ponderato C, L_{Ceq} raggiunge 55,7 dB(C), con uno scarto di circa 12 dB che segnala una rilevante presenza di energia a bassa frequenza, riconducibile al traffico e ad altre sorgenti meccaniche di fondo. I livelli percentili (L_5 e L_{95}) mostrano una variabilità di circa 11 dB, indicativa di una scena dinamica ma non particolarmente caotica, caratterizzata da alternanza di passaggi veicolari e brevi momenti di quiete. Dal punto di vista psicoacustico, il *loudness* medio, N_{avg} , pari a 4,6 soneGF, riflette una percezione sonora di intensità medio-alta, coerente con la natura trafficata del sito. Il rapporto N_5/N_{95} di 2,7 evidenzia un'elevata dinamica percettiva, con alternanza tra fasi calme e picchi acustici. Il valore medio di *roughness* R e del relativo percentile R_{10} , pari a circa 0,2 asper, evidenzia una moderata ruvidità del segnale, associata a una variabilità temporale percepibile. Tale caratteristica riflette la presenza di modulazioni rapide dell'ampiezza, tipiche di sorgenti urbane come traffico veicolare, passi, voci o rumori ciclici di fondo. Lo *sharpness* medio S evidenzia un livello di acutezza lievemente superiore alla media, con picchi percentilici S_5 pari a 1,4 acum nei momenti di maggiore intensità spettrale. Tali valori indicano la presenza episodica di componenti sonore taglienti e vibranti (come frenate, clacson o suoni metallici) che, pur non dominanti, contribuiscono a rendere la scena acustica non caotica, ma poco rilassante. Nel complesso, l'insieme dei parametri fisici e psicoacustici delinea un paesaggio sonoro urbano moderatamente rumoroso ma acusticamente coerente con la funzione di accesso principale: la presenza del traffico, pur percepita in modo netto, non genera fastidio marcato e mantiene livelli di comfort uditivo accettabili.

L'analisi oggettiva condotta nel secondo punto d'ascolto, presso la Facoltà di Architettura di Roma Tre, evidenzia un contesto acusticamente più attenuato rispetto all'ingresso principale, caratterizzato da livelli sonori moderati e da una composizione spettrale dominata dalle basse frequenze. La differenza tra L_{Aeq} e L_{Ceq} di circa 17,6 dB indica la prevalenza di componenti gravi, compatibili con la presenza di sorgenti distanti o schermate. I valori percentili L_{95} e L_5 determinano una variazione di 19 dB, valore che segnala una variabilità sonora rilevante, con alternanza tra momenti di quiete e brevi eventi sonori di intensità superiore. Dal punto di vista psicoacustico, il *loudness* medio N_{avg} risulta tra i più bassi dell'intero campione, pari a 2,4 soneGF. Il valore limitato di *roughness* medio R suggerisce un segnale acustico poco ruvido, con assenza di modulazioni rapide d'ampiezza, mentre lo *sharpness* medio S , di 0,5 acum, conferma la minima presenza di componenti

spettrali acute. Nel complesso, i parametri oggettivi delineano un ambiente acustico attenuato, uniforme e stabile, con livelli sonori contenuti e prevalenza di basse frequenze.

La terza postazione di misura, situata in corrispondenza dell'uscita carrabile su Largo Giovanni Battista Marzi, presenta un quadro acustico tipico di un ambiente urbano schermato ma comunque esposto a sorgenti veicolari e di fondo a bassa frequenza. La differenza di circa 12 dB tra L_{Ceq} e L_{Aeq} conferma la predominanza delle componenti a bassa frequenza, mentre lo scarto tra L_5 e L_{95} , pari a circa 8 dB, indica una scena sonora stabile, priva di picchi improvvisi e caratterizzata da fluttuazioni contenute nel tempo. Dal punto di vista psicoacustico, il *loudness* medio (N_{avg} pari a 4,1 soneGF), presenta un livello percettivo medio-intenso, coerente con la presenza costante ma non dominante di sorgenti urbane. Il valore relativamente alto di N_{95} pari a 2,7 soneGF segnala una soglia di fondo percettiva elevata, indice di un ambiente sonoro persistente anche nei momenti di minore attività. I parametri di *roughness* indicano una moderata variabilità temporale del segnale, evidenziando un segnale regolare e privo di fluttuazioni rapide, mentre lo *sharpness* medio, prossimo all'unità, denota una brillantezza spettrale contenuta, associata a un equilibrio tra componenti gravi e acute senza elementi disturbanti. Nel complesso, i risultati oggettivi delineano un ambiente acusticamente equilibrato, con predominanza energetica alle basse frequenze, livelli sonori mediamente elevati ma costanti e assenza di discontinuità significative.

La quarta postazione di misura, situata presso il bar della Città dell'Altra Economia, restituisce un quadro acustico moderato ed equilibrato, tipico di un ambiente interno al complesso e non direttamente esposto al traffico. I livelli equivalenti ponderati A e C risultano in linea con le altre postazioni, con uno scarto di circa 10,5 dB tra L_{Ceq} e L_{Aeq} , indicativo di una costante presenza di componenti a bassa frequenza riconducibili a rumori strutturali o attività tecniche. I valori percentili L_5 e L_{95} mostrano un'escursione dinamica contenuta, segnalando una scena sonora stabile, priva di eventi impulsivi o discontinuità rilevanti. Dal punto di vista psicoacustico, il *loudness* medio (N_{avg} pari a 4,0 soneGF), indica una percezione sonora di intensità medio-alta ma non eccessiva. Il rapporto N_5/N_{95} evidenzia una buona dinamica acustica, con alternanza regolare tra momenti di quiete e fasi più vivaci. I valori di *roughness* denotano fluttuazioni moderate, senza variazioni brusche. Lo *sharpness* medio pari a 1,1 acum indica uno spettro acustico tendenzialmente brillante, con picchi acuti intermittenti. L'assenza di valori elevati di *roughness* e *sharpness* conferma la presenza di un *soundscape* bilanciato e non aggressivo, in cui le sorgenti si alternano senza generare fastidio percettivo o discontinuità rilevanti. Nel complesso, i dati oggettivi delineano un ambiente acusticamente stabile e tollerabile, con livelli sonori moderati e limitata presenza di componenti impulsive. L'analisi conferma un contesto dinamico ma non caotico, in cui le variazioni del segnale restano entro limiti compatibili con un ambiente urbano vivo ma equilibrato.

La quinta postazione di misura, collocata all'ingresso di Largo Dino Frisullo, restituisce un ambiente acusticamente più silenzioso rispetto alle precedenti aree di osservazione, con livelli sonori complessivamente contenuti e una variabilità ridotta. Il livello equivalente ponderato A, L_{Aeq} , pari a 36,2 dB(A), risulta il più basso tra tutte le postazioni analizzate, e identifica un contesto moderatamente tranquillo, coerente con la posizione interna e schermata del punto di misura. La differenza di circa 13 dB tra L_{Ceq} e L_{Aeq} indica una presenza di energia concentrata nelle basse frequenze, probabilmente legata a sorgenti tecniche o di cantiere a bassa variabilità. La differenza di circa 11 dB tra i livelli percentili di minimo L_{95} e massimo L_5 confermano una variabilità sonora moderata, che denota l'assenza di eventi acustici impulsivi o picchi di intensità significativi, delineando un profilo regolare e stabile nel tempo. Dal punto di vista psicoacustico, il *loudness* medio N_{avg} è pari a 2,2 soneGF, valore che indica una sonorità bassa e non invasiva. Il rapporto N_5/N_{95} di circa 2,1 segnala una dinamica sonora moderata, senza variazioni di rilievo. I valori limitati di *roughness* medio R , e *sharpness* medio S , confermano la natura morbida e regolare del segnale acustico, privo di fluttuazioni rapide e caratterizzato da una modulazione d'ampiezza stabile. La nitidezza spettrale risulta contenuta, ma con occasionali componenti acute, coerente con una scena sonora equilibrata, non eccessivamente brillante né dominata da componenti ad alta frequenza. Nel complesso, i parametri oggettivi descrivono un paesaggio acustico stabile e controllato, caratterizzato da un fondo sonoro costante, privo di fluttuazioni improvvise e con livelli energetici complessivamente bassi. La scena risulta lineare e poco complessa, con variazioni temporali limitate, riflettendo la natura raccolta e protetta dell'area. La disposizione degli edifici e l'assenza di sorgenti dirette di disturbo contribuiscono infatti a mantenere una condizione di quiete relativa e una percezione sonora equilibrata.

L'ultima postazione di misura, localizzata presso l'ingresso principale de La Pelanda, evidenzia una condizione acustica complessa e variabile, caratterizzata da frequenti oscillazioni dei livelli sonori e da una marcata instabilità temporale. Il livello equivalente ponderato A, L_{Aeq} , pari a 41,9 dB(A), mentre il livello ponderato C, L_{Ceq} , di 49,6 dB(C), si collocano in prossimità dei valori medi rilevati sull'intero campione. La differenza tra le due ponderazioni, pari a circa 7,7 dB, è la più contenuta tra tutte le postazioni, segnalando una limitata incidenza delle componenti a bassa frequenza e una distribuzione spettrale del suono relativamente uniforme. La differenza tra i livelli percentili L_{95} e L_5 è superiore a 16 dB, valore che indica un comportamento dinamico irregolare e disomogeneo nel tempo. Dal punto di vista psicoacustico, il *loudness* medio N_{avg} risulta moderato, descrivendo una sonorità percepibile ma non particolarmente intensa. Tuttavia, il rapporto N_5/N_{95} di 3,6, evidenzia una forte instabilità temporale, con variazioni rapide di intensità e picchi acustici intermittenti. Il valore medio di *roughness* R e del relativo percentile R_{10} , pari a circa 0,2 asper, indica

la presenza diffusa di componenti sonore aspre e irregolari, distribuite lungo l'intera registrazione e non riconducibili a eventi isolati. Tale ruvidità acustica, persistente nel tempo, è coerente con un ambiente caratterizzato da sorgenti meccaniche o da rumori di lavorazione a bassa variabilità. Lo *sharpness* medio S risulta neutro, con picchi percentilici (S_5) pari a 1,3 acum nei momenti di maggiore intensità spettrale. Ciò descrive una nitidezza timbrica intermedia, legata alla presenza di componenti acute non predominanti, spesso attribuibili a suoni metallici o impulsi di breve durata. Tale configurazione del segnale riflette un contesto generalmente tollerabile, ma caratterizzato da episodi puntuali più penetranti (come fischi, fruscii o toni metallici) che possono generare un fastidio percettivo. Nel complesso, il quadro acustico evidenzia una presenza contenuta di frequenze medio-alte, coerente con un ambiente dominato da sorgenti tecniche e infrastrutturali. In generale, i dati oggettivi delineano una scena acustica discontinua, instabile e con elevata variabilità dinamica, in cui la combinazione di *loudness* incostante, *roughness* diffuso e *sharpness* intermedio evidenzia un ambiente perturbato, soggetto a rapide variazioni di intensità e a transitori di breve durata, indicativi di un *soundscape* meccanico e poco equilibrato.

La Tabella 1.15 riassume i valori medi dei principali parametri acustici e psicoacustici calcolati per le sei postazioni di misura. La sintesi consente di evidenziare le differenze quantitative tra i diversi punti d'ascolto in termini di livello sonoro, dinamica, ruvidità e nitidezza spettrale, fornendo una base oggettiva per il confronto complessivo delle condizioni acustiche all'interno del complesso dell'ex Mattatoio di Testaccio.

Tabella 1.15 – Riepilogo dei valori medi dei principali parametri acustici e psicoacustici (*loudness* in soneGF, *roughness* in asper, *sharpness* in acum e *SPL* in dB) per le sei postazioni di misura dell'ex Mattatoio di Testaccio.

<i>Spot</i>	N_{avg}	N_{rnc}	N_{95}	N_5	$\frac{N_5}{N_{95}}$	R	R_{10}	R_{50}	S	S_{95}	S_5	L_{Aeq}	L_{Ceq}	L_{95}	L_5
1	4.6	4.1	2.2	5.9	2.7	0.2	0.2	0.1	1.1	0.9	1.4	43.7	55.7	36.2	47.8
2	2.4	2.0	0.7	3.3	2.3	0.1	0.1	0.1	0.5	0.3	0.6	42.1	59.7	29.6	48.6
3	4.1	3.8	2.7	5.1	1.9	0.2	0.2	0.1	1.0	0.9	1.2	42.9	54.6	38.6	46.6
4	4.0	3.3	1.9	4.6	2.4	0.2	0.2	0.1	1.1	0.9	1.4	42.6	53.5	35.6	47.3
5	2.2	1.8	1.2	2.5	2.1	0.1	0.1	0.1	1.1	0.8	1.3	36.2	49.3	30.0	41.3
6	3.4	2.8	1.3	4.6	3.6	0.2	0.2	0.1	1.0	0.8	1.3	41.9	49.6	31.2	47.3

L'analisi dei livelli equivalenti ponderati A, L_{Aeq} , evidenzia valori compresi tra circa 36 dB(A) e 44 dB(A), con un gradiente chiaro tra le postazioni più esposte e quelle maggiormente schermate. Le condizioni più rumorose si registrano nella prima posizione d'ascolto, all'ingresso di Piazza Orazio Giustiniani (43,7 dB) e nel terzo *spot* presso l'uscita carrabile di Largo G. B. Marzi (42,9 dB), entrambi punti direttamente influenzati dal traffico veicolare esterno. Discorso completamente differente per il quinto punto d'ascolto, presso l'ingresso di Largo Dino Frisullo (dove si registra L_{Aeq}

inferiore, pari a 36,2 dB), caratterizzato da un ambiente acusticamente attenuato, risultato della collocazione interna e della protezione offerta dalle architetture circostanti. Il confronto tra L_{Aeq} e L_{Ceq} mostra differenze sistematiche variabili tra 8 e 17 dB, indice di una presenza costante di basse frequenze, verosimilmente legata a sorgenti tecniche e infrastrutturali. I valori percentili L_5 e L_{95} , che descrivono la variabilità temporale della scena sonora, confermano differenze marcate tra le postazioni. La minima escursione dinamica è stata registrata presso il terzo punto d'ascolto, di circa 8 dB, indice di una scena sonora stabile e poco variabile nel tempo.

L'analisi dei valori medi di *loudness* N_{avg} evidenzia un intervallo compreso tra circa 2,2 soneGF e 4,6 soneGF, delineando una notevole eterogeneità tra le sei postazioni analizzate. Le intensità più elevate, come per i *SPL*, si osservano presso le postazioni 1 e 3, entrambe caratterizzate da un'elevata esposizione al traffico veicolare e a sorgenti di tipo infrastrutturale. In tali punti, il *loudness* medio superiore a 4 soneGF indica un livello sonoro percepito come pieno e continuo, coerente con un ambiente urbano aperto e dinamico. Valori leggermente inferiori, intorno a 4 soneGF, si riscontrano nella posizione d'ascolto 4, situata in un'area di transito interno, dove la presenza di attività antropiche e sonore variabili contribuisce a un paesaggio acustico vivace ma non eccessivamente intenso. Lo *spot* 6 presenta un *loudness* medio di circa 3,4 soneGF, associato tuttavia a un'elevata instabilità temporale, come evidenziato dal rapporto tra i percentili N_5 e N_{95} di circa 3,6, che indica l'alternanza di fasi di quiete e picchi improvvisi. Le condizioni più attenuate si registrano invece nelle postazioni 2 e 5, entrambe collocate in spazi interni o parzialmente schermati, dove il *loudness* medio si mantiene intorno a 2 soneGF. In particolare, il punto 5 mostra il valore più basso dell'intero campione (circa 2,2 soneGF), coerente con un ambiente acusticamente controllato e privo di eventi impulsivi. Nel complesso, la distribuzione del *loudness* lungo il percorso di misura riflette una chiara gradazione spaziale: i punti prossimi agli ingressi o all'esposizione urbana presentano valori medi più elevati e una maggiore variabilità temporale, mentre le postazioni interne mostrano livelli ridotti e un comportamento più stabile, a testimonianza dell'efficacia dell'effetto di schermatura offerto dalla morfologia architettonica del complesso.

L'esame congiunto dei parametri di *roughness* e *sharpness* consente di descrivere le caratteristiche timbriche e la qualità spettrale del paesaggio sonoro registrato nelle diverse postazioni. I valori medi di *roughness* R si collocano in un intervallo ristretto, tra 0,1 e 0,2 asper, evidenziando un livello generale di asprezza sonora contenuto. Le postazioni 1, 3, 4 e 6 mostrano i valori più elevati indicativi di una presenza di componenti sonore irregolari o di sorgenti a spettro complesso (quali traffico, attività meccaniche o voci sovrapposte) che generano una tessitura acustica più densa e articolata. Nei punti 2 e 5, al contrario, il *roughness* si mantiene su valori inferiori, segnalando un

suono più morbido e privo di fluttuazioni rapide dell'inviluppo, tipico di ambienti più schermati o dominati da sorgenti a bassa variabilità.

Per quanto riguarda lo *sharpness*, i valori medi S oscillano tra 0,5 e 1,1 acum, con picchi massimi (S_5) prossimi a 1,4 acum nelle postazioni 1 e 4. Tali valori denotano una nitidezza timbrica moderata, in cui le componenti ad alta frequenza risultano distinguibili ma non sovrastanti. Il punto di ascolto 2 presenta i valori più bassi ($S \approx 0,5$ acum, $S_5 \approx 0,6$ acum), indicativi di un paesaggio sonoro ovattato e povero di componenti ad alta frequenza, coerente con la collocazione schermata del cortile interno della Facoltà di Architettura. Le variazioni registrate nelle altre postazioni non sono tali da determinare differenze percettive marcate, a conferma di un equilibrio spettrale simile tra gli ambienti analizzati. In generale, le componenti ad alta frequenza risultano percepibili ma non predominanti, contribuendo a un carattere acustico bilanciato.

Nel complesso, l'analisi oggettiva condotta sull'insieme delle postazioni dell'ex Mattatoio di Testaccio evidenzia una netta articolazione acustica interna al sito, determinata principalmente dalla morfologia urbana e dal grado di apertura verso l'esterno. Le postazioni prossime agli ingressi (1 e 3) risultano le più esposte al traffico e ai rumori di fondo urbani, caratterizzate da livelli sonori e di *loudness* elevati, maggiore presenza di basse frequenze e variabilità dinamica più marcata. Queste aree rappresentano gli ambienti acusticamente più energici e discontinui, con una tessitura sonora dominata da componenti veicolari e infrastrutturali. Al contrario, le postazioni interne o schermate (2 e 5) mostrano i valori più bassi sia di L_{Aeq} sia di N_{avg} , a indicare un contesto sonoro controllato e privo di fluttuazioni rapide. In tali zone, la presenza di superfici architettoniche chiuse e la minore esposizione diretta all'esterno contribuiscono a una riduzione dell'energia acustica e a un maggiore equilibrio timbrico, con *roughness* e *sharpness* contenute. Le postazioni 4 e 6 rappresentano situazioni intermedie ma più variabili: la prima per la presenza di attività antropiche e sonore intermittenti, la seconda per la prevalenza di rumori tecnici e meccanici che, pur non intensi, generano discontinuità percettive.

1.3.4 Conclusioni

Il presente sottocapitolo integra i risultati soggettivi e oggettivi derivanti dall'analisi del *soundscape* dell'ex Mattatoio di Testaccio, con l'obiettivo di individuare relazioni di coerenza o discrepanza tra la percezione umana e le misure acustiche e psicoacustiche ottenute in situ. Il confronto tra i due insiemi di dati consente di valutare in che misura le proprietà fisiche del campo sonoro influenzino le valutazioni qualitative espresse dai partecipanti, offrendo una lettura unitaria e multidimensionale del comportamento acustico del sito. L'integrazione dei dati oggettivi e soggettivi consente di delineare un quadro complessivo della qualità sonora del complesso, mettendo in

evidenza i fattori che contribuiscono al comfort acustico e quelli che generano situazioni di criticità o discontinuità percettiva. Questa fase conclusiva del caso studio ha lo scopo di validare i risultati sperimentali e di definire criteri interpretativi utili alla progettazione e alla gestione acustica di spazi culturali e performativi con caratteristiche analoghe.

Nell'analisi integrata dei sei punti di ascolto emerge una chiara coerenza tra le misure oggettive e le valutazioni soggettive. All'aumentare dell'energia acustica, espressa dai livelli L_{Aeq} , L_{Ceq} , dal *loudness* medio N_{avg} , e della variabilità temporale L_5-L_{95} e N_5/N_{95} , si osserva un incremento delle percezioni di caos e instabilità, accompagnato da una diminuzione dei giudizi di calma, stabilità, piacevolezza e qualità complessiva. Questo andamento è particolarmente evidente negli ingressi esposti alla viabilità urbana (postazioni 1 e 3), dove i valori energetici più elevati corrispondono a valutazioni più critiche e a una percezione di maggiore disordine acustico.

Al contrario, contesti caratterizzati da un contenuto spettrale meno brillante e da una minore complessità psicoacustica nelle alte frequenze (in particolare con valori ridotti di *sharpness* ai percentili superiori S_{95}) sono associati a percezioni più positive. Il caso più rappresentativo è lo *spot* 2, situato in un'area schermata e tranquilla, in cui il minimo valore di S_{95} dell'intero campione coincide con i punteggi più elevati di calma, piacevolezza e qualità percepita. Il *roughness* R risulta invece poco discriminante, mantenendosi pressoché costante tra le diverse postazioni e indicando un'assenza generale di modulazioni rapide o fluttuazioni impulsive significative.

La pertinenza acustica percepita mostra una forte dipendenza dalla coerenza funzionale delle sorgenti sonore con l'uso dello spazio. Ciò spiega i giudizi positivi assegnati alla postazione 4, in cui, nonostante la presenza di dinamica elevata e intensa attività antropica, la vivacità del contesto sociale (area bar e spazi aggregativi) viene percepita come coerente e quindi accettabile. Un meccanismo analogo si riscontra anche negli ingressi 1 e 3, dove il rumore del traffico (pur considerato fastidioso) viene riconosciuto come "di contesto", mantenendo elevati i punteggi di pertinenza.

All'opposto, la postazione 6, dominata da suoni meccanici intermittenti e scarsamente integrati con l'ambiente, presenta basse valutazioni sia di qualità sia di pertinenza, nonostante valori moderati di L_{Aeq} . Infine, condizioni a bassa energia e con ridotta presenza antropica, come nello *spot* 5, generano percezioni di tranquillità ma anche di monotonia, confermando che la presenza di suoni umani, quando coerente con la funzione dello spazio, contribuisce a migliorare il giudizio complessivo sul paesaggio sonoro.

Nel complesso, la correlazione tra parametri fisici e percezioni soggettive evidenzia come non sia l'intensità assoluta a determinare il comfort acustico, ma la coerenza tra le caratteristiche sonore, le funzioni d'uso e le aspettative percettive degli utenti.

Pur in presenza di corrispondenze complessivamente solide tra le misure oggettive e i giudizi soggettivi, l'analisi mette in luce alcune discrepanze significative che dimostrano come i soli livelli energetici non siano sufficienti a spiegare la qualità percepita del paesaggio sonoro. In particolare, la seconda postazione (pur non distinguendosi per i valori più bassi di L_{Aeq} e mostrando una componente in bassa frequenza marcata L_{Ceq}) presenta tuttavia i punteggi più alti di calma, piacevolezza e qualità. Tale divergenza trova spiegazione nella combinazione tra *loudness* contenuto, ridotta brillantezza spettrale e schermatura geometrica, che attenuano l'impatto percettivo del rumore di fondo. Il caso evidenzia il ruolo determinante della distribuzione spettrale e della coerenza contestuale rispetto all'intensità assoluta del suono.

Un comportamento analogo si osserva nella postazione 4, dove, nonostante un'elevata energia acustica e una dinamica marcata (N_{avg} , N_5/N_{95}), le valutazioni restano complessivamente positive. Ciò conferma che la coerenza funzionale delle sorgenti (in questo caso le voci e le attività sociali dell'area del bar) può mitigare l'impatto di livelli elevati, aumentando pertinenza e accettabilità percettiva. In sostanza, l'intensità acustica non è di per sé un indicatore di disturbo, se la natura della sorgente è percepita come coerente con il contesto d'uso.

Di segno opposto è la condizione della postazione 5, dove i minimi valori di L_{Aeq} e di *loudness* producono sì un ambiente tranquillo, ma al tempo stesso generano giudizi di monotonia e qualità moderata. Questo dimostra che la riduzione dell'energia sonora non implica necessariamente un miglioramento del comfort quando la scena acustica risulta povera di stimoli o di presenze antropiche significative.

La postazione 6 rappresenta invece il limite opposto: i livelli energetici risultano comparabili a quelli di altre aree, ma la maggiore variabilità temporale (N_5/N_{95}) e la presenza di suoni meccanici intermittenti e incongruenti rispetto alla funzione d'uso generano giudizi fortemente negativi su calma, stabilità e qualità, accompagnati da bassa pertinenza. In questo caso, non è l'intensità del suono a determinare la percezione negativa, ma la discontinuità e l'incoerenza del contenuto acustico.

Nel complesso, tali discrepanze mostrano che la percezione della qualità sonora dipende da tre fattori principali: la coerenza funzionale delle sorgenti con l'ambiente, la struttura temporale del segnale e la distribuzione spettrale dell'energia, in particolare alle alte frequenze. Tali elementi spiegano perché scene acustiche di pari livello energetico possano generare percezioni profondamente diverse in termini di comfort, stabilità e piacevolezza.

2 ANALISI ACUSTICA DI CORTI STORICHE

2.1 Inquadramento generale

2.1.1 Contesto e importanza acustica dei chiostri storici

Gli edifici storici di origine conventuale o universitaria includono spesso corti interne e chiostri che fungono da spazi di transizione tra l'ambiente costruito e l'esterno. In origine, i chiostri erano destinati alla meditazione, al cammino silenzioso e al raccoglimento spirituale. Nel tempo, molte di queste strutture hanno assunto nuove funzioni, come il chiostro di San Pietro in Vincoli, parte del complesso della Basilica, è oggi integrato nella sede della Facoltà di Ingegneria della Sapienza e l'ex Tommaseo, già scuola elementare, ospita attualmente il corso di laurea in Discipline delle Arti, della Musica e dello Spettacolo (DAMS) dell'Università Roma Tre.

Le corti interne possono essere definite spazi semiaperti, in quanto delimitate da pareti continue ma aperte superiormente o parzialmente verso l'esterno. Questa configurazione le colloca in una posizione intermedia tra gli ambienti interni, completamente confinati, e gli spazi aperti, privi di superfici riflettenti. Nei chiostri, la geometria perimetrale e la presenza di aperture superiori generano un equilibrio specifico tra contenimento e dispersione sonora, influenzando la propagazione del suono e la distribuzione dell'energia acustica³⁵.

Dal punto di vista acustico, le tre tipologie si differenziano per il grado di confinamento geometrico e per la modalità di propagazione del suono. Negli ambienti interni, l'energia sonora è soggetta a riflessioni multiple e diffuse, generando un campo prevalentemente riverberante. Negli spazi aperti, la propagazione è dominata dal campo diretto e dall'assorbimento atmosferico, con riflessioni generalmente trascurabili. Gli spazi semiaperti, come i chiostri storici, costituiscono una categoria intermedia tra gli ambienti chiusi e quelli completamente aperti.

Negli spazi semiaperti, le pareti perimetrali, generalmente costituite da superfici rigide e riflettenti, tendono a produrre riflessioni laterali e percorsi tangenziali che favoriscono la persistenza dell'energia sonora all'interno del cortile. Queste superfici, per la loro continuità e compattezza, possono incrementare il tempo di decadimento, generando un campo acustico localmente riverberante, soprattutto in prossimità dei bordi³⁶. La presenza di porticati, colonne e arcate, inoltre,

³⁵ Cfr. Antonio P. O. Carvalho, Anabela P. B. Carvalho, *Acoustic Characterization of Historic Cloisters in Portugal*, «Applied Acoustics», vol. 57, n. 3, 1999, pp. 265-274.

³⁶ Cfr. E. Bo, A. Astolfi, A. Pellegrino, D. Pelegrin-Garcia, G. E. Puglisi, L. Shtrepi, M. Rychtarikova, *The modern use of ancient theatres related to acoustic and lighting requirements: Stage design guidelines for the Greek theatre of Syracuse*, «Energy and Buildings», 95 (2015), pp. 106-115.

può introdurre ulteriori complessità nella propagazione del suono. Tali elementi, agendo come discontinuità periodiche, generano fenomeni di diffrazione e interferenza che alterano la distribuzione spaziale del livello sonoro. Le colonne, in particolare, possono creare variazioni locali di chiarezza e zone d'ombra acustica, modulando l'intensità e la direzionalità delle riflessioni in funzione della geometria e della distanza tra le campate³⁷. L'apertura superiore, invece, consente la dispersione di parte dell'energia sonora verso l'esterno, riducendo parzialmente il tempo di riverbero complessivo. Tale caratteristica rappresenta l'elemento distintivo rispetto agli ambienti chiusi, poiché introduce una componente di campo libero che mitiga gli effetti delle riflessioni multiple. La distribuzione dell'energia acustica risulta quindi non omogenea: nelle zone centrali prevale la propagazione diretta, con un'attenuazione più rapida del suono, mentre lungo le pareti e sotto i porticati si manifesta un campo più riflesso e persistente, espressione della natura ibrida che caratterizza gli spazi semiaperti³⁸.

Poiché i materiali impiegati nella costruzione dei chiostri, tipicamente pietra, intonaco e laterizio, presentano coefficienti di assorbimento tendenzialmente bassi, l'energia riflessa risulta predominante. Ciò può comportare un aumento del tempo di riverbero T_{30} e una riduzione della definizione D_{50} , con conseguente perdita di intelligibilità per la prosa e la musica dal vivo. Studi sperimentali e numerici hanno dimostrato che l'introduzione di superfici assorbenti reversibili può migliorare la diffusione e la chiarezza sonora, senza alterare l'identità architettonica dello spazio³⁹.

La complessità di tali configurazioni determina un comportamento eterogeneo, in cui la risposta acustica non può essere descritta né mediante i modelli tipici dell'acustica architettonica classica, né con quelli dell'acustica ambientale in campo libero⁴⁰. Per tale motivo, le corti storiche richiedono un approccio sperimentale e numerico integrato, basato su misurazioni in situ e simulazioni tridimensionali dell'ambiente reale. Studi recenti hanno evidenziato come la qualità sonora di questi spazi dipenda in modo critico dalle proporzioni geometriche e dai materiali, che incidono sulla chiarezza e sull'intelligibilità del segnale acustico, soprattutto in ambiti performativi o musicali⁴¹.

³⁷ Cfr. Kristian Jambrošić, Bojan Ivančević, Marjan Sikora, *Acoustic Properties of an Old Stone Atrium Used for Concerts*, «Acta Acustica united with Acustica», vol. 91, n. 2, 2005, pp. 330-336.

³⁸ Cfr. Ilaria Lombardi, Gino Iannace, Amelia Trematerra, *The Acoustic of a Courtyard*, «Building Acoustics», vol. 26, n. 3, 2019, pp. 237-249.

³⁹ Cfr. M. J. Kim, H. S. Yang, J. Kang, *A case study on controlling sound fields in a courtyard by landscape designs*, «Landscape and Urban Planning», 123 (2014), pp. 10-20.

⁴⁰ Cfr. Antonio P. O. Carvalho, S. R. C. Vilela, *Acoustic Characterization of Rehabilitated Cloisters*, «Journal of Sound and Vibration», vol. 241, n. 2, 2001, pp. 435-446.

⁴¹ Cfr. Gino Iannace, *The Use of Historical Courtyards for Musical Performances*, «Building Acoustics», vol. 23, nn. 3-4, 2016, pp. 207-222.

2.1.2 Obiettivi della ricerca

La ricerca si propone di definire una base sperimentale per la valutazione oggettiva delle prestazioni acustiche di due chiostrini storici romani, San Pietro in Vincoli e l'ex Tommaseo, e di verificare l'efficacia di possibili interventi correttivi reversibili e non invasivi. L'obiettivo è costruire un quadro analitico che metta in relazione le caratteristiche architettoniche e materiche di tali spazi con la loro risposta acustica, delineando criteri di ottimizzazione compatibili con la conservazione e la tutela del patrimonio storico-architettonico.

L'approccio metodologico integra rilievi geometrici, misurazioni fonometriche in situ e simulazioni numeriche tridimensionali con l'obiettivo di caratterizzare in modo oggettivo le prestazioni acustiche dei chiostrini storici analizzati e validare modelli previsionali affidabili. L'integrazione tra misure in situ e simulazioni tridimensionali consente di verificare l'attendibilità dei modelli numerici e di estendere l'analisi a condizioni non direttamente misurabili, come la valutazione di scenari ipotetici o interventi progettuali.

L'elaborazione dei dati si fonda su parametri principali dell'acustica architettonica: tempo di riverbero T_{30} , chiarezza C_{80} , definizione D_{50} e livello di pressione sonora equivalente L_{Aeq} . Tali indicatori descrivono la distribuzione temporale e spaziale dell'energia sonora, consentendo di correlare la risposta acustica con la geometria e la riflettanza dei materiali.

L'unione tra misure sperimentali e simulazioni tridimensionali permette di rappresentare fedelmente il comportamento acustico dei chiostrini, superando i limiti dei modelli semplificati. I modelli numerici sono stati calibrati sui risultati sperimentali per ridurre le discrepanze tra misure e simulazioni, garantendo coerenza tra il comportamento fisico reale e quello previsto dal software. Tale processo di calibrazione ha consentito di ottenere modelli predittivi più stabili, in grado di supportare la progettazione acustica e di simulare l'effetto di differenti materiali o configurazioni sceniche. Il confronto tra dati reali e previsionali consente così di determinare la risposta acustica complessiva e di verificare l'affidabilità dei modelli numerici adottati.

Infine, le simulazioni numeriche permettono di esplorare la validità di soluzioni reversibili, come l'introduzione di superfici riflettenti temporanee, progettate per migliorare chiarezza e intelligibilità e la distribuzione del campo sonoro percepito dagli utenti, senza tuttavia alterare l'identità architettonica e materica degli spazi. La metodologia proposta, fondata sull'integrazione tra rilievo, misura e simulazione, consente di coniugare l'approccio ingegneristico basato su dati quantitativi con la salvaguardia dei valori storici, culturali e architettonici dei chiostrini analizzati.

2.1.3 Parametri acustici considerati (L_{Aeq} , T_{30} , C_{80} , D_{50})

L'analisi acustica di spazi complessi come corti e chiostri storici richiede l'impiego di parametri oggettivi in grado di descrivere in modo quantitativo le caratteristiche del campo sonoro. Tali indicatori permettono di superare la percezione soggettiva e di ricondurre le prestazioni acustiche a valori misurabili e confrontabili nel tempo e tra differenti configurazioni spaziali. In contesti architettonici storici, caratterizzati da geometrie irregolari e materiali eterogenei, l'uso di parametri standardizzati consente di individuare con precisione le cause delle variazioni acustiche, evidenziando come la morfologia, la porosità dei materiali o la presenza di elementi architettonici complessi influenzino la propagazione e la distribuzione dell'energia sonora. L'utilizzo di parametri standardizzati consente inoltre di garantire la replicabilità delle misure e la comparabilità con altri studi condotti in contesti simili, conformemente alle indicazioni delle norme internazionali ISO 3382⁴².

I parametri acustici oggettivi possono essere distinti in base alla natura del fenomeno che descrivono. I parametri energetici, come il livello di pressione sonora equivalente, L_{Aeq} , forniscono informazioni sull'intensità complessiva del campo acustico ponderata secondo la sensibilità uditiva umana. I parametri temporali, come il tempo di riverbero, T_{30} , descrivono la persistenza dell'energia sonora dopo l'interruzione della sorgente, indicando la capacità dell'ambiente di trattenere o dissipare il suono. Infine, il parametro di chiarezza, C_{80} , valuta il rapporto tra energia diretta e riflessa, fornendo un indicatore della comprensibilità e della nitidezza del suono musicale, mentre il parametro di definizione, D_{50} , descrive la percentuale di energia sonora percepita come utile ai fini dell'intelligibilità per la prosa e per la musica. Questi indicatori, analizzati congiuntamente, permettono di costruire un quadro coerente della risposta acustica complessiva, individuando eventuali criticità e punti di forza in relazione alla funzione e all'uso performativo degli spazi analizzati. La selezione dei parametri oggettivi risponde quindi alla necessità di descrivere il comportamento acustico dei chiostri storici in modo completo e coerente con gli obiettivi della ricerca. La loro analisi integrata consente non solo di quantificare le prestazioni acustiche, ma anche di fornire indicazioni operative per l'ottimizzazione progettuale e la valorizzazione funzionale degli spazi storici destinati a eventi culturali. Essi permettono di quantificare la qualità del campo sonoro rispetto a intelligibilità, chiarezza, equilibrio energetico e potenziale di fruizione performativa, costituendo una base per il confronto tra i casi studio e per la successiva fase di modellazione numerica.

⁴² International Organization for Standardization, *ISO 3382: Acoustics – Measurement of Room Acoustic Parameters*, Geneva, ISO, 2008.

Il livello di pressione sonora equivalente L_{Aeq} , espressa in decibel, rappresenta il valore energetico medio del livello sonoro ponderato A su un determinato intervallo temporale. È definito, secondo la norma ISO 1996-1:2016⁴³, come il livello continuo che, se mantenuto costante per lo stesso periodo di osservazione, avrebbe la stessa energia sonora totale del segnale reale variabile nel tempo. Esprime dunque, una media energetica che traduce un segnale fluttuante in un valore unico e stabile, utile per confronti e valutazioni acustiche standardizzate. A differenza dei livelli istantanei o dei valori di picco, L_{Aeq} tiene conto dell'intero andamento temporale del segnale acustico.

Il livello di pressione sonora equivalente si esprime tramite l'Equazione 2.1:

$$L_{Aeq,T} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) \quad (2.1)$$

dove:

T : tempo di misura,

$p_A(t)$: pressione sonora ponderata A all'istante t ,

p_0 : pressione di riferimento pari a 20 μ Pa.

La ponderazione A, definita sulla base delle curve isofoniche di eguale sensazione sonora e riportate nella norma ISO 226:2023⁴⁴, simula la risposta in frequenza dell'orecchio umano, la cui sensibilità diminuisce alle basse e alle alte frequenze, mostrando un picco di massima udibilità nell'intervallo compreso tra circa 3 kHz e 4 kHz. L'impiego del filtro A è previsto dalle norme internazionali per la valutazione dell'esposizione sonora e del comfort acustico negli ambienti ordinari e urbani. Tale ponderazione consente di correlare più efficacemente il livello fisico misurato con la sensazione di intensità sonora percepita.

Il tempo di riverbero T_{30} , espresso in secondi, è definito dalla norma ISO 3382-1:2009⁴⁵ come il tempo necessario affinché il livello di pressione sonora decada di 60 dB dopo l'interruzione della sorgente, stimato mediante l'estrapolazione lineare dalla pendenza della curva di decadimento energetico osservato su un intervallo di 30 dB compreso tra -5 dB e -35 dB rispetto al livello iniziale.

⁴³ International Organization for Standardization, *ISO 1996-1: Acoustics – Description, Measurement and Assessment of Environmental Noise – Part 1: Basic Quantities and Assessment Procedures*, Geneva, ISO, 2016, p. 9.

⁴⁴ International Organization for Standardization, *ISO 226: Acoustics – Normal equal-loudness-level contours*, Geneva, ISO, 2023.

⁴⁵ International Organization for Standardization, *ISO 3382-1:2009: Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces*, Geneva, ISO, 2009.

Il tempo di riverbero T_{30} è espresso in letteratura⁴⁶ dall'Equazione 2.2:

$$T_{30} = 60 \left(\frac{\Delta L}{\Delta t} \right)^{-1} \quad (2.2)$$

dove il fattore 60 rappresenta l'intervallo di decadimento, espresso in decibel, al quale il tempo di riverbero viene estrapolato a partire dal tratto di 30 dB effettivamente misurato, compreso tra -5 dB e -35 dB. Il termine ΔL indica la variazione di livello di pressione sonora compresa tra -5 dB e -35 dB, di ampiezza pari a 30 dB, mentre $\Delta t = t_{-35} - t_{-5}$, rappresenta il corrispondente intervallo temporale, espresso in secondi, necessario per tale decadimento. Il tempo di riverbero rappresenta la capacità di un ambiente di trattenere l'energia sonora dopo l'interruzione della sorgente, ed è dipende principalmente dal volume, dall'estensione complessiva delle superfici e dalle caratteristiche acustiche dei materiali costituenti. Sebbene il parametro T_{30} sia definito in riferimento a un decadimento di 60 dB, nella pratica sperimentale un intervallo così ampio è raramente misurabile, in particolare in ambienti semiaperti o fortemente assorbenti, dove il rumore di fondo e i limiti dinamici della strumentazione impediscono di osservare un decadimento completo e regolare⁴⁷. Per tali motivi, la norma ISO 3382-2⁴⁸ prescrive di misurare un intervallo di decadimento più breve, tipicamente di 30 dB, compreso tra -5 dB e -35 dB, poiché questa porzione della curva di decadimento energetico risulta più stabile e meno sensibile al rumore di fondo o a variazioni esterne.

Il parametro di chiarezza per la musica C_{80} , definito dalla norma ISO 3382-1:2009, esprime il rapporto, in decibel, tra l'energia sonora che raggiunge l'ascoltatore entro i primi 80 millisecondi dall'arrivo del suono diretto e l'energia che giunge successivamente.

Formalmente, è espresso come:

$$C_{80} = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad (2.3)$$

Il numeratore dell'Equazione 2.3 rappresenta l'energia sonora ricevuta nei primi 80 ms, comprendente il suono diretto e le prime riflessioni utili che contribuiscono alla chiarezza e definizione del segnale musicale. Il denominatore include invece l'energia associata alle riflessioni

⁴⁶ Cfr. Heinrich Kuttruff, *Room Acoustics*, 6th ed., Boca Raton, CRC Press, 2016, p. 81.

⁴⁷ Cfr. Leo L. Beranek, *Acoustics: Sound Fields and Transducers*, London, Academic Press, 2012, pp. 195-199.

⁴⁸ International Organization for Standardization, *ISO 3382-2: Acoustics – Measurement of Room Acoustic Parameters – Part 2: Reverberation Time in Ordinary Rooms*, Geneva, ISO, 2008.

tardive, percepite come riverbero residuo. Il limite temporale di 80 ms deriva da studi psicoacustici⁴⁹ che evidenziano come, per la musica, un intervallo leggermente superiore rispetto al parlato favorisca la pienezza timbrica e la fusione sonora tra sorgente diretta e prime riflessioni. Per spazi destinati ad esecuzioni musicali o performative, il valore ottimale di C_{80} dipende dalla funzione acustica dell'ambiente: livelli prossimi a 0 dB garantiscono un equilibrio tra chiarezza e pienezza sonora, valori più elevati indicano un suono più nitido e definito, caratterizzato da prevalenza dell'energia diretta, mentre valori inferiori corrispondono a una maggiore diffusione del campo riverberante, associata a un effetto di pienezza sonora ma minore chiarezza⁵⁰. Il parametro C_{80} risulta fortemente influenzato dalla distanza tra sorgente e ricevitore, dalla configurazione geometrico-architettonica dell'ambiente e dalle proprietà acustiche dei materiali, variabili che determinano il bilancio energetico tra contributo diretto e riverberante⁵¹.

Il parametro di definizione D_{50} , definito dalla norma ISO 3382-1:2009, rappresenta la percentuale dell'energia sonora utile che raggiunge l'ascoltatore entro i primi 50 millisecondi dall'arrivo del suono diretto, rispetto all'energia sonora totale ricevuta. Tale parametro descrive la quota di energia utile all'intelligibilità del parlato o alla definizione musicale, in funzione della rapidità con cui l'energia acustica raggiunge l'ascoltatore.

Il parametro di definizione D_{50} è espresso tramite la relazione:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.4)$$

Il numeratore dell'Equazione 2.4 rappresenta l'energia sonora utile, costituita dal suono diretto e dalle prime riflessioni che giungono entro i primi 50 ms. Il denominatore rappresenta invece l'energia sonora totale, comprensiva sia delle riflessioni utili sia di quelle tardive che costituiscono il campo riverberante. Il valore di D_{50} è adimensionale e varia tra 0 e 1. Valori prossimi a 1 indicano che la maggior parte dell'energia sonora è concentrata nelle prime riflessioni, generando una buona definizione temporale e una maggiore intelligibilità del parlato, valori bassi indicano invece una prevalenza di energia tardiva e quindi una percezione più riverberante e meno nitida. Valori superiori a 0,5 indicano un'adeguata chiarezza e intelligibilità per il parlato, mentre valori compresi tra 0,3 e 0,5 risultano generalmente ottimali per la musica o per performance che richiedono un equilibrio tra

⁴⁹ Cfr. M. Barron, *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, London, E & FN Spon, 1993, pp. 74–76.

⁵⁰ Cfr. Jürgen Meyer, *Acoustics and the Performance of Music*, 5^a ed., New York, Springer, 2009, pp. 112–114.

⁵¹ Cfr. Leo L. Beranek, *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*, cit., pp. 455–456.

definizione e pienezza sonora⁵². Valori inferiori a 0,3 segnalano condizioni di eccessiva riverberazione e ridotta chiarezza percettiva⁵³. Il parametro D_{50} risulta anch'esso influenzato dalla distanza tra sorgente e ricevitore, dalla geometria dell'ambiente e dal grado di assorbimento e diffusione dei materiali presenti⁵⁴.

I diversi parametri analizzati offrono una visione coerente del comportamento acustico dei chiostrini storici, permettendo di valutare quantità, durata e distribuzione temporale dell'energia sonora all'interno degli ambienti considerati. La correlazione tra i principali indicatori consente di interpretare la risposta acustica degli spazi, confrontando le prestazioni complessive dei chiostrini e la loro idoneità a funzioni performative. L'impiego congiunto dei parametri oggettivi costituisce una metodologia ripetibile per la caratterizzazione comparativa di ambienti semiaperti, nei quali la propagazione sonora non è pienamente diffusa, ma dipende fortemente dalla geometria e dai materiali costitutivi. Tale approccio consente di individuare le criticità specifiche e di formulare strategie di ottimizzazione acustica progressive, adattabili, reversibili e compatibili con la tutela e la valorizzazione sostenibile del patrimonio architettonico.

La Tabella 2.1 riassume i principali parametri acustici oggettivi considerati, evidenziandone la descrizione fisica e il significato applicativo ai fini della valutazione della qualità sonora degli ambienti analizzati.

Tabella 2.1 – Sintesi dei parametri acustici oggettivi considerati, con relativa descrizione e significato applicativo.

Parametro	Descrizione	Significato applicativo
L_{Aeq}	Livello di pressione sonora equivalente ponderato A	Intensità sonora media percepita secondo la sensibilità uditiva umana
T_{30}	Durata del decadimento di 30 dB del livello sonoro	Capacità dell'ambiente di disperdere energia acustica
C_{80}	Rapporto tra energia sonora ricevuta entro 80 ms e l'energia successiva	Misura la chiarezza del suono musicale
D_{50}	Percentuale di energia sonora ricevuta entro 50 ms rispetto all'energia totale	Quota di energia utile alla definizione del parlato e/o musicale

⁵² Cfr. Jürgen Meyer, *Acoustics and the Performance of Music*, cit., pp. 115–116.

⁵³ Cfr. M. Barron, *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, cit., pp. 188–189.

⁵⁴ Cfr. Leo L. Beranek, *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*, cit., pp. 455–456.

2.1.4 *Casi studio: San Pietro in Vincoli ed ex Istituto Tommaseo*

La scelta dei casi studio è stata guidata dalla necessità di analizzare spazi semiaperti di rilevanza storica e morfologica differente, ma accomunati da un analogo valore architettonico e funzionale. I due chiostri selezionati, San Pietro in Vincoli ed ex Tommaseo, rappresentano due esempi significativi di corti interne con configurazioni geometriche, materiali costruttivi e condizioni acustiche diverse. Entrambi sono collocati in contesti urbani complessi e svolgono oggi funzioni pubbliche e culturali, che richiedono una qualità sonora adeguata sia alla fruizione quotidiana sia ad attività performative o espositive temporanee.

La scelta dei due chiostri è stata guidata da un insieme di criteri tecnico-scientifici, finalizzati a garantire la rappresentatività tipologica e la confrontabilità dei risultati. Il primo criterio ha riguardato l'accessibilità e la sicurezza operativa: entrambi i chiostri consentono di eseguire misurazioni fonometriche in condizioni controllate e ripetibili, requisito essenziale per validare modelli previsionali. Il secondo criterio ha riguardato la diversità architettonica e costruttiva, poiché San Pietro in Vincoli presenta una configurazione più chiusa, con superfici lapidee ad alta riflettanza e porticati continui, mentre l'ex Tommaseo mostra una struttura più aperta, con finiture laterizie e un minore grado di confinamento geometrico. Questa differenza permette di indagare in che modo le variazioni geometriche e la riflettanza superficiale influenzino la propagazione del suono e i principali parametri acustici. Il terzo criterio ha riguardato la pertinenza funzionale, poiché entrambi i siti sono oggi luoghi di transito e di aggregazione con potenziale vocazione performativa, in cui l'acustica riveste un ruolo determinante per la qualità dell'esperienza sonora.

Il presente sottocapitolo è articolato in due sezioni distinte, dedicate rispettivamente ai due chiostri oggetto di analisi:

- c) Chiostro di San Pietro in Vincoli, appartenente al complesso basilicale omonimo e oggi sede della Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale dell'Università "La Sapienza";
- d) Corte interna dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo, attualmente sede del corso di laurea in Discipline delle Arti, della Musica e dello Spettacolo (DAMS) presso l'Università Roma Tre.

Ciascun caso studio è analizzato secondo una struttura descrittiva coerente, che integra in modo continuo gli aspetti storici, architettonici e funzionali. L'analisi prende avvio dall'inquadramento storico e architettonico, volto a ricostruire l'evoluzione costruttiva dei complessi e a evidenziare la trasformazione degli usi originari nelle attuali destinazioni. Segue l'esame delle caratteristiche geometriche e morfologiche, con attenzione alle proporzioni planimetriche e altimetriche, ai materiali di delimitazione e al grado di apertura superiore, elementi che possono incidere in modo diretto sulla propagazione e sulla distribuzione dell'energia sonora. Infine, la descrizione delle funzioni e degli

utilizzi contemporanei consente di comprendere il ruolo dei due chiostri all'interno dei rispettivi contesti universitari e di valutarne le potenzialità per attività culturali, didattiche o performative. Questa impostazione unitaria permette di correlare in modo sistematico le caratteristiche architettoniche e geometriche con la loro rilevanza acustica.

a) Chiostro di San Pietro in Vincoli:

Il complesso di San Pietro in Vincoli, situato sul colle Oppio a Roma, fu edificato nel V secolo per volontà dell'imperatrice Licinia Eudossia, moglie di Valentiniano III, con la funzione di custodire le catene attribuite alla prigionia di San Pietro⁵⁵. La basilica, originariamente di impianto paleocristiano, subì successive modifiche strutturali e restauri nel corso dei secoli, adattandosi gradualmente alle esigenze religiose e funzionali delle diverse epoche. Tra la fine del XV e l'inizio del XVI secolo venne aggiunto l'attuale chiostro, che si affianca al corpo principale della chiesa come parte del convento agostiniano sorto in quegli anni⁵⁶. Il chiostro, attribuito a Giuliano da Sangallo, rappresenta un tipico esempio di architettura rinascimentale romana, ispirata ai principi di proporzione, regolarità e ordine geometrico. L'impianto planimetrico è organizzato intorno a un cortile centrale, delimitato da un porticato continuo su quattro lati costituito da arcate a tutto sesto sorrette da colonne ioniche⁵⁷. Il piano superiore, aggiunto successivamente, mantiene l'allineamento e la scansione delle aperture del livello inferiore.

A partire dal XIX secolo, il complesso è stato progressivamente destinato a funzioni didattiche e accademiche. Oggi ospita la Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale della Sapienza Università di Roma, mantenendo tuttavia gran parte della struttura originaria del chiostro rinascimentale. L'area porticata e il cortile centrale sono ora utilizzati quotidianamente come spazi di passaggio, sosta e incontro per studenti e personale accademico. Oltre alla funzione ordinaria di collegamento tra i diversi ambienti del complesso, il chiostro ospita occasionalmente attività culturali e istituzionali dell'Ateneo, quali presentazioni, incontri e cerimonie interne, che richiedono condizioni acustiche adeguate alla comprensione del parlato. Pur non essendo concepito per la *performance* musicale, inoltre, il chiostro potrebbe essere adattato, in contesti specifici e controllati, a sperimentazioni performative o installative di carattere artistico.

Le Figure 2.1a e 2.1b mostrano rispettivamente la facciata principale del complesso di San Pietro in Vincoli e il chiostro rinascimentale interno, oggetto di analisi acustica nel presente studio.

⁵⁵ Cfr. Paolo Portoghesi, *Roma del Rinascimento*, Roma, Laterza, 1976, pp. 85-88.

⁵⁶ Cfr. M. Armellini, *Le chiese di Roma dal secolo IV al XIX*, Roma, Tipografia Vaticana, 1891, pp. 524-526.

⁵⁷ Cfr. F. Titi, *Descrizione delle Pitture, Sculture e Architetture esposte in Roma*, Roma, 1763, pp. 312-314.



a)

b)

Figura 2.1 – Vedute del complesso di San Pietro in Vincoli.

- a) Veduta della facciata principale (fonte: <https://www.openhouseroma.org>).
 b) Vista del chiostro interno rinascimentale.

Il chiostro di San Pietro in Vincoli presenta una pianta rettangolare quasi quadrata, con lunghezza dei lati di 28,3 m e 32,6 m, caratterizzata da una distribuzione simmetrica degli elementi architettonici che ne conferisce equilibrio spaziale e regolarità prospettica. Il portico perimetrale, che costituisce la zona di transizione tra il cortile centrale e gli ambienti interni, è articolato in una sequenza regolare di arcate: sette sui lati minori e otto sui lati maggiori, con una luce media di circa 4 m per campata. L'altezza degli archi del portico è di 5,5 m, la sommità del primo piano è a circa 12 m, mentre la quota del secondo piano, corrispondente all'altezza del tetto, raggiunge circa 17 m. Tali proporzioni delineano una relazione tra altezza e larghezza media di circa 0,55, configurando uno spazio a prevalente sviluppo orizzontale e con moderato confinamento verticale.

La Tabella 2.2 riassume le principali caratteristiche geometriche del chiostro di San Pietro in Vincoli, includendo le dimensioni planimetriche, la configurazione verticale e le proporzioni generali dell'ambiente.

Tabella 2.2 – Principali dimensioni geometriche e proporzioni del chiostro di San Pietro in Vincoli.

Parametro	Valore
Forma planimetrica	Rettangolare quasi quadrata
Lato minore [m]	28.3
Lato maggiore [m]	32.6
Luce media delle arcate [m]	4.0
Altezza media delle arcate [m]	5.5
Altezza complessiva [m]	≈ 17.0
Rapporto altezza/larghezza media	≈ 0.55

La Figura 2.2 mostra la planimetria del complesso di San Pietro in Vincoli.

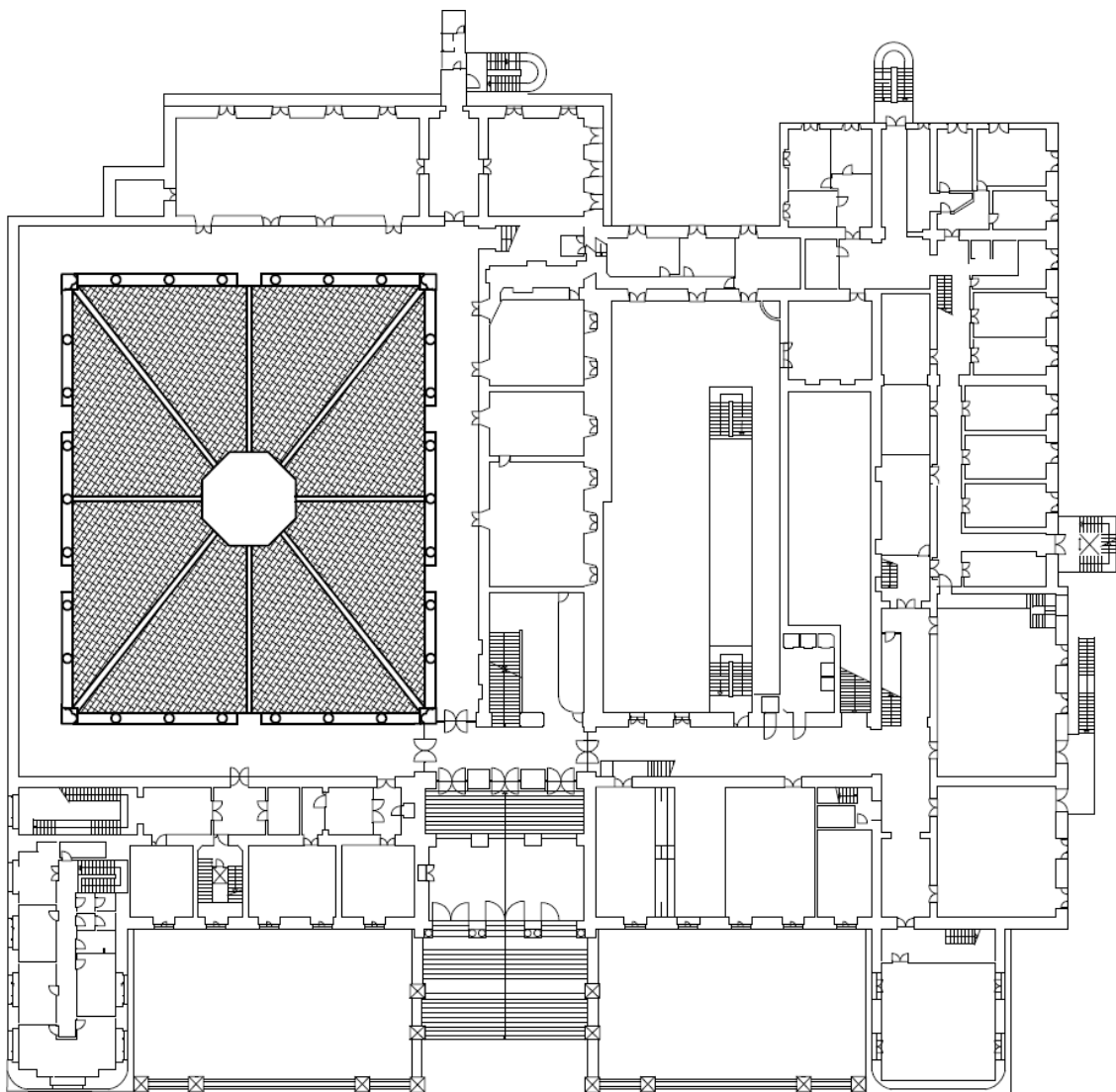


Figura 2.2 – Planimetria generale del complesso di San Pietro in Vincoli con messa in evidenza della planimetria del chiostro rinascimentale.

Le strutture principali sono realizzate in muratura mista di pietra e laterizio, rivestite da intonaco e arricchite da elementi architettonici in marmo. Le colonne sono in travertino, mentre le aperture che si affacciano sul chiostro comprendono porte in legno e finestre con infissi in legno e vetro, entrambe incorniciate da modanature marmoree. Il cortile centrale è pavimentato con ciottoli levigati delimitati da lastre di travertino, mentre il porticato presenta un rivestimento in lastre di laterizio cotto. I rialzi e i gradini che separano il portico dalla corte sono anch'essi in travertino, realizzati con blocchi monolitici.

La Tabella 2.3 sintetizza i materiali costruttivi predominanti del chiostro di San Pietro in Vincoli.

Tabella 2.3 – Principali materiali del chiostro di San Pietro in Vincoli.

Elemento	Materiale prevalente
Murature perimetrali	Laterizio intonacato
Colonne e cornici	Travertino
Pavimentazione della corte	Ciottoli levigati
Pavimentazione del portico	Laterizio cotto
Aperture e infissi	Legno e vetro
Porte interne	Legno

I materiali impiegati, caratterizzati da una struttura prevalentemente rigida e compatta, presentano generalmente un coefficiente di assorbimento acustico medio-basso nell'intervallo 125–1000 Hz, con una limitata capacità di dissipare l'energia sonora incidente, comportamento tipico delle superfici lapidee e laterizie. Le colonne e i rivestimenti in travertino, per la loro elevata densità e compattezza, tendono a riflettere la maggior parte dell'energia sonora favorendo la formazione di un campo acustico riverberante. In tali condizioni, eventuali attenuazioni possono derivare dalla rugosità del pavimento in ciottoli, la cui morfologia irregolare contribuisce alla dispersione parziale delle riflessioni dirette. Le superfici lignee di porte e infissi, pur costituendo una porzione marginale della superficie totale, possono introdurre lievi attenuazioni alle alte frequenze, attribuibili all'elasticità del materiale.

Inoltre, diversi elementi architettonici possono esercitare un'influenza significativa sulla propagazione del suono all'interno del chiostro. Le superfici verticali continue, caratterizzate da elevata riflettanza, tendono a favorire la formazione di riflessioni laterali e tangenziali, mentre il rapporto planimetrico, rettangolare ma prossimo alla forma quadrata, mantiene una buona simmetria percettiva pur potendo generare una lieve anisotropia acustica dovuta alla diversa distanza tra le pareti. La presenza del doppio ordine di aperture e dell'ampia superficie libera superiore contribuisce verosimilmente alla dispersione verticale dell'energia sonora, riducendo l'accumulo tipico degli spazi

completamente chiusi. Il porticato perimetrale, infine, con la sua sequenza di arcate, può indurre fenomeni di diffrazione e interferenza che modificano localmente la distribuzione del campo acustico.

La continuità d'uso e il buon stato di conservazione rendono il chiostro di San Pietro in Vincoli un caso di studio particolarmente adatto per l'analisi acustica degli spazi storici semiaperti. La combinazione tra geometria regolare, superfici rigide e riflettenti, porticato continuo e ampia apertura zenitale determina una distribuzione complessa dell'energia sonora e del campo acustico. Inoltre, il valore storico e architettonico dell'ambiente offre l'opportunità di approfondire strategie di ottimizzazione acustica reversibili e compatibili con la tutela dello spazio. Tali caratteristiche ne fanno un esempio significativo per lo studio del comportamento acustico di ambienti storici semiaperti destinati a funzioni collettive e culturali nonché un caso di particolare interesse per potenziali usi performativi controllati o eventi artistici.

b) Corte interna dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo:

Il complesso dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo, progettato dall'architetto Vincenzo Fasolo e situato nel quartiere Ostiense a Roma, fu edificato tra il 1924 e il 1930 come scuola elementare statale nell'ambito del programma di edilizia pubblica promosso dal Governatorato di Roma durante il periodo fascista, volto a dotare la città di nuovi edifici scolastici moderni e funzionali⁵⁸. L'edificio, con tipologia a corte chiusa e pianta rettangolare, rispondeva ai criteri funzionali e igienico-sanitari propri dell'edilizia scolastica razionalista del primo Novecento, con ampie finestre, corridoi perimetrali e un cortile interno destinato ad attività ricreative e di aerazione.

Durante il secondo dopoguerra il complesso mantenne la funzione educativa, subendo solo modesti interventi di manutenzione. Negli anni Ottanta la scuola fu progressivamente dismessa a causa del calo demografico e dell'inadeguatezza degli impianti. Nel 1993 il Comune di Roma ne cedette la proprietà all'Università degli Studi Roma Tre, di recente istituzione, che lo destinò a sede del Dipartimento di Filosofia, Comunicazione e Spettacolo e del corso DAMS⁵⁹.

Il cortile interno, pur mantenendo la funzione distributiva originaria, è oggi usata prevalentemente come luogo di sosta temporanea, socializzazione e aggregazione informale da studenti e personale accademico durante le pause. Oltre alla funzione quotidiana, il cortile viene talvolta utilizzato per eventi accademici o culturali interni, come presentazioni di progetti, incontri istituzionali e piccole cerimonie universitarie. Sebbene non sia concepito per *performance* musicali, la configurazione regolare e il livello di contenimento sonoro consentono, in contesti controllati, un

⁵⁸ Cfr. Archivio SIUSA, *Scuola elementare statale Niccolò Tommaseo*, Ministero della Cultura, <https://siusa-archivi.cultura.gov.it/cgi-bin/pagina.pl?Chiave=80533&TipoPag=prodente>

⁵⁹ Cfr. 3CH Srl, *Università Roma Tre – Ex Istituto Tommaseo*, <https://3ch.it/gare/universita-roma-tre-ex-istituto-tommaseo>

possibile utilizzo per attività performative o installative di carattere artistico, compatibili con la vocazione culturale del DAMS e con l'assetto architettonico dello spazio.

Le Figure 2.3a e 2.3b mostrano rispettivamente la facciata principale del complesso dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo e la corte interna, oggetto della caratterizzazione acustica.



a)

b)

Figura 2.3 – Vedute del complesso dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo.

a) Veduta della facciata principale.

b) Vista della corte interna (fonte: [https://www.3ch.it/storage/it1-\(1\).webp](https://www.3ch.it/storage/it1-(1).webp)).

L'edificio presenta una tipologia a corte interna di forma rettangolare, coerente con i criteri costruttivi delle scuole comunali romane della prima metà del Novecento. La pianta si sviluppa su un impianto di dimensioni prossime a 45 metri di lunghezza e 26 di larghezza, con il cortile centrale che costituisce il fulcro distributivo attorno al quale si organizzano i corpi perimetrali destinati ad aule, corridoi e uffici. L'articolazione planimetrica è regolare e simmetrica, con accessi principali disposti sui lati maggiori e collegamenti trasversali che garantiscono la continuità dei percorsi interni. La corte, priva di porticato, svolge la funzione di spazio scoperto in connessione diretta con i corridoi del piano terra. L'edificio si compone di quattro piani fuori terra più un piano seminterrato. La struttura presenta un'altezza complessiva di circa 17,7 m fino alla sommità della copertura, con un rapporto medio tra altezza e larghezza di circa 0,5, che denota una configurazione spaziale prevalentemente orizzontale e un moderato sviluppo verticale. Le ali perimetrali si affacciano sull'ambiente centrale attraverso corridoi e balconate. Le aperture, costituite da finestre e portoni, sono disposte in modo regolare, seguendo un ritmo orizzontale costante che conferisce al complesso un aspetto ordinato e una marcata linearità compositiva.

La Tabella 2.4 riassume le principali caratteristiche geometriche della corte dell'ex Istituto Tommaseo, includendo le dimensioni planimetriche, la configurazione verticale e le proporzioni generali dell'ambiente.

Tabella 2.4 – Principali dimensioni geometriche e proporzioni della corte dell'ex Istituto Tommaseo.

Parametro	Valore
Forma planimetrica	Rettangolare
Lato minore [m]	26
Lato maggiore [m]	45
Numero di piani	4
Altezza complessiva [m]	≈ 17.7
Rapporto altezza/larghezza media	≈ 0.5

La Figura 2.4 mostra la planimetria dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo.

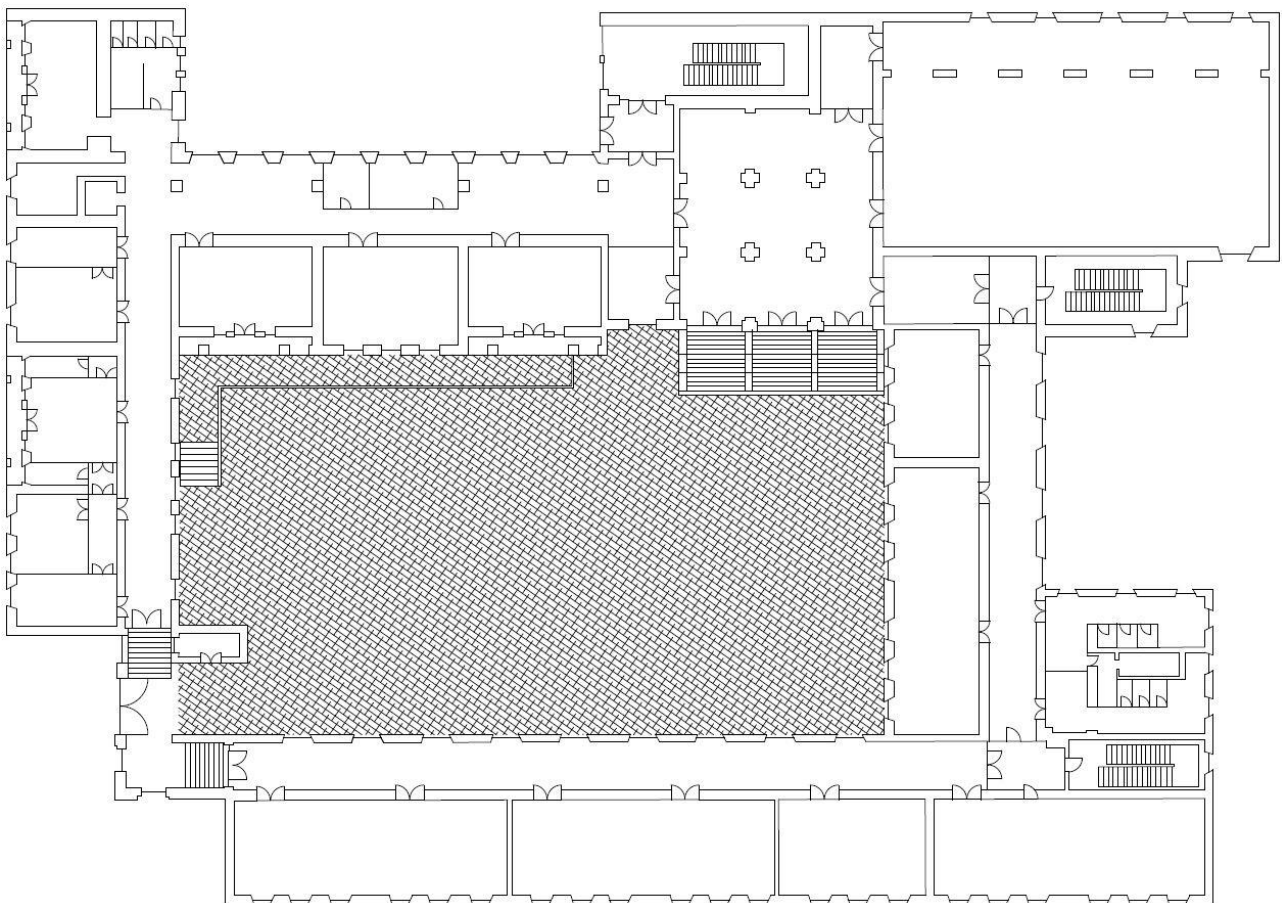


Figura 2.4 – Planimetria generale dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo con messa in evidenza della planimetria della corte interna.

Le murature portanti sono realizzate in laterizio pieno intonacato, con strutture orizzontali in solai misti acciaio-laterizio o in calcestruzzo armato negli interventi più recenti. Le finestre presentano telai in alluminio con vetri trasparenti, mentre le superfici interne del cortile, uniformi e continue, evidenziano una finitura regolare e coerente con l'insieme architettonico. La pavimentazione è realizzata con cubetti rettangolari di pietra naturale, e le scale con i relativi pianerottoli sono rivestiti in travertino.

La Tabella 2.5 sintetizza i materiali costruttivi predominanti della corte dell'ex Istituto Tommaseo.

Tabella 2.5 – Principali materiali della corte dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo.

Elemento	Materiale prevalente
Murature perimetrali	Laterizio intonacato
Cornici e davanzali	Travertino
Pavimentazione	Cubetti rettangolari di pietra naturale
Aperture e infissi	Alluminio e vetro
Scale e pianerottoli	Rivestimento in travertino

I materiali utilizzati, per la loro densità e rigidità, tendono a presentare una ridotta capacità di assorbimento acustico, con valori generalmente contenuti nelle bande di frequenza comprese tra 125 e 1000 Hz, e una conseguente limitata attenuazione dell'energia sonora incidente. Le murature in laterizio intonacato, che costituiscono la quasi totalità delle superfici perimetrali, tendono a riflettere in modo regolare le onde sonore, contribuendo alla formazione di un campo acustico riverberante. Gli infissi vetrati con telai in alluminio, per la loro scarsa porosità e rigidità meccanica, possono accentuare ulteriormente tale comportamento, analogamente alle superfici in travertino e alla pavimentazione, che può offrire un contributo assorbente lievemente maggiore, grazie alla rugosità superficiale e alla discontinuità delle fughe.

Alcuni elementi architettonici dell'ex Tommaseo possono condizionare la diffusione del suono all'interno del cortile. Le superfici verticali continue, prive di sporgenze rilevanti, tendono a favorire la formazione di riflessioni laterali e tangenziali. La marcata forma rettangolare in pianta introduce una certa asimmetria geometrica, che può comportare una distribuzione non uniforme dell'energia sonora lungo le principali direzioni di propagazione, con possibile predominanza delle riflessioni provenienti dalle pareti più ravvicinate. La configurazione a corte chiusa genera un campo acustico parzialmente confinato, in cui le onde riflesse interagiscono con le superfici rigide e con il pavimento lapideo, contribuendo alla formazione di un ambiente potenzialmente riverberante. L'ampia apertura superiore, tuttavia, consente una dispersione verticale dell'energia sonora che può attenuare parzialmente l'accumulo delle riflessioni.

Il buon livello di conservazione e la costanza di utilizzo rendono il cortile dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo un caso di studio idoneo per l'analisi acustica degli spazi storici semiaperti, categoria complessa per la compresenza di caratteristiche proprie sia degli ambienti chiusi sia di quelli aperti. La combinazione tra geometria regolare, superfici rigide e compatte e ampia apertura zenitale determina una distribuzione articolata dell'energia sonora, che rende il campo acustico dello spazio un esempio rappresentativo di comportamento non lineare in condizioni di confinamento parziale. Il valore storico e architettonico del complesso, unito alla sua funzione universitaria e culturale, offre la possibilità di sperimentare strategie di ottimizzazione acustica reversibili e compatibili con la tutela del bene, configurando il cortile come un caso di studio di particolare interesse anche per potenziali usi performativi controllati, in cui le caratteristiche acustiche intrinseche possano essere valorizzate e adattate a installazioni sonore o eventi artistici.

2.2 Metodologia di rilievo e modellazione

La sezione 2.2 definisce il quadro metodologico di riferimento adottato per la caratterizzazione acustica comparativa dei due chiostri oggetto di studio, San Pietro in Vincoli e l'ex Istituto Niccolò Tommaseo. L'obiettivo è descrivere un processo sperimentale e modellistico coerente, applicabile a entrambi i siti, volto a garantire la replicabilità, la confrontabilità dei risultati e la validità scientifica complessiva dell'analisi condotta. La metodologia è stata sviluppata per rappresentare in modo realistico, ripetibile e verificabile il comportamento acustico di ambienti semiaperti storici, in cui la propagazione sonora è condizionata dalla presenza simultanea di superfici rigide riflettenti e aperture verso l'esterno. Lo scopo operativo della metodologia è fornire una base sperimentale e computazionale per l'analisi quantitativa dei principali parametri acustici oggettivi, funzionale alla valutazione dell'idoneità dei chiostri per attività performative, eventi culturali o usi collettivi di carattere temporaneo, e alla definizione di criteri di ottimizzazione coerenti con la tutela del patrimonio storico-architettonico.

L'intero processo metodologico è stato organizzato secondo una sequenza di fasi operative interdipendenti, strutturate per garantire una progressione logica, continua e coerente dalla raccolta dei dati sperimentali alla validazione dei risultati numerici finali.

La procedura è stata sviluppata come un sistema integrato, in cui ciascun passaggio fornisce i dati necessari e coerenti al successivo, assicurando continuità informativa, affidabilità scientifica e coerenza metodologica tra le diverse fasi di analisi.

Il lavoro si fonda inizialmente sulla configurazione sperimentale, che prevede la disposizione controllata e sistematica di sorgente e ricevitore, garantendo ripetibilità e rappresentatività acustica delle condizioni reali. In questa fase è stato condotto anche il rilievo fonometrico, finalizzato alla

registrazione delle risposte all'impulso e alla determinazione dei principali parametri acustici, come i livelli di pressione sonora e il tempo di riverbero, in conformità agli standard internazionali ISO 3382⁶⁰ per le misurazioni in ambienti architettonici. Segue il rilievo geometrico, finalizzato alla definizione della morfologia, delle proporzioni spaziali, delle relazioni volumetriche e delle caratteristiche costruttive dei chiostri oggetto di studio. Sulla base dei dati ottenuti, è stata sviluppata la modellazione tridimensionale dettagliata degli ambienti, attraverso la ricostruzione digitale delle geometrie e l'assegnazione dei coefficienti di assorbimento, riflessione e diffusione dei materiali. Tale modello costituisce la base per la simulazione acustica numerica, finalizzata al calcolo dei parametri di interesse acustico e alla valutazione comparativa dei differenti scenari di utilizzo o delle possibili configurazioni spaziali.

Infine, la fase di calibrazione e validazione del modello numerico ha permesso il confronto quantitativo tra i risultati simulati e quelli sperimentali, riducendo le discrepanze tra i due set di dati e verificando la coerenza, l'affidabilità predittiva e la stabilità del modello adottato.

2.2.1 *Configurazione sperimentale e rilievo fonometrico*

L'obiettivo delle misure fonometriche è stato la caratterizzazione acustica sperimentale dei due chiostri oggetto di studio, San Pietro in Vincoli e l'ex Istituto Niccolò Tommaseo, con lo scopo di determinare i principali parametri descrittivi del campo sonoro in condizioni reali e di fornire una base di dati oggettivi per la successiva fase di calibrazione dei modelli acustici tridimensionali. Le misure sono state condotte secondo lo stesso protocollo comune per entrambi i siti, in modo da garantire la confrontabilità dei risultati e la coerenza metodologica del confronto.

Nel complesso, sono state realizzate 43 configurazioni di misura sorgente–ricevitore, di cui 29 nel chiostro di San Pietro in Vincoli e 14 nella corte dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo. La distribuzione dei punti è stata definita in relazione alla morfologia architettonica degli ambienti e alla necessità di ottenere un campionamento rappresentativo del campo acustico globale, includendo sia le zone centrali sia le aree prossime ai porticati e alle pareti perimetrali.

Per ciascuna configurazione sono state eseguite due registrazioni distinte, finalizzate all'analisi di parametri acustici tra loro complementari. Complessivamente sono state acquisite 86 misure in condizioni acustiche controllate, seguendo un protocollo di acquisizione uniforme alla normativa ISO 3382-1:2009, ripetibile e coerente per entrambi i siti di studio, così da garantire la comparabilità dei risultati e l'affidabilità complessiva dell'analisi sperimentale.

⁶⁰ International Organization for Standardization, *ISO 3382: Acoustics – Measurement of Room Acoustic Parameters*, cit.

La prima registrazione, condotta con sorgente attiva per l'intera durata della misura, è stata utilizzata per la determinazione dei livelli di pressione sonora SPL , ponderati in curva A, finalizzati a descrivere in modo quantitativo l'intensità energetica complessiva del campo acustico. Tale acquisizione ha consentito anche il calcolo del parametro L_{Aeq} , che rappresenta il livello equivalente continuo e fornisce una stima energetica media dell'andamento del suono durante l'intero periodo di misura, risultando utile per valutare la stabilità e uniformità del campo sonoro generato.

La seconda registrazione, eseguita invece con spegnimento controllato della sorgente sonora, è stata destinata alla valutazione del tempo di riverbero T_{30} , parametro fondamentale per la descrizione della persistenza temporale dell'energia sonora all'interno dello spazio analizzato. Tale misura è stata ottenuta attraverso l'analisi del decadimento del livello sonoro successivo all'interruzione dell'emissione, consentendo di determinare la capacità dell'ambiente di trattenere e dissipare l'energia acustica.

Le Figure 2.5a e 2.5b mostrano due esempi rappresentativi dei grafici temporali ottenuti dalle registrazioni fonometriche eseguite durante la campagna di misura. In entrambi i casi, l'asse delle ordinate riporta il livello sonoro ponderato A, misurato in dBA, mentre l'asse delle ascisse indica il tempo di acquisizione espresso in secondi.

La Figura 2.5a si riferisce a una registrazione con sorgente attiva per tutta la durata della misura, impiegata per la determinazione del livello di pressione sonora SPL . Il grafico mostra l'andamento del livello istantaneo del suono, descritto dalla linea blu, che scilla attorno a un valore medio pressoché costante. La linea rossa rappresenta la curva del *Running L_{eq}* , corrispondente al livello equivalente calcolato in tempo reale come media energetica mobile. La stabilità di quest'ultima indica che il campo acustico generato è stazionario e privo di fluttuazioni significative, condizione necessaria per una valutazione corretta e ripetibile del L_{Aeq} .

La Figura 2.5b rappresenta invece una registrazione destinata alla misura del tempo di riverbero. Dopo una fase iniziale con sorgente attiva, si osserva l'interruzione del segnale e il conseguente decadimento del livello di pressione sonora nel dominio del tempo. La linea blu mostra la variazione istantanea del livello sonoro, che decresce rapidamente fino a raggiungere il rumore di fondo, mentre la linea rossa, che identifica *Running L_{eq}* , evidenzia un andamento più regolare e graduale, poiché rappresenta la media temporale dell'energia sonora. Questo comportamento consente di identificare chiaramente la fase dominata dal campo diretto e la successiva fase dominata dal campo riverberato, fornendo un riscontro visivo della corretta acquisizione del decadimento sonoro necessario per il calcolo del tempo di riverbero.

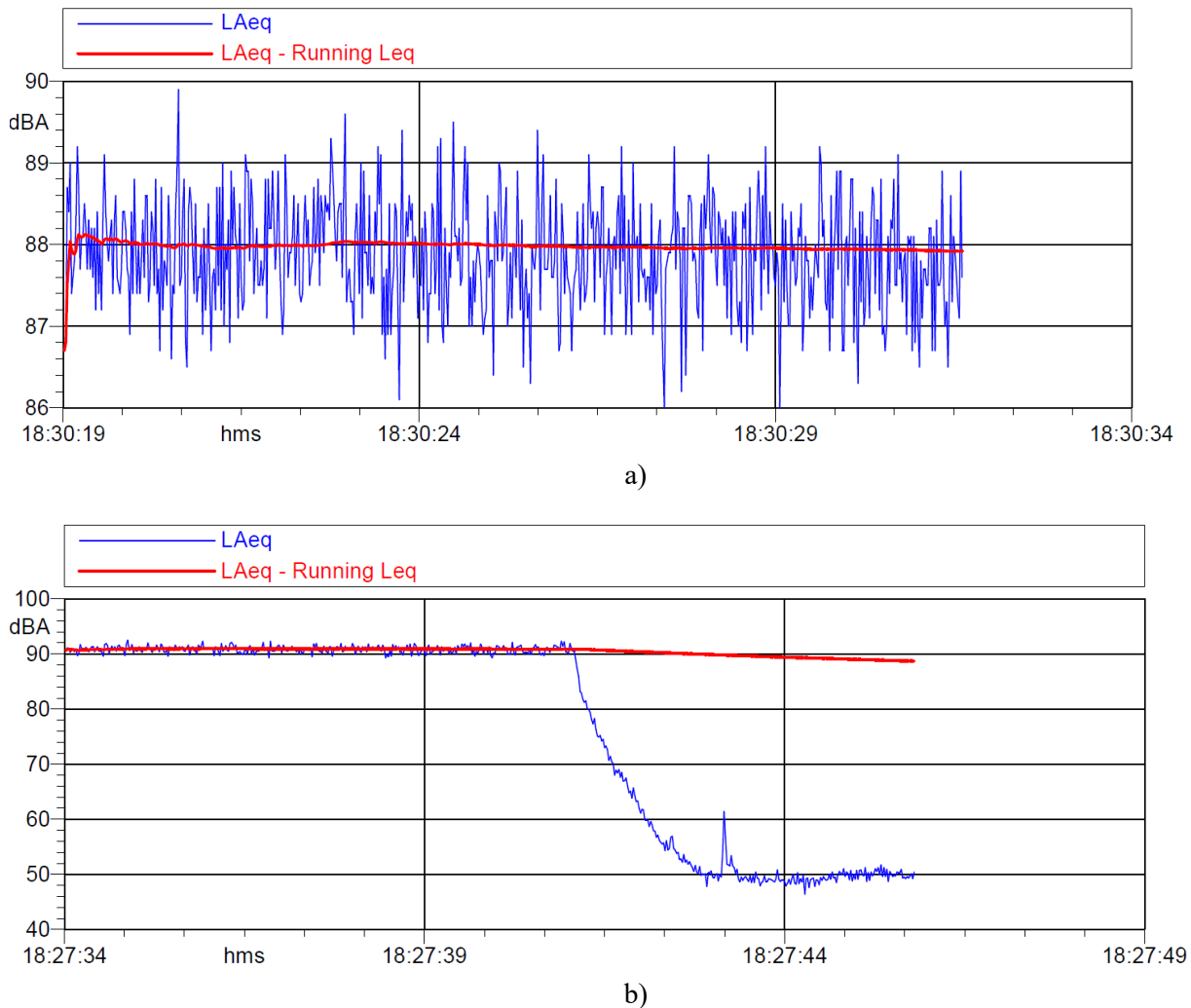


Figura 2.5 – Esempi di registrazioni fonometriche utilizzate per la caratterizzazione acustica.

- a) Registrazione con sorgente attiva per la determinazione dei livelli di pressione sonora SPL .
 b) Registrazione con spegnimento controllato della sorgente per la valutazione del tempo di riverbero T_{30} , mediante analisi del decadimento sonoro nel tempo.

Nel chiostro di San Pietro in Vincoli, le misurazioni sono state eseguite utilizzando quattro diverse posizioni di sorgente sonora (S_1 , S_2 , S_3 e S_4), selezionate per rappresentare configurazioni realistiche di utilizzo performativo e per analizzare la risposta acustica nei principali punti di emissione potenziale del suono. Per chiarezza espositiva, nel seguito si adotteranno le denominazioni “nord”, “sud”, “est” e “ovest” con riferimento all’orientamento convenzionale della planimetria riportata in Figura 2.6, indipendentemente dai punti cardinali geografici reali.

La postazione della sorgente S_1 è stata collocata al centro del chiostro, leggermente spostata verso il lato nord-ovest a causa della presenza del pozzo centrale, posizione corrispondente all’ipotetica area destinata al palco o a esibizioni musicali e teatrali. Tale collocazione consente di analizzare la diffusione del campo acustico in condizioni di impiego realistico, simulando la proiezione sonora verso la zona destinata al pubblico. La postazione della sorgente S_2 è stata

posizionata in prossimità dell'angolo interno nord-ovest, area ipoteticamente occupata dal pubblico, con l'obiettivo di valutare le riflessioni laterali e gli effetti di confinamento generati dalla geometria angolare e dalla prossimità delle pareti. Le posizioni delle sorgenti S_3 e S_4 sono state invece collocate sotto i portici: la prima, S_3 , in corrispondenza dell'angolo nord-ovest, la seconda, S_4 , al centro del corridoio nord. Queste configurazioni mirano a studiare l'influenza delle riflessioni multiple e della propagazione lungo le superfici voltate e le pareti laterali, nonché la transizione del campo sonoro tra la zona coperta e quella scoperta della corte.

Sono state individuate complessivamente dieci posizioni microfoniche (R_1 – R_{10}), di cui sei all'interno della corte e quattro sotto i portici, distribuite in modo da garantire una copertura rappresentativa dell'intero spazio. All'interno della corte, i punti R_1 , R_2 , R_3 e R_5 si trovano in prossimità dei quattro angoli, R_4 è collocato lungo il lato sud, mentre R_6 è posto in posizione quasi centrale, diagonalmente simmetrica rispetto alla posizione della sorgente S_1 e leggermente spostata dal pozzo. Sotto i portici, i punti R_7 , R_8 , R_9 e R_{10} sono distribuiti in corrispondenza dei corridoi e degli angoli per campionare la variazione del campo sonoro in condizioni di parziale schermatura. Questa configurazione sperimentale consente di descrivere la continuità e la transizione del campo acustico tra la zona centrale scoperta e l'area coperta dei portici, permettendo di confrontare i parametri acustici in funzione della posizione della sorgente. Per la sorgente posizionata in S_1 e S_2 , il microfono è stato collocato nei punti: R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 , R_6 , R_8 e R_{10} così da includere punti di misura rappresentativi delle aree destinate al pubblico (R_1), delle riflessioni angolari interne al chiostro (R_2 , R_3 , R_5), del lato intermedio (R_4), del campo libero centrale (R_6) e dei portici a lunga e media distanza (R_8 , R_{10}). La scelta di adottare la stessa configurazione microfonica per entrambe le postazioni S_1 e S_2 ha consentito un confronto diretto tra le due posizioni e valutare le differenze di distribuzione energetica nel campo diretto e riverberato. Per la sorgente S_3 , situata nell'angolo nord-ovest sotto il portico, i microfoni sono stati disposti in posizione R_2 , R_5 , R_6 , R_7 , R_8 , R_9 , R_{10} con l'obiettivo di analizzare la propagazione lungo il portico (R_7 , R_8 , R_9 , R_{10}) e la transizione verso la corte aperta (R_2 , R_5 , R_6) con diverse distanze dalla sorgente. Infine, per la sorgente S_4 , collocata al centro del portico nord, sono stati impiegati i punti R_1 , R_6 , R_7 , R_8 , R_9 , R_{10} con l'obiettivo di analizzare la propagazione longitudinale all'interno del portico nord (R_7 , R_8 , R_9) e la comunicazione acustica con il portico est (R_{10}) e la continuità del campo sonoro verso la corte interna (R_1 , R_6).

La Figura 2.6 riporta la planimetria del chiostro di San Pietro in Vincoli, in cui sono indicate le posizioni delle sorgenti sonore (S_1 – S_4) e dei punti di misura (R_1 – R_{10}) utilizzati durante la campagna sperimentale.

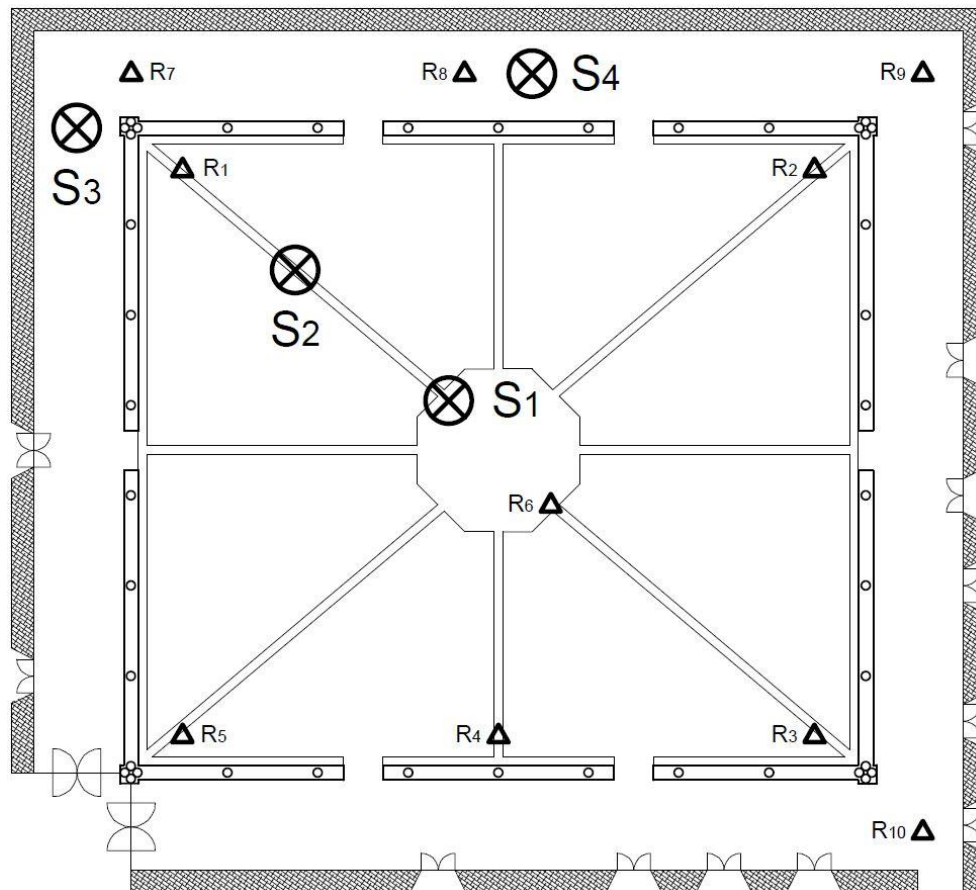


Figura 2.6 – Planimetria del chiostro di San Pietro in Vincoli con indicazione delle posizioni delle sorgenti sonore (S₁–S₄) rappresentate mediante cerchi, e dei ricevitori (R₁–R₁₀) indicati con simboli triangolari.

Nella corte dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo, le misurazioni sono state condotte impiegando due differenti posizioni di sorgente sonora (S₁ e S₂), individuate in modo da riprodurre condizioni d'uso realistiche per eventi performativi e per valutare la risposta acustica nei punti più rappresentativi di emissione del suono. Ai fini della descrizione e dell'analisi dei risultati, si farà riferimento, come già adottato per il chiostro di San Pietro in Vincoli, alle denominazioni convenzionali “nord”, “sud”, “est” e “ovest”, utilizzate per orientare la planimetria riportata in Figura 2.7, senza alcuna corrispondenza con i reali punti cardinali geografici.

La postazione della sorgente S₁ è stata collocata in prossimità del lato corto est della corte, in corrispondenza dell'area ipoteticamente destinata a palco o esibizioni musicali e teatrali. Tale posizione consente di analizzare la diffusione del campo acustico in condizioni di impiego realistico, simulando la proiezione sonora verso la zona riservata al pubblico e valutando le prime riflessioni generate dalle superfici circostanti. La sorgente S₂ è stata invece posizionata al centro della planimetria della corte dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo, al fine di esaminare la propagazione simmetrica dell'onda sonora e l'interazione con le pareti perimetrali, consentendo un confronto diretto sulla distribuzione dell'energia acustica all'interno dello spazio.

Sono state individuate sette postazioni microfoniche (R_1 – R_7), distribuite in modo da rappresentare le principali condizioni acustiche della corte. I punti R_1 , R_3 , R_4 e R_5 sono collocati in prossimità dei quattro angoli: R_3 e R_4 corrispondono agli angoli prossimi all'area del palco, mentre R_1 e R_5 si trovano negli angoli opposti. Il punto R_2 è situato lungo il lato nord, in posizione intermedia tra centro e parete, mentre R_6 è posto in posizione centrale, e R_7 nella zona ipotetica destinata al pubblico. Per ciascuna delle due configurazioni di sorgente (S_1 e S_2), il microfono è stato collocato in tutti e sette i punti di misura, in modo da includere aree rappresentative della corte: le zone riservate al pubblico (R_7), le riflessioni angolari prossime al palco (R_3 , R_4), il lato intermedio (R_2), il campo centrale libero (R_6) e gli angoli più distanti (R_1 , R_5). L'adozione della stessa configurazione microfonica per entrambe le posizioni di sorgente ha permesso un confronto diretto e oggettivo tra le due configurazioni, consentendo di valutare le differenze nella distribuzione energetica del campo diretto e di quello riverberato.

La Figura 2.7 mostra la planimetria della corte dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo, con l'indicazione delle posizioni delle sorgenti sonore (S_1 , S_2) e dei punti di misura (R_1 – R_7) utilizzati durante la campagna sperimentale.

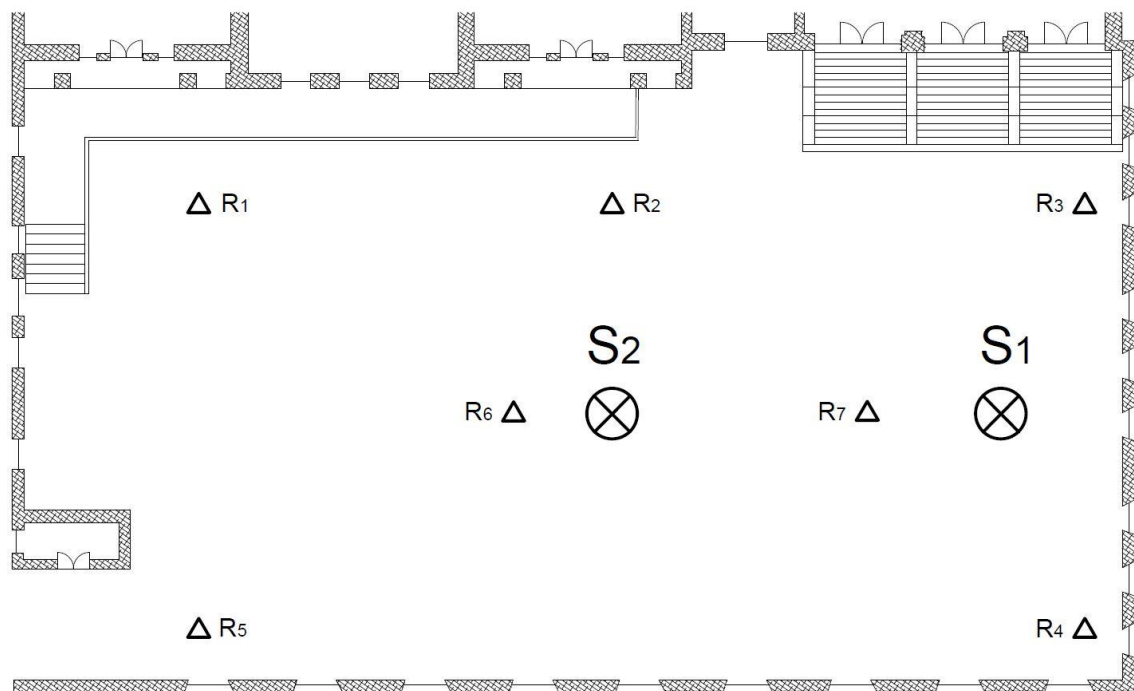


Figura 2.7 – Planimetria della corte dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo con indicazione delle posizioni delle sorgenti sonore (S_1 , S_2) rappresentate mediante cerchi, e dei ricevitori (R_1 – R_7) indicati con simboli triangolari.

L'intera campagna sperimentale è stata condotta seguendo un protocollo operativo conforme alle norme internazionali di riferimento, con l'obiettivo di garantire ripetibilità, confrontabilità e validità statistica dei risultati ottenuti. Le misure acustiche nei due chiostrini sono state eseguite utilizzando strumentazione conforme ai requisiti di classe 1 secondo la norma UNI EN ISO 3382⁶¹, con un adattamento metodologico specifico per ambienti caratterizzati da parziale confinamento. Benché tali norme siano originariamente concepite per ambienti chiusi, la loro applicazione controllata ai chiostrini storici semiaperti consente di adottare una metodologia sperimentale coerente con le pratiche consolidate di rilievo acustico architettonico, garantendo al contempo la possibilità di confronto diretto con altri contesti e con i modelli di simulazione numerica calibrati.

Le misure sono state eseguite impiegando una sorgente sonora omnidirezionale dodecaedrica, conforme ai requisiti di potenza e direttività previsti dalla ISO 3382-1⁶², posizionata a un'altezza di 1,2 m dal piano di calpestio. I rilievi sono stati effettuati mediante un fonometro di classe 1, collocato alla stessa altezza della sorgente, 1,2 m, nei punti di misura indicati nelle relative planimetrie (Figure 2.6, 2.7). Il segnale utilizzato è stato di tipo *Exponential Sine Sweep* (ESS), elaborato tramite software di acquisizione e analisi dedicato, in grado di calcolare in modo automatico i principali parametri acustici oggettivi, quali il tempo di riverbero e i livelli di pressione sonora. Le registrazioni sono state eseguite in condizioni controllate, in un intervallo di frequenze compreso tra 6,3 Hz e 20 kHz, suddiviso in bande di terzi d'ottava. La durata media di ciascuna acquisizione è stata di circa 15 secondi, scelta per assicurare un rapporto segnale – rumore adeguato e includere l'intera gamma utile ai parametri acustici di interesse. Le posizioni del microfono sono state collocate a una distanza minima di 1 m dalle pareti, dalle colonne e dalle superfici riflettenti, in modo da evitare effetti dovuti a riflessioni precoci o rinforzi locali che potessero alterare la risposta all'impulso. La distanza reciproca tra le postazioni microfoniche è stata mantenuta non inferiore a 2 m, al fine di garantire l'indipendenza spaziale delle misure e di evitare ridondanze dovute a condizioni acustiche troppo simili tra punti contigui. Analogamente, la distanza minima dalla sorgente sonora è stata impostata superiore a 2 m, con l'obiettivo di limitare gli effetti del campo di prossimità e garantire che il campo diretto risultasse pienamente sviluppato e chiaramente distinguibile dalle riflessioni precoci.

Le Figure 2.8a e 2.8b mostrano rispettivamente le configurazioni di misura adottate nei due siti di studio, il chiostro di San Pietro in Vincoli e la corte dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo evidenziando la disposizione della sorgente dodecaedrica e del microfono durante le registrazioni.

⁶¹ UNI EN ISO 3382:2008, *Acoustics – Measurement of Room Acoustic Parameters*, Geneva, International Organization for Standardization, 2008.

⁶² International Organization for Standardization, *ISO 3382-1: 2009: Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces*, cit.



a)

b)

Figura 2.8 – Configurazioni di misura durante la campagna sperimentale:

- a) Sorgente sonora dodecaedrica e microfono posizionati nel chiostro di San Pietro in Vincioli.
- b) Sorgente sonora dodecaedrica e microfono posizionati nella corte dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo.

2.2.2 Modellazione 3D e simulazioni in ODEON

La modellazione acustica tridimensionale dei due chiostrini analizzati, San Pietro in Vincioli e dell'ex Tommaseo, è stata condotta con l'obiettivo di riprodurre numericamente il comportamento acustico reale degli ambienti e di validare i risultati sperimentali ottenuti dalle misure in situ. Tale approccio consente di estendere l'analisi a scenari ipotetici e di valutare l'efficacia di possibili strategie di ottimizzazione acustica in modo controllato e ripetibile.

Entrambi i casi studio sono stati elaborati mediante modellazione parametrica 3D nel software ODEON⁶³, seguendo criteri comuni di discretizzazione geometrica, definizione dei materiali, impostazione delle condizioni di simulazione e procedura di calibrazione. Questo metodo consente di mantenere la coerenza tra i modelli e garantire la confrontabilità dei risultati.

La definizione geometrica dei modelli tridimensionali dei chiostrini è stata elaborata a partire dalle misurazioni dirette in situ, effettuate mediante metro rigido, metro laser e rilievi fotografici utilizzati per il successivo proporzionamento geometrico delle dimensioni principali. Le misure acquisite hanno permesso di determinare con buona approssimazione le proporzioni spaziali, le

⁶³ ODEON A/S, *ODEON Room Acoustics Software* (Versione 17.0) [Software], Lyngby (DK), ODEON A/S, 2023, disponibile su <https://odeon.dk>.

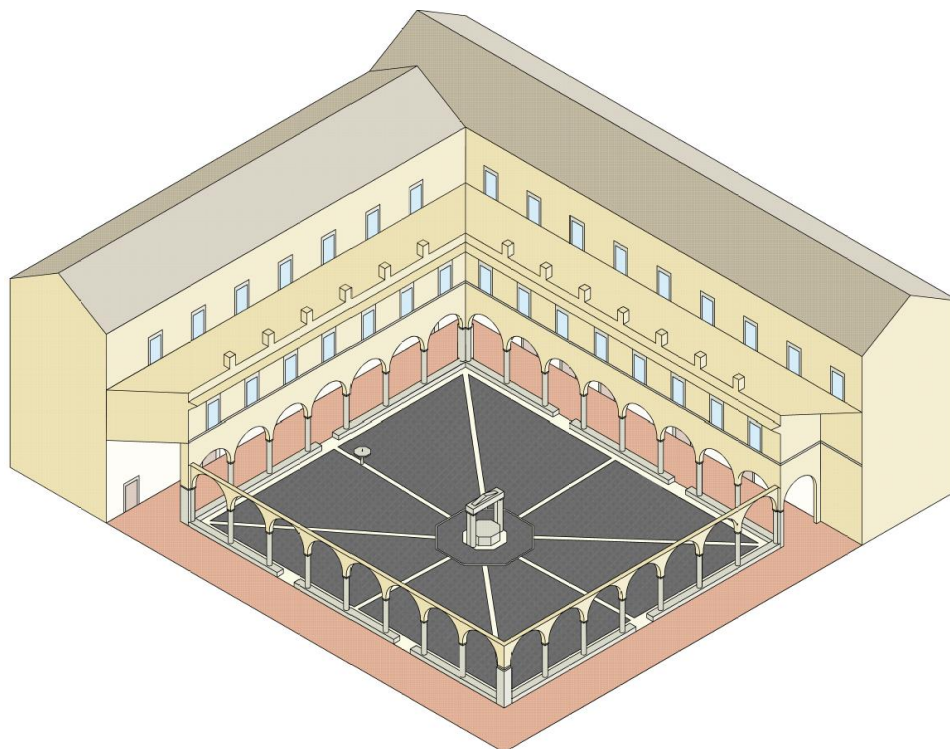
altezze, le larghezze medie e le aperture, garantendo una rappresentazione coerente delle geometrie reali e fornendo la base per la modellazione tridimensionale.

A partire da tali misure sono state redatte le planimetrie e le sezioni in ambiente AutoCAD⁶⁴, costituendo la base vettoriale di riferimento per la ricostruzione 3D. I disegni sono stati poi esportati in formato .dxf e importati nel software ODEON per la simulazione acustica.

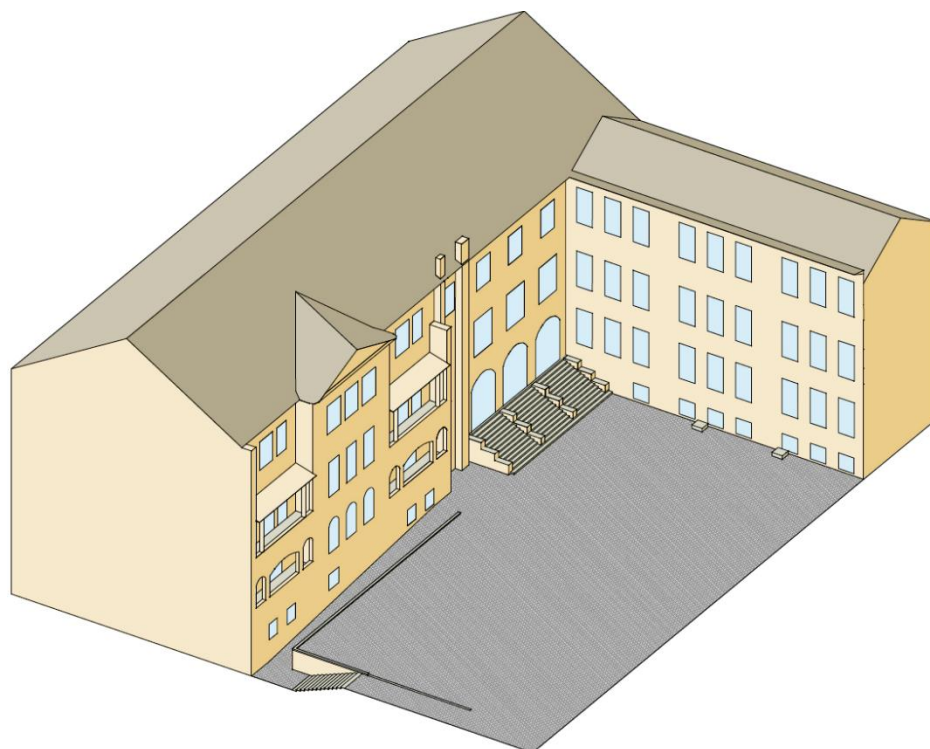
È stata adottata una scala di rappresentazione coerente, che consente di mantenere un livello di dettaglio adeguato alla caratterizzazione acustica, riducendo al contempo l'onere computazionale del modello. Tale scala permette di conservare la fedeltà geometrica delle superfici principali e dei volumi, tralasciando elementi minuti non rilevanti ai fini della propagazione sonora. Per garantire la stabilità del modello numerico, si è proceduto a una semplificazione geometrica controllata, eliminando modanature, decorazioni e dettagli ornamentali non acusticamente significativi. Successivamente, si è eseguita la verifica di coerenza geometrica, controllando la chiusura dei volumi, l'intersezione corretta tra superfici adiacenti, l'allineamento delle superfici contigue, la corretta rappresentazione delle aperture e dei colonnati e la congruenza rispetto alle proporzioni reali. Il risultato di tale processo è un modello tridimensionale computazionalmente efficiente, in grado di rappresentare la morfologia dei chiostri di San Pietro in Vincoli e dell'ex Tommaseo, costituendo la base per le successive fasi di definizione dei materiali, simulazione e calibrazione acustica.

Le Figure 2.9a e 2.9b riportano le viste tridimensionali dei modelli dei due chiostri, rispettivamente San Pietro in Vincoli ed ex Istituto Niccolò Tommaseo, realizzati in ambiente AutoCAD come supporto alla modellazione acustica. Le immagini non rappresentano l'intero perimetro degli edifici: ciascun modello è stato infatti sezionato mediante un taglio diagonale, così da esporre simultaneamente due lati del chiostro e rendere visibile la configurazione interna degli spazi. Tale modalità di rappresentazione consente di evidenziare la disposizione volumetrica e gli elementi architettonici principali, facilitando la comprensione della geometria impiegata nei modelli acustici.

⁶⁴ Autodesk Inc., *AutoCAD® (Versione 2024)* [Software], San Rafael (CA), Autodesk Inc., 2024, disponibile su <https://www.autodesk.com>.



a)



b)

Figura 2.9 – Modelli tridimensionali dei due chiostri utilizzati per la modellazione acustica:

a) chiostro di San Pietro in Vincoli;

b) corte interna dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo.

Entrambe le viste prospettiche sono ottenute mediante un taglio diagonale del volume, che consente di mostrare due lati perimetrali e la configurazione interna degli spazi.

Definiti i modelli geometrici di riferimento, la fase successiva ha riguardato la loro configurazione acustica all'interno del software ODEON, mediante l'assegnazione dei materiali, la definizione dei coefficienti di assorbimento α e *scattering* s , e l'impostazione delle condizioni al contorno. L'obiettivo è stato ottenere una rappresentazione numerica coerente con le caratteristiche costruttive reali dei due chiostri, preservando la corrispondenza tra i parametri fisici e quelli utilizzati per la simulazione. Tale procedura è stata condotta con un livello di dettaglio sufficiente a garantire continuità tra modellazione tridimensionale e proprietà acustiche associate, assicurando che ogni superficie modellata rispecchiasse la sua funzione e posizione all'interno dell'ambiente. A ciascuna superficie è stato associato un materiale conforme alla sua reale composizione costruttiva, sulla base delle tabelle dei materiali riportate rispettivamente per San Pietro in Vincoli, Tabella 2.3 e per l'ex Istituto Niccolò Tommaseo, Tabella 2.5.

I valori dei coefficienti di assorbimento acustico α e di *scattering* s sono stati selezionati a partire da dati di letteratura consolidati, con riferimento alle principali banche dati e manuali di acustica architettonica⁶⁵. La scelta dei valori ha tenuto conto della frequenza e del comportamento medio dei materiali in bande d'ottava da 125 Hz a 8 kHz, garantendo una caratterizzazione coerente con le proprietà acustiche osservate in edifici di analoga tipologia e finitura superficiale.

Le superfici vetrate, le superfici lapidee in travertino e le pavimentazioni in ciottoli levigati del chiostro di San Pietro in Vincoli, così come la pavimentazione in pietra naturale dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo, presentano bassi valori del coefficiente di assorbimento acustico in tutte le frequenze analizzate ($\alpha \approx 0,01-0,05$). Le murature intonacate e i laterizi mostrano valori di assorbimento leggermente superiori ($\alpha \approx 0,02-0,08$), mentre le superfici lignee evidenziano coefficienti più elevati su tutto lo spettro di frequenze considerate ($\alpha \approx 0,10-0,30$). I coefficienti di *scattering* sono stati invece attribuiti in un intervallo compreso tra 0,05 e 0,30, in funzione del grado di irregolarità e rugosità delle superfici.

I valori riportati nelle Tabelle 2.6 e 2.7 rappresentano i coefficienti medi di assorbimento acustico α per bande d'ottava comprese tra 125 Hz e 8000 Hz e i coefficienti di *scattering* s relativi ai principali materiali costruttivi presenti rispettivamente nel chiostro di San Pietro in Vincoli e nella corte interna dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo.

⁶⁵ Cfr. M. Long, *Architectural Acoustics*, 2nd ed., Amsterdam, Elsevier, 2014, pp. 151-157.

Tabella 2.6 – Coefficienti di assorbimento α per bande d’ottava comprese tra 125 Hz e 8000 Hz e coefficienti di *scattering* s dei principali materiali presenti nel chiostro di San Pietro in Vincoli.

Materiale	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	s
Laterizio intonacato	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.08	0.10
Travertino	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05	0.15
Ciottoli levigati	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.30
Laterizio cotto	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.06	0.06	0.25
Vetro	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
Legno	0.10	0.11	0.12	0.15	0.20	0.25	0.30	0.20

Tabella 2.7 – Coefficienti di assorbimento α per bande d’ottava comprese tra 125 Hz e 8000 Hz e coefficienti di *scattering* s dei principali materiali presenti nella corte interna dell’ex Istituto Tommaseo.

Materiale	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	s
Laterizio intonacato	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.08	0.10
Travertino	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05	0.15
Pietra naturale	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.30
Vetro	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05

Entrambi i modelli sono stati configurati come ambienti semiaperti, con la parte superiore del cortile definita come confine aperto (*open boundary*) per simulare la dispersione dell’energia sonora verso l’esterno. Questa condizione permette di rappresentare la perdita energetica dovuta all’assenza di copertura e la transizione tra campo riverberante e campo libero, caratteristica tipica dei chiostri. Il risultato di questa fase è un modello tridimensionale acusticamente coerente e parametrizzato, adatto alla definizione dei parametri di simulazione e per l’analisi comparativa dei due casi studio. Le simulazioni sono state condotte utilizzando un modello ibrido basato su *image source* e *ray tracing*, che consente di combinare la precisione geometrica del metodo delle sorgenti immagine con l’efficienza statistica del tracciamento dei raggi.

È stata impiegata una sorgente omnidirezionale posizionata in corrispondenza dell’area ipotetica destinata al palco o alla zona performativa. Tale scelta consente di simulare una condizione d’uso realistica, in cui la sorgente rappresenta un emettitore acustico centrale (voce o strumento) rivolto verso il pubblico. L’altezza della sorgente è stata fissata a 1,5 m dal piano di calpestio, in accordo con i criteri della norma ISO 3382-1:2009 per ambienti destinati a eventi performativi, così da garantire la confrontabilità con eventuali misure reali.

Il campo acustico è stato analizzato tramite griglia di punti di ricezione, *receiver grid*, distribuita sull'intera superficie del cortile e dei portici. L'altezza della griglia è stata impostata a 1,2 m, corrispondente all'altezza media dell'ascoltatore seduto, mentre la risoluzione spaziale è stata definita con passo di 0,5 m, così da bilanciare precisione e tempi di calcolo. Le mappe risultanti consentono di individuare le zone di maggiore e minore intensità sonora, fornendo una visione globale dell'uniformità di diffusione e dell'efficacia acustica della configurazione analizzata. In questo modo è possibile ottenere una descrizione dettagliata e continua della distribuzione del campo sonoro, garantendo una copertura omogenea e priva di discontinuità sull'intera area analizzata, sia nelle zone centrali sia in prossimità dei margini perimetrali dei chiostri.

Sono stati definiti quattro scenari principali, comuni a entrambi i chiostri, al fine di analizzare in modo progressivo l'effetto prodotto da differenti combinazioni di materiali assorbenti e riflettenti.

Il primo scenario rappresenta lo stato attuale, in cui gli spazi risultano privi di sedute o elementi aggiuntivi, e le superfici strutturali sono considerate con i soli materiali originari.

Nel secondo scenario sono state introdotte sedute con caratteristiche acustiche debolmente fonoassorbenti, collocate nelle aree destinate al pubblico durante le performance, con l'obiettivo di valutare l'effetto di una parziale occupazione dello spazio e di analizzare come la presenza di tali elementi influenzi la distribuzione e la riflessione dell'energia sonora all'interno della corte.

Il terzo scenario ha previsto la sostituzione delle sedute con modelli fonoassorbenti aventi un coefficiente medio di assorbimento pari a circa $\alpha \approx 0,80$, così da simulare condizioni di maggiore attenuazione acustica.

Infine, nel quarto scenario si ha integrato la presenza di sedute altamente assorbenti con l'aggiunta di pannelli riflettenti, collocati in determinati punti per favorire la propagazione e la chiarezza del suono, ricreando una condizione acustica ottimizzata per un uso performativo controllato degli spazi. Gli interventi riflettenti sono stati progettati secondo criteri di modularità, reversibilità e compatibilità architettonica, in modo da evitare qualsiasi modifica permanente o alterazione degli spazi storici. In tal modo è possibile verificare l'effetto combinato di assorbimento e riflessione, osservando come la configurazione scelta modifichi in maniera graduale e sistematica la distribuzione energetica all'interno del chiostro.

Le proprietà acustiche dei nuovi elementi introdotti sono state definite secondo i valori riportati nella Tabella 2.8, basati su letteratura tecnica e database di riferimento⁶⁶. I coefficienti di assorbimento α e *scattering* s sono espressi per bande d'ottava da 125 a 8000 Hz.

⁶⁶ Cfr. Heinrich Kuttruff, *Room Acoustics*, 6th ed., Boca Raton, CRC Press, 2016, cit.

Tabella 2.8 – Coefficienti di assorbimento α per bande d’ottava comprese tra 125 Hz e 8000 Hz e coefficienti di *scattering* s relativi agli elementi introdotti nei diversi scenari di simulazione per entrambi i chiostrini in esame.

Materiale	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	s
Sedute poco assorbenti	0.40	0.50	0.58	0.61	0.58	0.50	0.50	0.05
Sedute molto assorbenti	0.72	0.79	0.83	0.84	0.83	0.79	0.79	0.05
Pannelli riflettenti	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

Nel modello di San Pietro in Vincoli la sorgente sonora omnidirezionale è stata posizionata al centro geometrico del cortile, leggermente spostata a causa della presenza del pozzo centrale, in corrispondenza dell’area ipotetica destinata al palco. Le sedute sono state disposte in un settore circolare pari a un quarto del chiostro, orientato verso il centro del cortile, in modo da riprodurre la configurazione reale del pubblico durante un evento. La disposizione segue una geometria a emiciclo parziale, composta da undici colonne con numero variabile di posti per fila, per un totale di 176 sedute. Questa configurazione è stata progettata per simulare una condizione di fruizione effettiva, garantendo al tempo stesso la rappresentatività spaziale delle aree occupate e libere all’interno dello spazio performativo. L’organizzazione spaziale delle sedute, mantenuta costante in tutte le simulazioni successive allo stato di fatto, consente di riprodurre in modo più stabile e controllato l’assetto delle condizioni operative previste, offrendo una visione chiara della distribuzione del pubblico rispetto alla sorgente sonora.

La Figura 2.10 illustra la configurazione adottata per la disposizione del palco e delle sedute nel chiostro di San Pietro in Vincoli, rappresentata sia in vista tridimensionale, Figura 2.10a, sia in proiezione planimetrica, Figura 2.10b. Tale configurazione corrisponde a quella utilizzata nel secondo e nel terzo scenario del modello acustico sviluppato in ODEON: la geometria delle sedute rimane invariata, mentre varia unicamente il materiale loro assegnato, con sedute debolmente assorbenti nel secondo scenario e altamente assorbenti nel terzo.

La Figura 2.11 mostra invece la configurazione prevista per il quarto scenario, caratterizzato dall’introduzione di pannelli riflettenti collocati all’interno dei quattro archi posti alle spalle dell’area destinata al pubblico. Anche in questo caso la disposizione è riportata sia in vista tridimensionale, Figura 2.11a, sia in vista planimetrica, Figura 2.11b. In entrambe le figure è rappresentato anche il palco, così da fornire una ricostruzione completa e coerente dell’assetto performativo considerato nelle simulazioni.

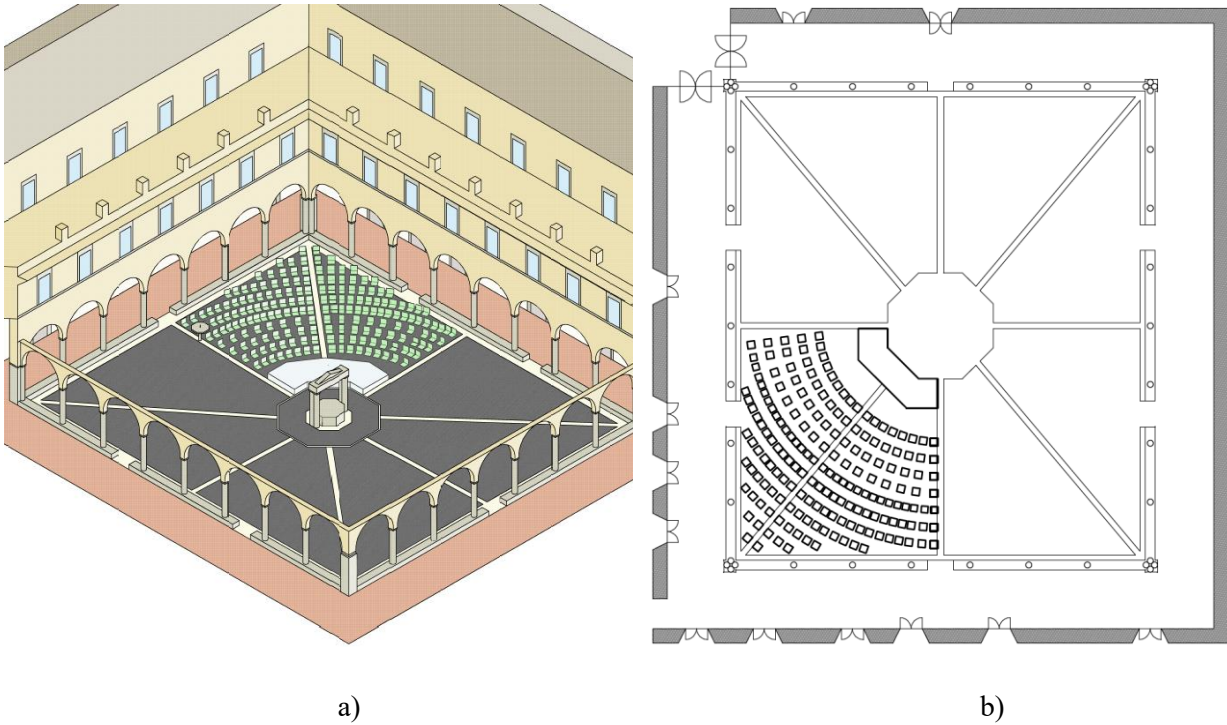


Figura 2.10 – Configurazione del palco e della platea nel chiostro di San Pietro in Vincoli adottata nel secondo e terzo scenario:

- a) vista tridimensionale con taglio prospettico dell'edificio;
 b) rappresentazione planimetrica della platea e dell'area scenica.

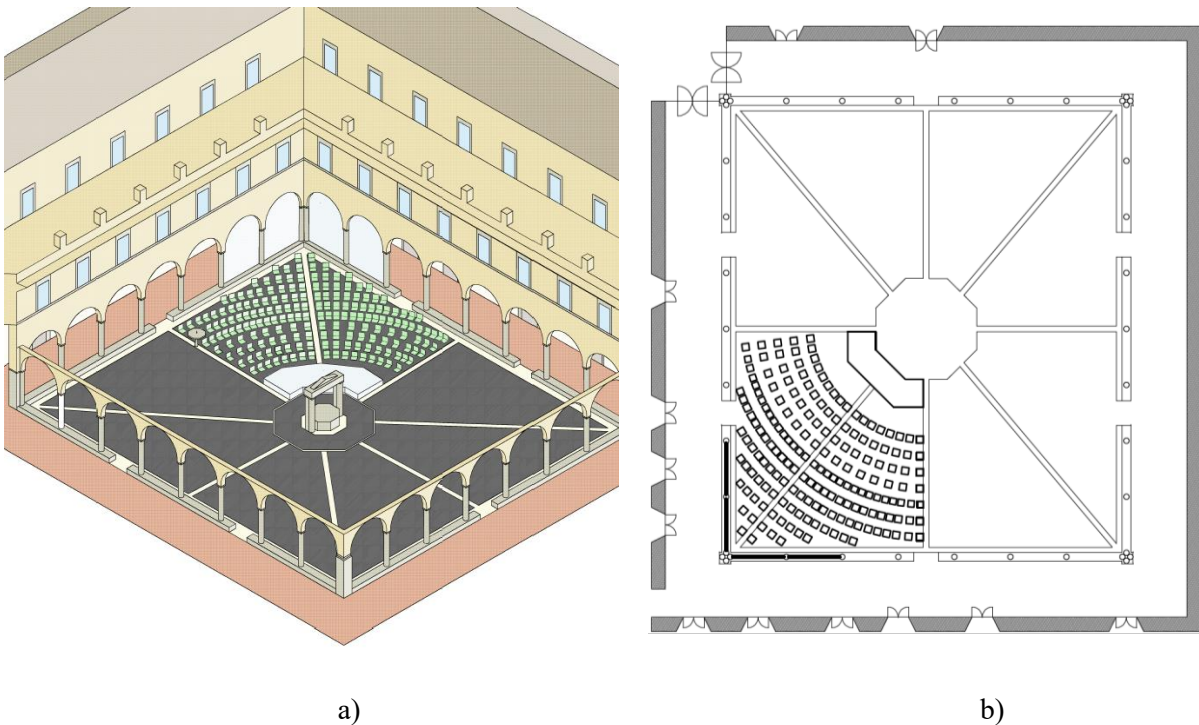


Figura 2.11 – Configurazione del quarto scenario nel chiostro di San Pietro in Vincoli con introduzione dei pannelli riflettenti:

- a) vista tridimensionale con taglio prospettico dell'edificio;
 b) rappresentazione planimetrica della posizione dei pannelli, della platea e dell'area scenica.

Nel modello della corte interna dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo, la sorgente sonora è stata collocata lungo uno dei lati minori del cortile, in prossimità della parete di fondo, per simulare la posizione del palco. La platea è stata organizzata in due settori rettangolari distinti, ciascuno composto da 11 colonne e 8 file di sedute, per un totale complessivo di 176 posti, tutti orientati frontalmente verso la sorgente. Questa configurazione riproduce una disposizione scenica tipica di eventi all'aperto o installazioni performative temporanee, garantendo una distribuzione omogenea del pubblico e una condizione acusticamente realistica per l'analisi della propagazione sonora dell'ambiente studiato.

La Figura 2.12 illustra la configurazione adottata per la disposizione del palco e delle sedute nella corte dell'ex Tommaseo, rappresentata sia in vista tridimensionale, Figura 2.12a, sia in proiezione planimetrica, Figura 2.12b. Tale configurazione coincide con quella impiegata nel secondo e nel terzo scenario del modello ODEON, nei quali la geometria delle sedute è invariata e cambia unicamente il materiale: debolmente assorbente nel secondo scenario e altamente assorbente nel terzo.

La Figura 2.13 illustra la configurazione del quarto scenario, che prevede tre possibili soluzioni riflettenti: una barriera verticale piana alta 3 m posta dietro il palco, una barriera concava a "V" della stessa altezza orientata verso il pubblico e un pannello orizzontale riflettente calpestabile collocato sopra il palco. La disposizione è riportata sia in vista tridimensionale, Figura 2.13a, sia in planimetria, Figura 2.13b.

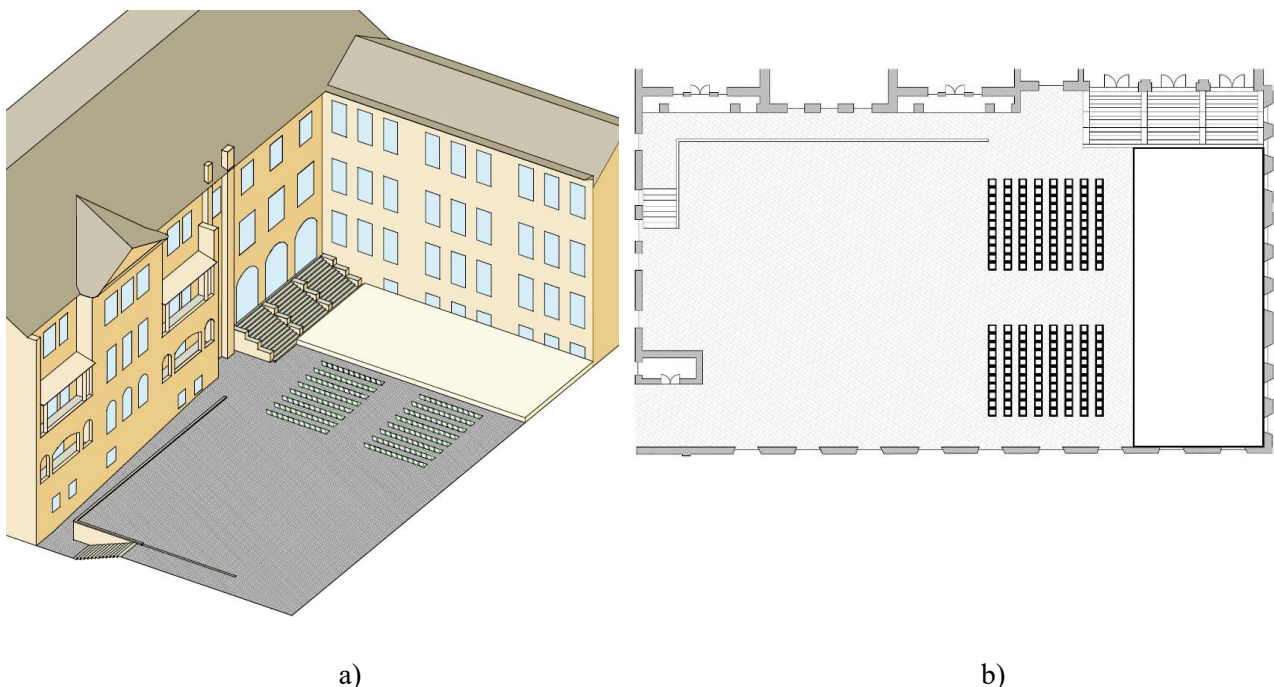


Figura 2.12 – Configurazione del palco e della platea nella corte dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo adottata nel secondo e terzo scenario:

- a) vista tridimensionale con taglio prospettico dell'edificio;
- b) rappresentazione planimetrica della platea e dell'area scenica.

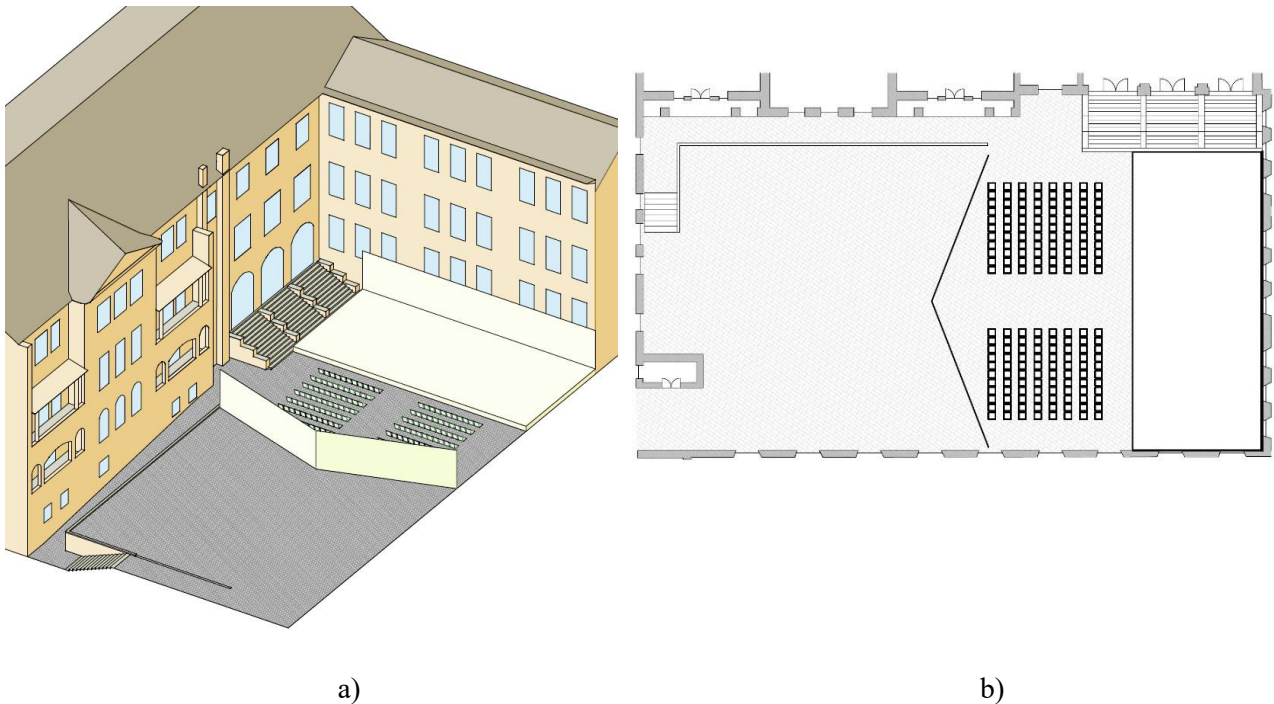


Figura 2.13 – Configurazione del quarto scenario nella corte dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo con introduzione dei pannelli riflettenti:

- a) vista tridimensionale con taglio prospettico dell'edificio;
 b) rappresentazione planimetrica della posizione dei pannelli, della platea e dell'area scenica.

La calibrazione dei modelli acustici relativi ai chiostri di San Pietro in Vincoli e dell'ex Tommaseo è stata eseguita con l'obiettivo di assicurare una corrispondenza quantitativa tra i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche e le misurazioni in situ. Tale procedura risulta essenziale per garantire che i modelli tridimensionali sviluppati in ODEON riproducano in modo realistico il comportamento acustico degli ambienti analizzati, consentendo di estendere le simulazioni a scenari ipotetici con attendibilità predittiva. Il processo di calibrazione è stato condotto con approccio iterativo, modificando progressivamente i coefficienti di assorbimento α e di *scattering* s dei principali materiali fino a minimizzare lo scostamento tra i parametri simulati misurati sperimentalmente, con particolare attenzione alle superfici più influenti, quali murature perimetrali e pavimentazioni. La calibrazione è stata effettuata confrontando i valori del tempo di riverbero T_{30} ricavati dalle misurazioni fonometriche con quelli del modello numerico. Il criterio di accettabilità adottato è stato fissato imponendo la condizione descritta dall'Equazione 2.5:

$$|T_{30_{\text{misurato}}} - T_{30_{\text{simulato}}}| \leq 0.5 \text{ s} \quad (2.5)$$

Tale valore è stato adottato come intervallo limite massimo di scostamento, in accordo con la norma ISO 3382-1 e gli standard internazionali.

2.3 Risultati e conclusioni

Gli ambienti semiaperti, come i chiostrini, non dispongono di curve normative o modelli consolidati che definiscano un tempo di riverbero ottimale. Le relazioni $V-RT$ utilizzate per le sale chiuse presuppongono un confinamento energetico completo, condizione che nei chiostrini non si verifica a causa della dispersione verso l'esterno. La perdita per radiazione rende quindi inapplicabili sia le curve volumetriche sia i criteri ottimali formulati per ambienti interamente confinati.

In assenza di un valore normativo di T_{30} specifico per i chiostrini, l'interpretazione dei risultati deve basarsi su un riferimento prestazionale e non volumetrico. I valori simulati del tempo di riverberazione sono dunque confrontati con gli intervalli ottimali riportati per sale da concerto di grandi dimensioni, circa 50000 m³, utilizzati come riferimento acustico di alta qualità.

L'adozione di questo riferimento risponde all'esigenza di disporre uno standard di confronto progettuale elevato e ampiamente riconosciuto, in grado di supplire alla mancanza di curve ottimali specifiche per ambienti semiaperti ed evitare l'impiego improprio dei modelli sviluppati per sale chiuse. Al tempo stesso consente di mantenere un criterio comparativo stabile, utile per valutare in modo coerente l'efficacia degli scenari simulati, comprese le configurazioni con sedute a diversa assorbenza e l'introduzione di pannelli riflettenti.

2.3.1 Risultati e conclusioni del chiostrino di San Pietro in Vincoli

Il primo scenario rappresenta la configurazione attuale del chiostrino di San Pietro in Vincoli, priva di sedute e di elementi riflettenti aggiuntivi. La simulazione numerica mostra un comportamento acustico dominato dalla natura semiaperta dello spazio, con una significativa dispersione dell'energia attraverso l'apertura zenitale. Il T_{30} medio alla frequenza di 1000 Hz simulato è pari a circa 2,5 s, valore ampiamente superiore agli intervalli ottimali per ambienti dedicati al parlato e per sale da concerto di riferimento, confermando la necessità di interventi per aumentare l'assorbimento efficace e migliorare la distribuzione dell'energia sonora.

La *receiver grid* del T_{30} , Figura 2.14a, mostra una distribuzione non omogenea, con tempi di decadimento più elevati lungo il perimetro e nelle zone prossime alle pareti, dove la riflessione multipla è maggiore. Le regioni centrali presentano valori inferiori grazie alla maggiore dispersione verso l'apertura superiore, ma senza raggiungere una condizione favorevole alla fruizione performativa. L'andamento evidenzia quindi tempi di riverbero troppo elevati, incompatibili con la chiarezza richiesta per il parlato e una forte variabilità spaziale, tipica degli ambienti semiaperti con notevole eterogeneità nell'assorbimento apparente.

La mappa di $SPL(A)$, Figura 2.14b, ottenuta in simulazione mostra un intenso gradiente energetico centrato sulla posizione della sorgente, con un rapido decadimento all'aumentare della distanza. Le aree periferiche del chiostro registrano valori inferiori di oltre 6–8 dB rispetto alla zona centrale, indicando una scarsa omogeneità della copertura sonora. Questa disuniformità è dovuta principalmente alla combinazione tra la propagazione prevalentemente diretta nei primi metri, alle riflessioni limitate dalle superfici verticali e alla perdita di energia verso l'alto che impedisce una corretta diffusione.

La griglia dei punti di ricezione del parametro C_{80} , Figura 2.14c, presenta valori elevati in prossimità della sorgente, tipicamente $>+6$ dB, che decrescono rapidamente procedendo verso il perimetro. Nelle regioni periferiche il parametro assume valori deboli o negativi, segnalando una predominanza dell'energia tardiva non compatibile con un ascolto musicale bilanciato. La morfologia semiaperta impedisce la formazione di un campo sonoro coeso, rendendo necessario l'inserimento di elementi progettuali per aumentare la diffusione.

La simulazione del parametro D_{50} , Figura 2.14d, evidenzia valori elevati nella zona centrale fino a circa 0,8–0,9, che tuttavia si riducono significativamente nelle aree laterali, dove la definizione scende a valori prossimi a 0,4. Questo andamento rispecchia la forte asimmetria del campo sonoro: la componente precoce è ben rappresentata solamente nelle posizioni prossime alla sorgente, mentre altrove prevale un campo tardivo poco controllato.

L'analisi delle mappe numeriche mostra che la configurazione attuale presenta un tempo di riverbero elevato, non compatibile con esigenze performative basate sul parlato. Tutti i parametri simulati evidenziano inoltre una forte disomogeneità spaziale, con differenze marcate tra area centrale e zone perimetrali. L'assenza di superfici riflettenti dedicate e la dispersione energetica attraverso l'apertura superiore determinano una scarsa diffusione, accompagnata da livelli insufficienti di intelligibilità, chiarezza e uniformità del campo sonoro.

Nel complesso, lo stato di fatto non risulta acusticamente idoneo a ospitare eventi performativi, rendendo necessario valutare gli scenari migliorativi previsti.

La Figura 2.14 riporta le *receiver grid* dei parametri simulati del primo scenario, mostrando la distribuzione spaziale del T_{30} medio in secondi, Figura 2.14a, del livello $SPL(A)$ in dB, Figura 2.14b, della chiarezza musicale C_{80} a 1000 Hz, Figura 2.14c e della definizione D_{50} a 1000 Hz espressa in percentuale, Figura 2.14d. Le mappe a falsi colori evidenziano le variazioni dei valori all'interno del chiostro, consentendo di visualizzare in modo immediato le zone di maggiore o minore prestazione acustica.

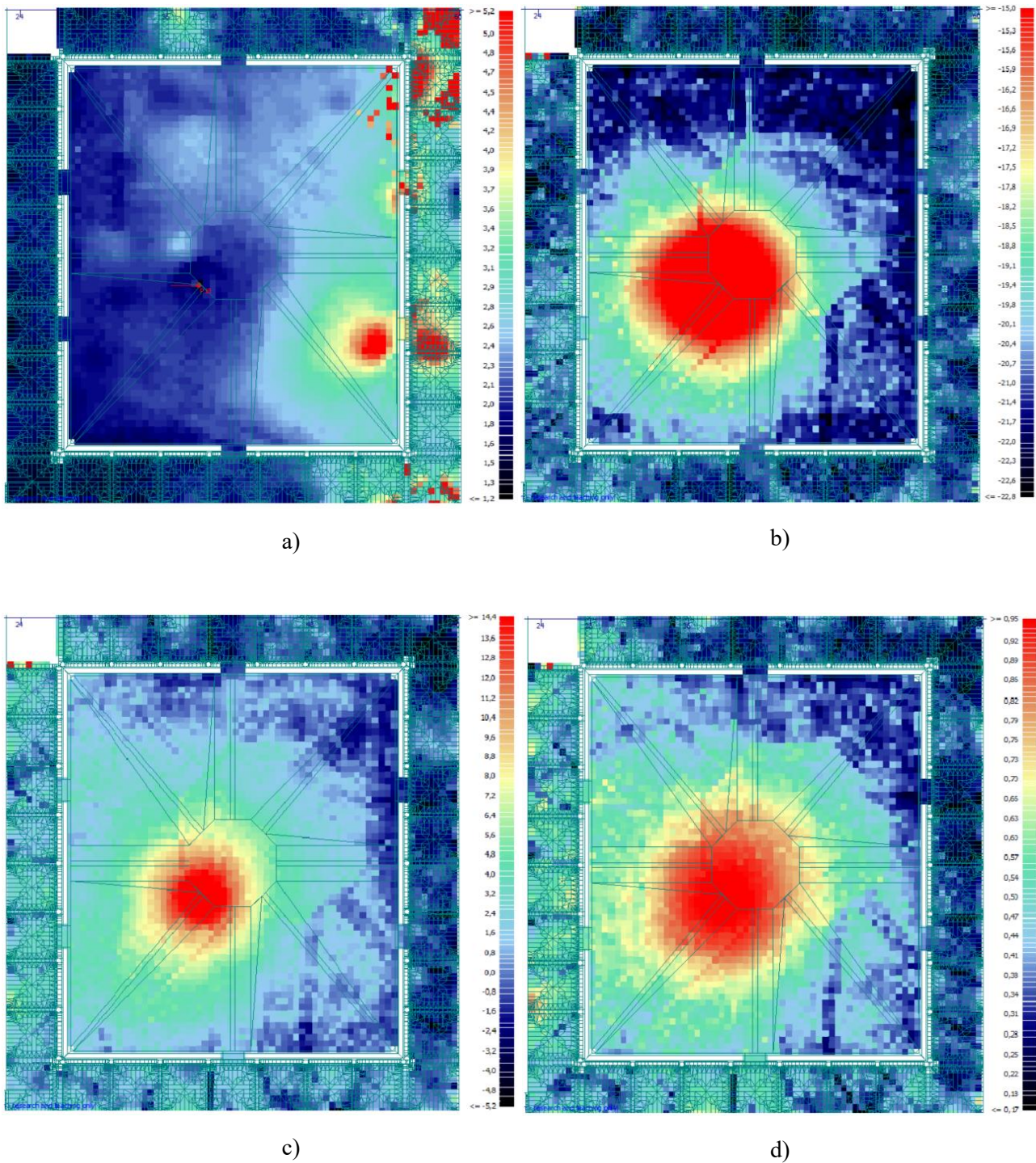


Figura 2.14 – Mappe acustiche ottenute tramite *receiver grid* nel primo scenario del chiostro di San Pietro in Vincoli:

- a) distribuzione del tempo di riverbero T_{30} ,
- b) distribuzione del livello sonoro $SPL(A)$,
- c) distribuzione della chiarezza musicale C_{80} ,
- d) distribuzione della definizione D_{50} .

L'introduzione delle sedute a bassa assorbenza modifica in modo sensibile il comportamento acustico del chiostro rispetto alla configurazione attuale. Sebbene l'assorbimento introdotto sia modesto, l'occupazione parziale della superficie del cortile determina una riduzione significativa del tempo di riverbero e una maggiore uniformità nella distribuzione dell'energia sonora. In questo scenario il T_{30} medio a 1000 Hz si attesta attorno a 1,9 s, valore ancora distante dai criteri ottimali per gli ambienti chiusi, ma nettamente più contenuto rispetto al valore del primo scenario.

La mappa del T_{30} evidenzia una riduzione omogenea dei tempi di decadimento nelle zone occupate dalla platea, con valori che si attestano intorno a 2 s. Le aree perimetrali mostrano ancora tempi più elevati, ma la differenza tra centro e bordo risulta meno evidente rispetto al primo scenario.

La mappa di $SPL(A)$ mostra un'evoluzione coerente con la presenza delle sedute. La distribuzione dell'energia risulta più regolare, con un gradiente di attenuazione meno brusco e un miglior smorzamento laterale. L'area centrale mantiene i livelli più elevati, ma l'irradiazione verso la platea risulta più equilibrata, con differenze inferiori rispetto al primo scenario. La collocazione delle sedute contribuisce inoltre a una parziale canalizzazione dell'energia diretta, migliorando la percezione nelle posizioni più lontane dalla sorgente.

La chiarezza musicale beneficia in modo analogo dell'introduzione delle sedute. I valori di C_{80} aumentano nella zona della platea, segnalando un miglior bilanciamento tra energia precoce e tardiva. Le posizioni prossime alla sorgente presentano ancora livelli elevati, mentre nelle regioni periferiche la risposta rimane più debole, ma comunque più omogenea rispetto allo scenario precedente. Questo comportamento conferma che anche un assorbimento limitato può contribuire a un incremento della qualità uditiva percepita nelle applicazioni di tipo performativo.

L'introduzione delle sedute produce effetti anche sulla definizione sonora. La mappa di D_{50} mostra valori più uniformi all'interno della platea, con un incremento della componente precoce nelle posizioni centrali e laterali. Pur non raggiungendo livelli ottimali per ambienti destinati al parlato, molte postazioni superano la soglia del 50%, indicando una percezione più chiara e definita rispetto allo scenario privo di sedute. Le zone perimetrali continuano a mostrare valori inferiori, ma la distribuzione generale appare più coerente e meno polarizzata.

Nel complesso, il secondo scenario evidenzia come l'inserimento di sedute a bassa assorbenza produca un lieve miglioramento nella risposta acustica del chiostro. La riduzione del T_{30} , la maggiore uniformità della distribuzione energetica e l'incremento dei parametri di chiarezza e definizione portano l'ambiente verso condizioni più favorevoli alla fruizione del parlato e a una migliore chiarezza musicale, pur rimanendo ancora distante dai criteri ottimali di riferimento. La Figura 2.15 riporta le *receiver grid* dei parametri simulati nel secondo scenario: T_{30} in Figura 2.15a, $SPL(A)$ in Figura 2.15b, C_{80} in Figura 2.15c e D_{50} in Figura 2.15d.

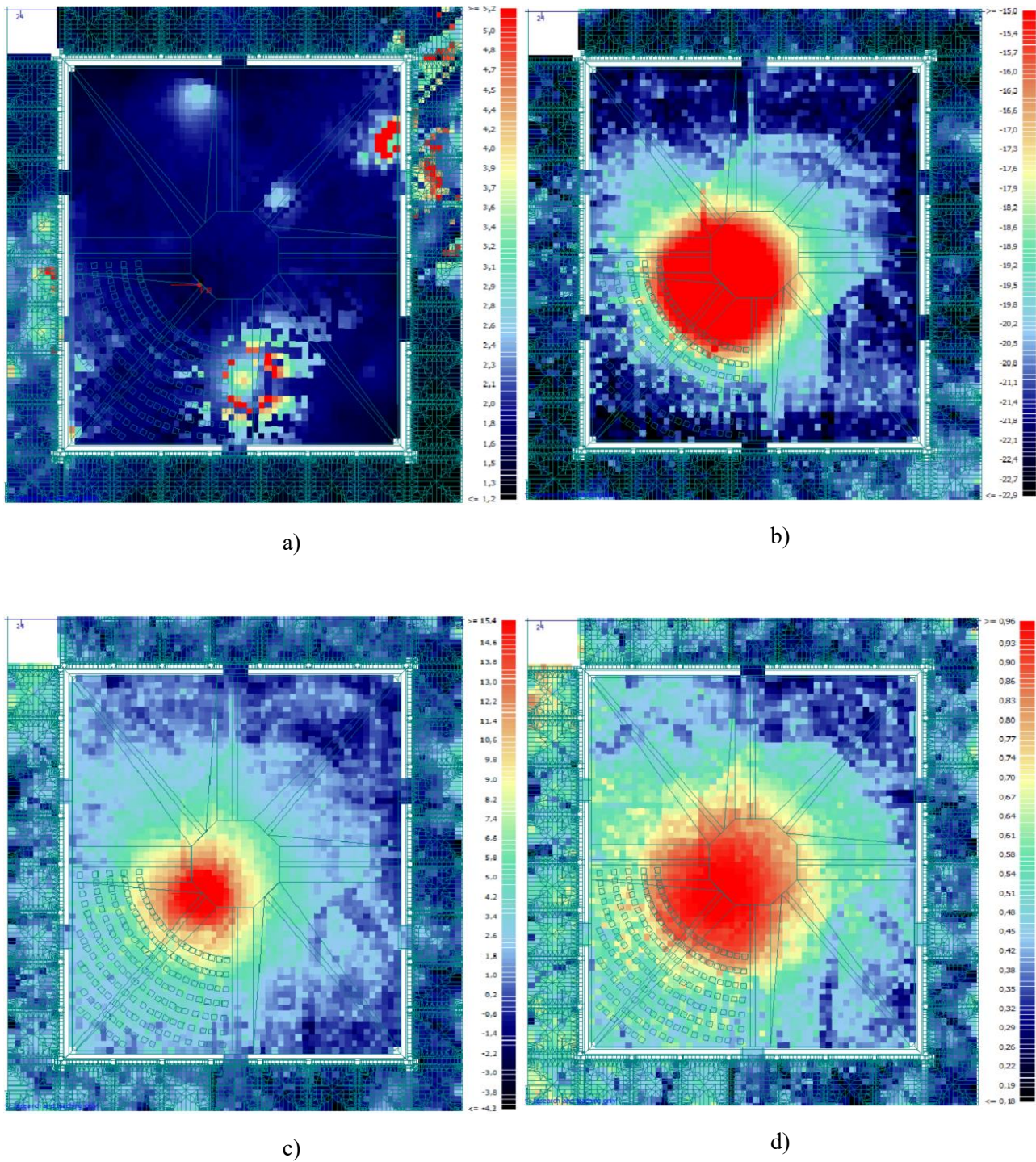


Figura 2.15 – Mappe acustiche ottenute tramite *receiver grid* nel secondo scenario del chiostro di San Pietro in Vincoli:

- a) distribuzione del tempo di riverbero T_{30} ,
- b) distribuzione del livello sonoro $SPL(A)$,
- c) distribuzione della chiarezza musicale C_{80} ,
- d) distribuzione della definizione D_{50} .

Il terzo scenario prevede l'inserimento di sedute caratterizzate da un coefficiente di assorbimento notevolmente più elevato rispetto allo scenario precedente. Questa configurazione ha un impatto più marcato sulla risposta del chiostro, riducendo ulteriormente il tempo di riverbero e migliorando la componente precoce del campo sonoro. Il T_{30} medio alla frequenza di 1000 Hz risulta pari a circa 1,6 s, valore sensibilmente inferiore sia ai 2,5 s della configurazione attuale sia ai 1,9 s ottenuti con sedute a bassa assorbenza, confermando l'efficacia dell'assorbimento nella gestione dell'energia tardiva.

La mappa del T_{30} mostra un miglioramento nella zona della platea, con una riduzione delle aree a decadimento elevato osservate nello scenario precedente. La distribuzione dei valori risulta più compatta e le zone con T_{30} più alto tendono a concentrarsi nelle aree più distanti dalla platea o lungo il perimetro del chiostro. L'aumento dell'assorbenza delle sedute permette un controllo più efficace dell'energia riverberata e riduce l'eterogeneità del campo tardivo con un beneficio diretto per la comprensibilità del parlato e per le performance non musicali.

Anche la distribuzione di $SPL(A)$ risulta più equilibrata: il gradiente energetico nella platea diventa più regolare e la transizione tra le zone centrali e quelle periferiche è meno marcata. L'energia proveniente dalla sorgente si diffonde in modo più omogeneo sulle sedute, con la riduzione delle aree esterne con livelli inferiori.

La chiarezza musicale mostra un incremento ancora più marcato rispetto alla configurazione con sedute a bassa assorbenza. I valori di C_{80} nella platea assumono una distribuzione più coerente, con molte postazioni che raggiungono valori superiori a +6 dB, e in alcuni casi prossimi o superiori a +8 dB. Questo indica una predominanza più solida dell'energia precoce, condizione favorevole sia per il parlato sia per esecuzioni musicali leggere o amplificate.

La mappa del D_{50} mostra un miglioramento significativo della definizione sonora nelle aree centrali e intermedie della platea. Molte posizioni raggiungono valori superiori al 60%, e in alcuni punti prossimi alla sorgente si superano anche valori dell'80%, coerenti con l'effetto combinato tra incremento della componente precoce e riduzione dell'energia tardiva.

L'impiego di sedute ad alta assorbenza determina un miglioramento netto delle condizioni acustiche, con una riduzione significativa del tempo di riverbero e un aumento sensibile dei valori di chiarezza e definizione. Il terzo scenario costituisce un passo avanti rispetto ai precedenti, rendendo la platea più adatta alla fruizione del parlato e di performance non musicali. Persistono alcune criticità nelle zone perimetrali, legate alla natura semiaperta del chiostro, ma il comportamento globale risulta più controllato e prevedibile rispetto alle configurazioni iniziali.

La Figura 2.16 mostra le *receiver grid* dei parametri simulati nel terzo scenario: T_{30} in Figura 2.16a, $SPL(A)$ in Figura 2.16b, C_{80} in Figura 2.16c e D_{50} in Figura 2.16d.

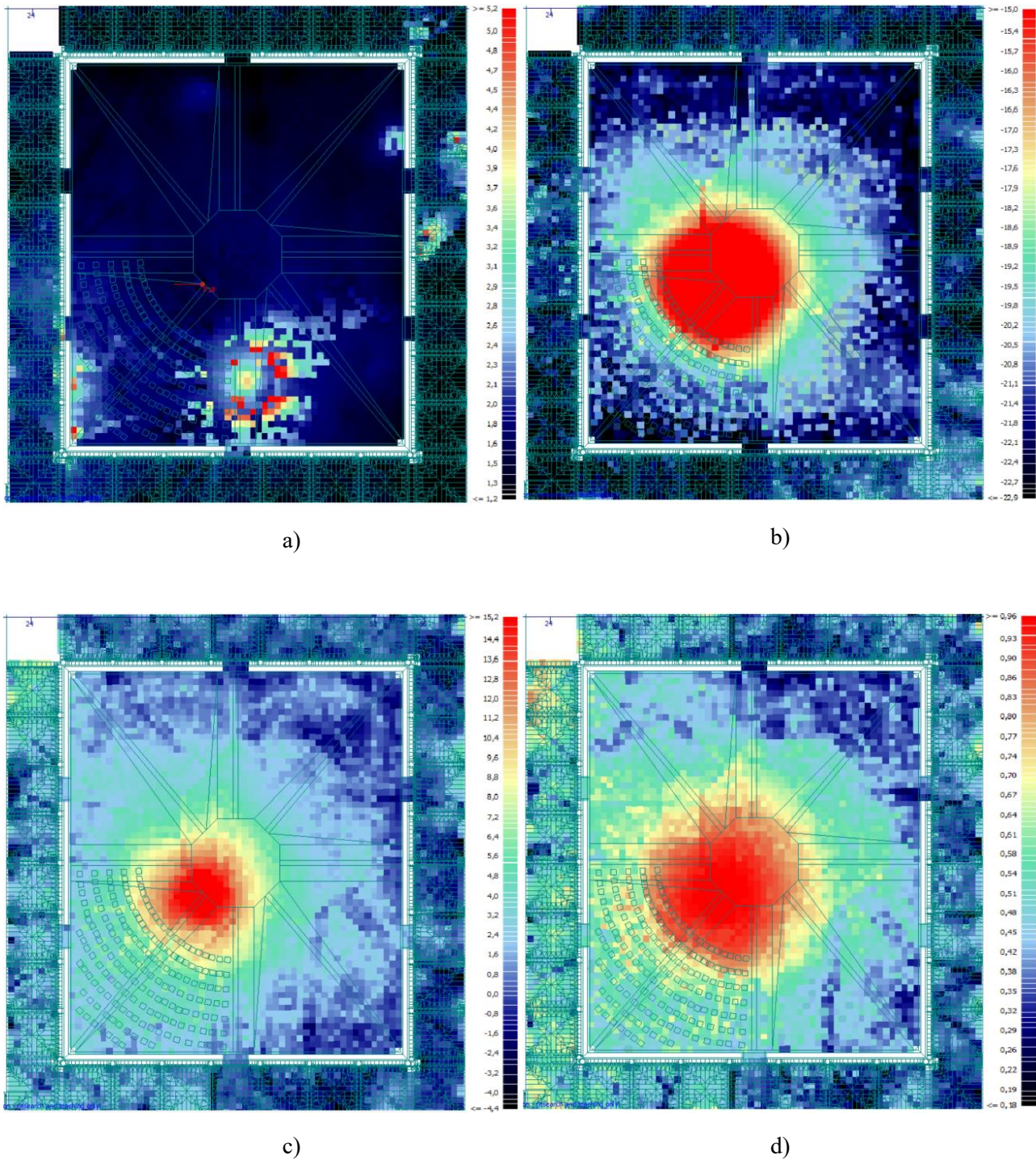


Figura 2.16 – Mappe acustiche ottenute tramite *receiver grid* nel terzo scenario del chiostro di San Pietro in Vincoli:

- a) distribuzione del tempo di riverbero T_{30} ,
- b) distribuzione del livello sonoro $SPL(A)$,
- c) distribuzione della chiarezza musicale C_{80} ,
- d) distribuzione della definizione D_{50} .

Il quarto scenario combina sedute ad alta assorbenza con l'inserimento di pannelli riflettenti posizionati alle spalle delle ultime file della platea. Questa configurazione è concepita per bilanciare assorbimento e diffusione, incrementando l'energia precoce nelle posizioni più distanti dalla sorgente e migliorando la distribuzione dei parametri legati alla chiarezza. Il T_{30} medio risulta pari a circa 1,7 s, leggermente superiore al secondo scenario, di circa 1,6 s, ma con una distribuzione spaziale più stabile nelle zone di ascolto e con un migliore rapporto tra energia precoce e tardiva nelle ultime file.

La mappa del T_{30} evidenzia un decadimento più controllato nella zona della platea. L'introduzione dei pannelli riflettenti riduce la variabilità locale nelle ultime file, dove nello scenario precedente si registravano tempi più elevati. Le aree con T_{30} superiore a 2 s risultano più circoscritte e si concentrano lungo il perimetro esterno, fuori dell'area di ascolto. Nel complesso, la platea mostra un comportamento più omogeneo rispetto agli scenari precedenti, grazie alla combinazione tra l'assorbimento garantito dalle sedute e l'aumento mirato della diffusione nella parte posteriore.

La mappa di $SPL(A)$ mostra un campo sonoro più uniforme nella platea, con un gradiente energetico più regolare e una copertura migliorata nelle file più lontane dalla sorgente. L'introduzione dei pannelli riflettenti incrementa l'energia precoce nelle zone posteriori, compensando in parte l'attenuazione generata dalle sedute altamente assorbenti. Ne risulta una distribuzione più equilibrata dell'energia sonora, con un percepibile miglioramento del livello nelle ultime file.

La chiarezza musicale risulta sensibilmente migliorata dall'inserimento dei pannelli: la mappa di C_{80} evidenzia un aumento e una maggiore uniformità dei valori nelle ultime file, mentre le posizioni anteriori mantengono i livelli già elevati dello scenario precedente. L'intera platea mostra quindi una maggiore omogeneità, con un campo sonoro più coerente rispetto alle configurazioni precedenti.

Il parametro D_{50} mostra un miglioramento netto nelle posizioni posteriori della platea. L'effetto combinato di sedute assorbenti e pannelli riflettenti concentra una quota maggiore di energia nelle prime riflessioni, aumentando la definizione nelle ultime file dove gli scenari precedenti presentavano valori più contenuti. Nelle zone centrali i valori rimangono elevati e sostanzialmente invariati rispetto allo scenario anteriore, confermando un andamento coerente nella percezione del parlato.

Il quarto scenario rappresenta un'evoluzione efficace rispetto alle configurazioni precedenti: i pannelli riflettenti collocati dietro le ultime file incrementano l'energia precoce nelle zone più lontane dalla sorgente, migliorando chiarezza e definizione. Sebbene il T_{30} medio risulti leggermente superiore a quello del terzo scenario, la platea mostra una distribuzione più regolare ed equilibrata. L'unione tra sedute altamente assorbenti e pannelli riflettenti mirati offre una condizione nel complesso più adatta al parlato e agli eventi non musicali, attenuando alcune criticità avvertite negli scenari precedenti. La Figura 2.17 mostra le *receiver grid* dei parametri simulati nel quarto scenario: T_{30} in Figura 2.17a, $SPL(A)$ in Figura 2.17b, C_{80} in Figura 2.17c e D_{50} in Figura 2.17d.

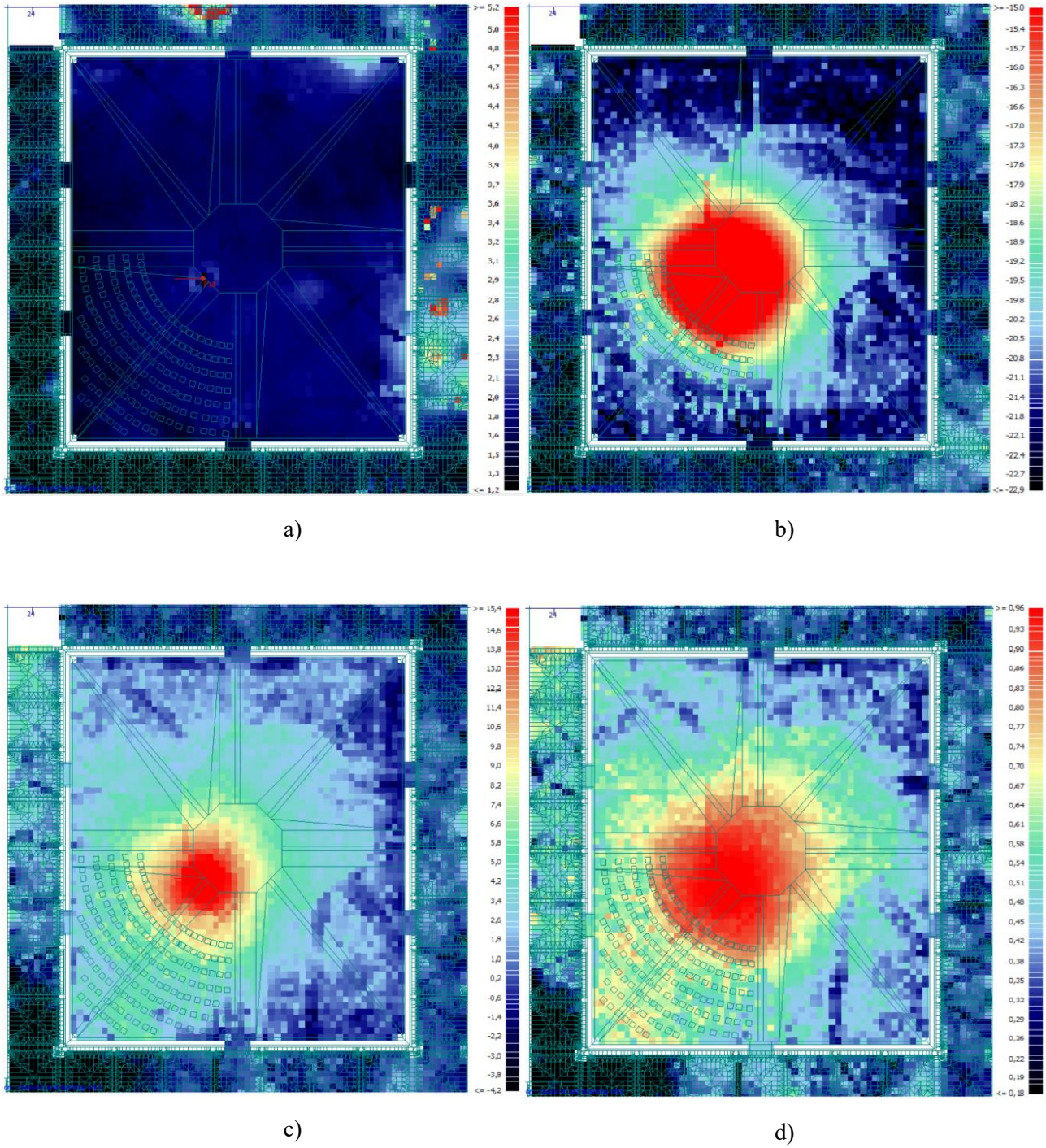


Figura 2.17 – Mappe acustiche ottenute tramite *receiver grid* nel quarto scenario del chiostro di San Pietro in Vinci:

- a) distribuzione del tempo di riverbero T_{30} ,
- b) distribuzione del livello sonoro $SPL(A)$,
- c) distribuzione della chiarezza musicale C_{80} ,
- d) distribuzione della definizione D_{50} .

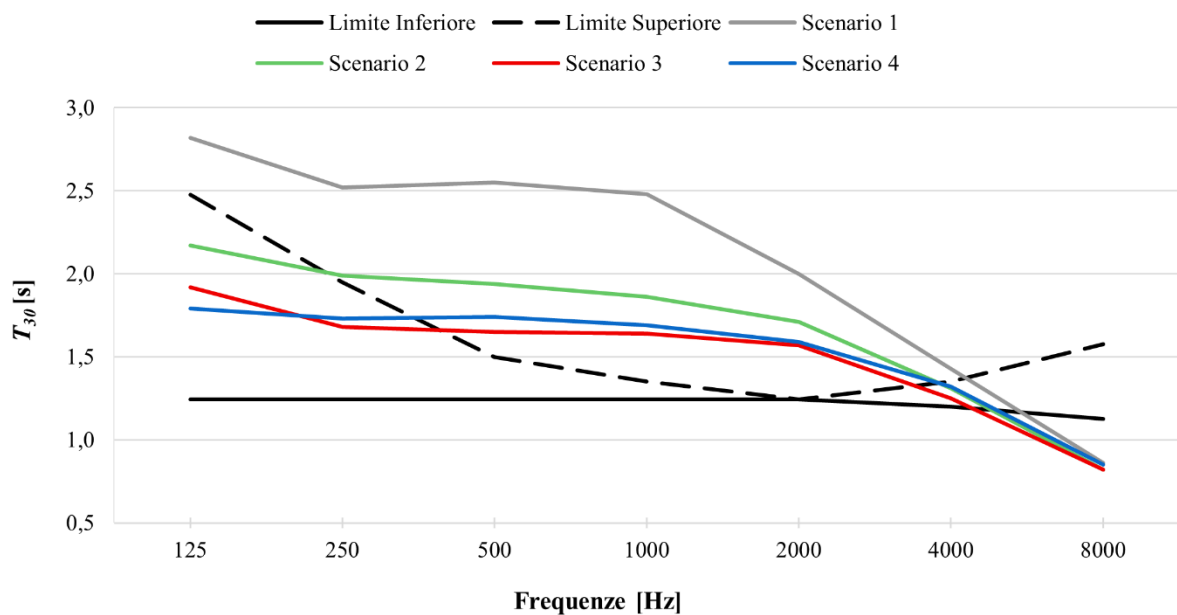
L'andamento del T_{30} in funzione della frequenza è stato valutato per le quattro configurazioni simulate del chiostro di San Pietro in Vincoli (stato attuale, sedute poco assorbenti, sedute molto assorbenti, sedute molto assorbenti con pannelli), analizzando le bande comprese tra 125 e 8000 Hz.

La Tabella 2.9 riporta i valori di T_{30} nelle bande d'ottava comprese tra 125 Hz e 8000 Hz calcolati dal modello ODEON per ciascuno scenario del chiostro di San Pietro in Vincoli.

Tabella 2.9 – Valori di T_{30} espressi in secondi nelle bande d'ottava comprese tra 125 Hz e 8000 Hz per i quattro scenari analizzati del chiostro di San Pietro in Vincoli.

Scenario	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
1	2.82	2.52	2.55	2.48	2.00	1.43	0.86
2	2.17	1.99	1.94	1.86	1.71	1.31	0.82
3	1.92	1.68	1.65	1.64	1.57	1.25	0.82
4	1.79	1.73	1.74	1.69	1.59	1.32	0.85

I grafici riportati nelle Figure 2.18a e 2.18b mostrano il confronto tra il tempo di riverbero T_{30} , espresso in secondi, relativo ai quattro scenari simulati per il chiostro di San Pietro in Vincoli e gli intervalli ottimali presenti in letteratura per sale da concerto di grande volume di circa 50000 m³, distinti per parlato (Figura 2.18a) e musica (Figura 2.18b) nelle bande di frequenza comprese tra 125 e 8000 Hz. I riferimenti ottimali sono rappresentati da quattro curve limite, due per il parlato e due per la musica, rispettivamente valori massimi e minimi, utilizzate come criterio prestazionale superiore per valutare quanto ciascuna configurazione del chiostro si discosti dal comportamento acustico tipico di ambienti progettati per un uso professionale.



a)

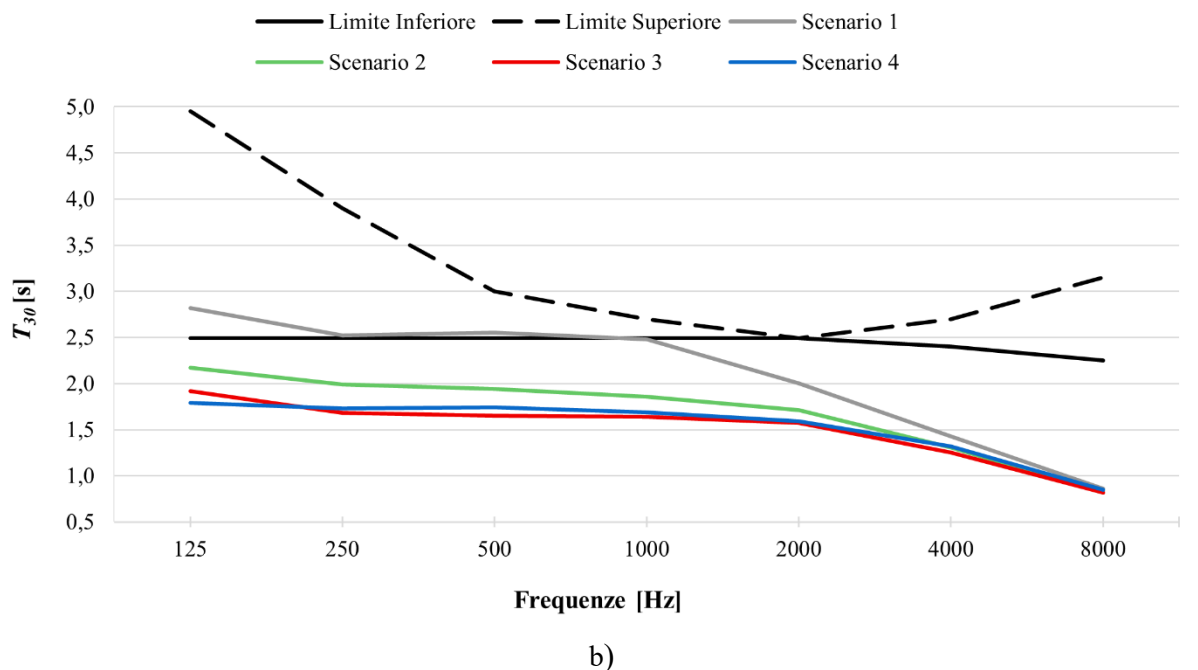


Figura 2.18 – Confronto tra i valori del tempo di riverbero T_{30} dei quattro scenari simulati del chiostro di San Pietro in Vincoli e gli intervalli ottimali per il parlato (a) e musica (b) relativi a sale chiuse di grande volume nelle bande da 125 a 8000 Hz.

Nel grafico relativo al parlato, Figura 2.18a, le due curve di riferimento ottimale per una sala chiusa di circa 50000 m³ delimitano il campo di valori considerati idonei per questo tipo di utilizzo, con un intervallo che, alle diverse bande di frequenza, oscilla da circa 2,48–1,25 s a 125 Hz e si assesta intorno a 1,50–1,25 s a 500 Hz, fino a valori compresi tra circa 1,58–1,13 s a 8000 Hz.

Rispetto a tali limiti di riferimento, tutte le configurazioni simulate del chiostro di San Pietro in Vincoli mostrano tempi di riverbero superiori, confermando la distanza intrinseca tra un ambiente semiaperto e una sala progettata per il parlato. Lo scenario senza sedute presenta i valori più elevati in assoluto: la curva rimane sistematicamente al di sopra del limite massimo ottimale lungo quasi tutto lo spettro, avvicinandosi ai valori inferiori solo nelle alte frequenze, dove scende al di sotto del limite minimo in prossimità degli 8000 Hz.

L’inserimento di sedute poco assorbenti riduce in modo evidente il tempo di riverbero in tutte le frequenze, ma la curva resta comunque costantemente superiore al limite massimo fino a circa 4000 Hz, per poi collocarsi sotto il minimo ottimale nelle frequenze più alte.

Le sedute molto assorbenti producono lo scenario più favorevole: pur rimanendo sempre sopra al limite massimo, la curva mostra la minore distanza rispetto al *range* ottimale, soprattutto alle basse frequenze (\approx 125–500 Hz), dove il comportamento si avvicina maggiormente ai valori di sala.

Infine, la configurazione con sedute altamente assorbenti e pannelli riflettenti presenta un andamento molto simile allo scenario precedente, con valori lievemente più elevati che non

influenzano le condizioni di parlato. Anche in questo caso, tuttavia, i valori non rientrano nel *range* ottimale previsto per sale di grande volume.

Nel caso della musica, Figura 2.18b, i valori ottimali di riferimento per sale chiuse di grande volume risultano significativamente più elevati rispetto a quelli del parlato: alle basse frequenze i tempi ottimali superano i 4 s, mentre alle alte frequenze si attestano comunque oltre i 2 s. Ciò implica che un ambiente realmente adatto alle esecuzioni musicali richiede un decadimento molto più lungo e sostenuto.

Le curve del chiostro di San Pietro in Vincoli mostrano un comportamento chiaramente distante da tali condizioni. L'unica configurazione che si avvicina parzialmente all'intervallo di riferimento è lo stato privo di sedute, che intercetta il limite inferiore nelle frequenze fino a circa 500 Hz, pur rimanendo al di sotto del *range* ottimale nelle frequenze superiori. L'introduzione delle sedute, sia poco sia molto assorbenti, riduce ulteriormente i tempi di riverbero rendendo l'ambiente ancor più lontano dai valori richiesti per un'acustica musicale di qualità. Anche l'aggiunta dei pannelli riflettenti non comporta un incremento apprezzabile del decadimento: lo scenario con pannelli presenta infatti valori quasi sovrapposti a quelli delle sedute molto assorbenti, confermando l'impossibilità strutturale del chiostro di raggiungere tempi adeguati alla musica.

L'analisi congiunta delle curve in frequenza e delle mappe numeriche dei parametri simulati evidenzia in modo chiaro il comportamento acustico del chiostro di San Pietro in Vincoli nelle quattro configurazioni considerate. Il primo scenario, corrispondente allo stato di fatto senza sedute, presenta un T_{30} medio elevato, con valori in banda che raggiungono 2,8 s a 125 Hz e rimangono significativamente superiori ai limiti considerati idonei per il parlato. Le *receiver grid* confermano una notevole disomogeneità spaziale, con differenze marcate tra l'area centrale e le zone perimetrali, dove il campo sonoro risulta scarsamente controllato a causa dell'apertura zenitale e dell'assenza di superfici riflettenti dedicate. I valori di C_{80} e D_{50} sono bassi in gran parte della superficie del chiostro, indicando livelli insufficienti di chiarezza e definizione. Nel complesso, lo stato di fatto non risulta acusticamente compatibile con esigenze performative, rendendo necessario l'inserimento di elementi correttivi.

Il secondo scenario, caratterizzato dall'introduzione di sedute a bassa assorbenza, produce un primo miglioramento rispetto alla configurazione iniziale. La curva del T_{30} mostra una riduzione evidente e sistematica lungo tutto il *range* di frequenze, pur rimanendo ancora superiore ai valori ottimali per il parlato. Le *receiver grid* evidenziano una diffusione leggermente più uniforme nella zona della platea e un parziale incremento dei valori di C_{80} e D_{50} , soprattutto nei settori centrali. Nonostante ciò, la risposta globale dell'ambiente resta lontana dai criteri di riferimento: la chiarezza migliora ma rimane insufficiente, mentre persistono differenze significative tra area centrale e

perimetro. Questo scenario mostra quindi un miglioramento percettibile, pur non garantendo condizioni pienamente adeguate.

Il terzo scenario, con sedute altamente assorbenti, determina un salto prestazionale molto più marcato. L'andamento in frequenza mostra valori di T_{30} decisamente ridotti, con una convergenza significativa verso l'intervallo ottimale per il parlato alle basse frequenze (fino a circa 500Hz). Le mappe confermano un incremento sostanziale di C_{80} e D_{50} e una maggiore uniformità energetica nell'area occupata dalla platea. La parte centrale del chiostro presenta ora livelli di chiarezza adeguati a garantire una buona intelligibilità del parlato, mentre le zone perimetrali, pur migliorate, continuano a manifestare criticità dovute alla geometria aperta e all'assenza di confinamento superiore. L'ambiente diventa comunque più prevedibile e controllato, con una risposta coerente con i valori calcolati in frequenza.

Il quarto scenario, caratterizzato dall'inserimento di sedute molto assorbenti insieme a pannelli riflettenti posti dietro le ultime file, rappresenta un'ulteriore evoluzione progettuale. La curva del T_{30} rimane sostanzialmente analoga a quella dello scenario precedente, con differenze minime, tuttavia, le *receiver grid* mostrano un incremento dell'energia precoce nelle zone più distanti dalla sorgente, in particolare nelle ultime file. I valori di C_{80} aumentano sensibilmente nel settore posteriore, indicando un miglioramento della definizione e della percezione del segnale diretto nelle posizioni più critiche. Anche D_{50} beneficia dell'intervento riflettente, con un aumento più marcato nelle aree dove la distanza dalla sorgente avrebbe altrimenti penalizzato la chiarezza. Pur non riducendo ulteriormente il T_{30} , l'inserimento dei pannelli conferisce una platea più equilibrata e omogenea, particolarmente adatta alla fruizione del parlato.

Il confronto complessivo con le curve ottimali per sale chiuse da 50000 m³ conferma che il chiostro, a causa della sua natura semiaperta, non può raggiungere condizioni favorevoli per eventi musicali riverberanti: in tutti gli scenari, i valori del T_{30} risultano sistematicamente inferiori ai limiti minimi necessari per la musica. Per il parlato, invece, le configurazioni con sedute molto assorbenti (con o senza pannelli) rappresentano una condizione acusticamente efficace e coerente con i valori di riferimento, pur con un leggero e fisiologico eccesso di assorbimento alle frequenze più basse. Il chiostro di San Pietro in Vincoli risulta dunque ottimizzabile per eventi basati sul parlato, mentre rimane strutturalmente non idoneo per performance musicali che richiedano un tempo di riverbero sensibilmente maggiore. Le simulazioni mostrano un comportamento coerente con le aspettative fisiche degli ambienti aperti o parzialmente confinati, dove la dispersione verticale dell'energia sonora impedisce di raggiungere i livelli di persistenza richiesti dalla musica.

2.3.2 Risultati e conclusioni della corte interna dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo

Il primo scenario rappresenta la configurazione attuale del corte interno dell'ex Tommaseo, caratterizzata dall'assenza di sedute e di elementi riflettenti dedicati. La morfologia semichiusa dello spazio determina un comportamento acustico dominato dalla dispersione dell'energia verso l'esterno e da una forte eterogeneità spaziale. Il T_{30} medio simulato alla frequenza di 1000 Hz risulta pari a circa 2,0 s, valore ancora superiore ai limiti considerati adeguati per spazi dedicati al parlato, confermando la limitata capacità dell'ambiente di controllare la riverberazione residua.

La *receiver grid* del T_{30} (Figura 2.19a) mostra una distribuzione marcatamente non uniforme, con valori più elevati nelle aree laterali, dove le riflessioni sulle pareti verticali incrementano la persistenza energetica. Le zone centrali del cortile presentano invece tempi inferiori, soprattutto in prossimità dell'apertura zenitale, dove la dispersione verso l'esterno riduce il contributo dell'energia tardiva. Nel complesso, il comportamento evidenzia una risposta troppo riverberante per ospitare eventi performativi e una scarsa coerenza spaziale del campo sonoro.

La mappa di $SPL(A)$ (Figura 2.19b) evidenzia un gradiente energetico molto netto: la zona antistante la sorgente presenta livelli significativamente più alti, mentre la copertura acustica nelle aree laterali e posteriori risulta insufficiente, con differenze che superano gli 8 dB. Tale disomogeneità è dovuta alla prevalenza dell'energia diretta nei primi metri e alla mancanza di superfici riflettenti efficaci in grado di garantire un'adeguata distribuzione verso le zone più lontane.

Il parametro C_{80} (Figura 2.19c) presenta valori elevati solo nelle immediate vicinanze della sorgente, mentre nel resto del cortile si osservano valori molto bassi, indicando una predominanza dell'energia tardiva rispetto alla componente precoce. Questo conferma che la configurazione attuale non è idonea per attività musicali, poiché non garantisce sufficiente chiarezza né definizione.

La griglia del parametro D_{50} (Figura 2.19d) mostra un comportamento coerente con quello del C_{80} : nelle postazioni più prossime alla sorgente i valori superano 0,6–0,7, suggerendo un buon livello di definizione locale, mentre nelle zone laterali e posteriori il parametro scende anche a 0,3, valore non appropriato per il parlato. La fruizione è dunque caratterizzata da un'elevata asimmetria: alcune aree risultano adeguate, altre inadatte a causa dell'eccesso di energia tardiva e della scarsa diffusione.

Nel complesso, la configurazione attuale della corte dell'ex Istituto Tommaseo non risulta acusticamente idonea per eventi basati sul parlato o per performance. I valori elevati di T_{30} , la marcata eterogeneità della distribuzione energetica, la dispersione verso l'apertura zenitale e l'assenza di superfici riflettenti dedicate determinano scarsa intelligibilità, ridotta chiarezza e un controllo limitato della propagazione sonora. La Figura 2.19 presenta le *receiver grid* dei parametri simulati nel primo scenario: tempo di riverbero T_{30} (a), $SPL(A)$ (b), C_{80} a 1000 Hz (c) e D_{50} a 1000 Hz (d).

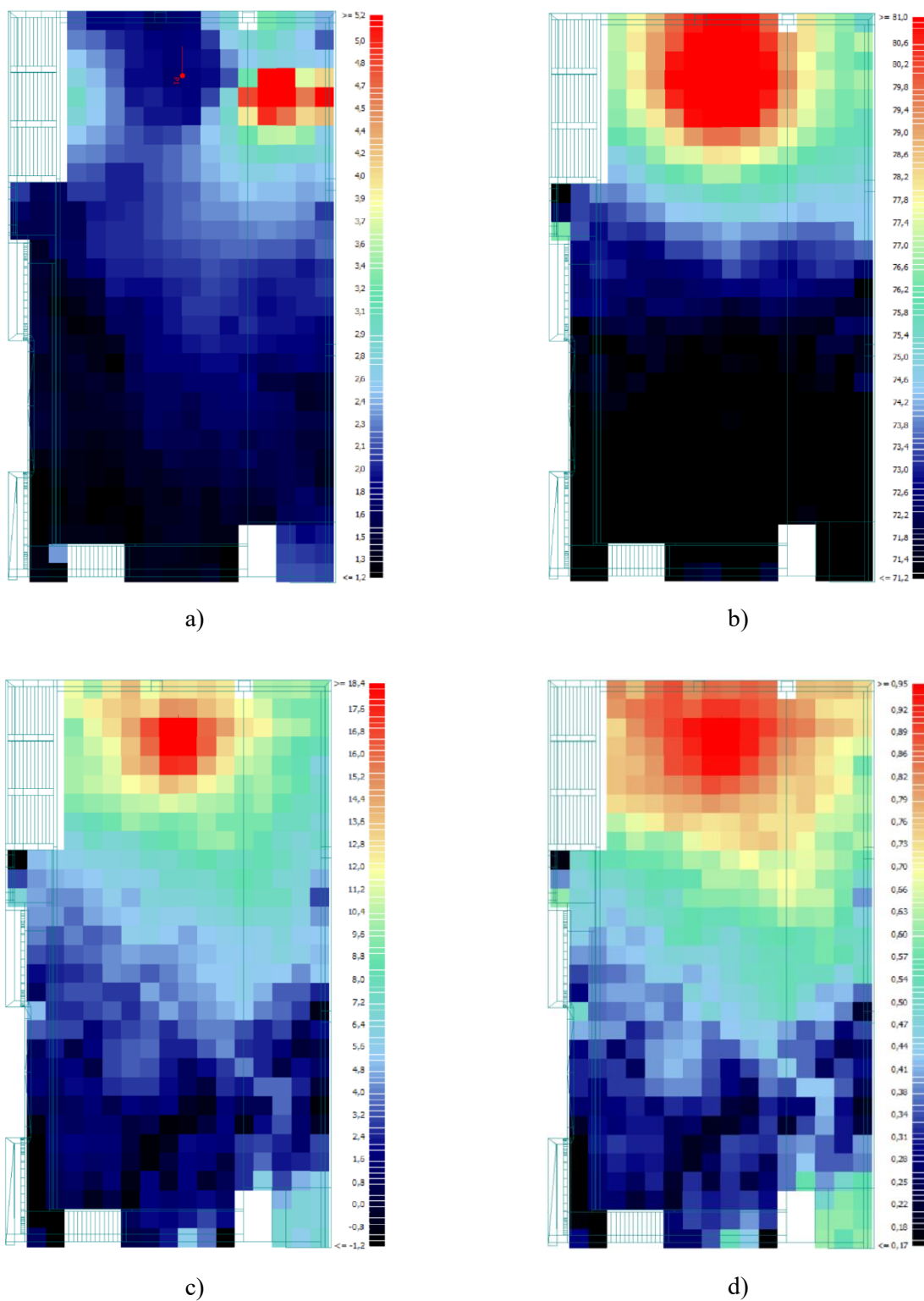


Figura 2.19 – Mappe acustiche ottenute tramite *receiver grid* nel primo scenario della corte interna dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo:

- a) distribuzione del tempo di riverbero T_{30} ,
- b) distribuzione del livello sonoro $SPL(A)$,
- c) distribuzione della chiarezza musicale C_{80} ,
- d) distribuzione della definizione D_{50} .

L'introduzione delle sedute a bassa assorbenza modifica in modo significativo il comportamento acustico del chiostro rispetto alla configurazione attuale. Sebbene l'incremento di assorbimento sia limitato, la presenza della platea determina una riduzione misurabile del tempo di riverbero, che a 1000 Hz assume un valore medio di circa 1,8 s, inferiore rispetto ai livelli osservati nello stato di fatto. Pur restando superiore ai *range* tipici degli ambienti chiusi destinati a parlato o musica, tale valore rappresenta un primo miglioramento della risposta energetica complessiva.

La *receiver grid* del T_{30} mostra una riduzione dei tempi di decadimento rispetto allo stato iniziale. Nell'area occupata dalla platea i tempi si stabilizzano attorno a 2,0–2,6 s, con una distribuzione più compatta e meno frammentata. Nelle zone più lontane dalla sorgente si registra un abbassamento netto rispetto allo scenario attuale. Nel complesso, la mappa del T_{30} evidenzia un comportamento più controllato ed omogeneo, grazie all'introduzione delle sedute che interrompono parte dei percorsi riflessi e incrementano l'assorbimento.

La mappa di $SPL(A)$ evidenzia una maggiore uniformità nella distribuzione energetica rispetto alla configurazione iniziale. L'attenuazione verso la platea risulta più graduale e le zone più lontane raggiungono valori leggermente superiori rispetto allo scenario di partenza. Questo indica una copertura sonora più omogenea e regolare, con minori zone d'ombra acustica e una minore polarizzazione rispetto allo scenario precedente.

Per quanto riguarda la chiarezza musicale, i valori di C_{80} mostrano un miglioramento generale e nelle zone della platea. In prossimità della sorgente i valori permangono elevati, mentre nelle regioni laterali e posteriori la distribuzione risulta più omogenea rispetto allo scenario attuale. L'aumento della chiarezza, pur moderato, è indicativo di una riduzione dell'energia tardiva favorita dall'assorbimento introdotto dai corpi delle sedute e dalla loro disposizione.

La definizione D_{50} , parametro rilevante per il parlato, evidenzia valori positivi nella zona della platea, con diverse posizioni che raggiungono o superano la soglia del 50%. Le aree posteriori continuano a mostrare valori inferiori, in parte a causa della distanza dalla sorgente e delle perdite energetiche verso l'alto, tuttavia la distribuzione complessiva risulta meno sbilanciata rispetto a quella osservata nella configurazione iniziale. Il comportamento globale conferma che anche un incremento minimo di assorbimento può favorire l'equilibrio tra energia precoce e tardiva.

Nel complesso, lo scenario con sedute a bassa assorbenza rappresenta un primo passo verso il miglioramento della risposta acustica del chiostro. La riduzione del T_{30} , l'incremento della chiarezza e la maggiore uniformità nella distribuzione energetica portano l'ambiente verso condizioni più favorevoli alla comprensione del parlato e alla fruizione di contenuti non musicali pur mantenendo valori ancora distanti dai criteri ottimali. La Figura 2.20 riporta le *receiver grid* dei parametri simulati nel secondo scenario: T_{30} (a), $SPL(A)$ (b), C_{80} (c) e D_{50} (d).

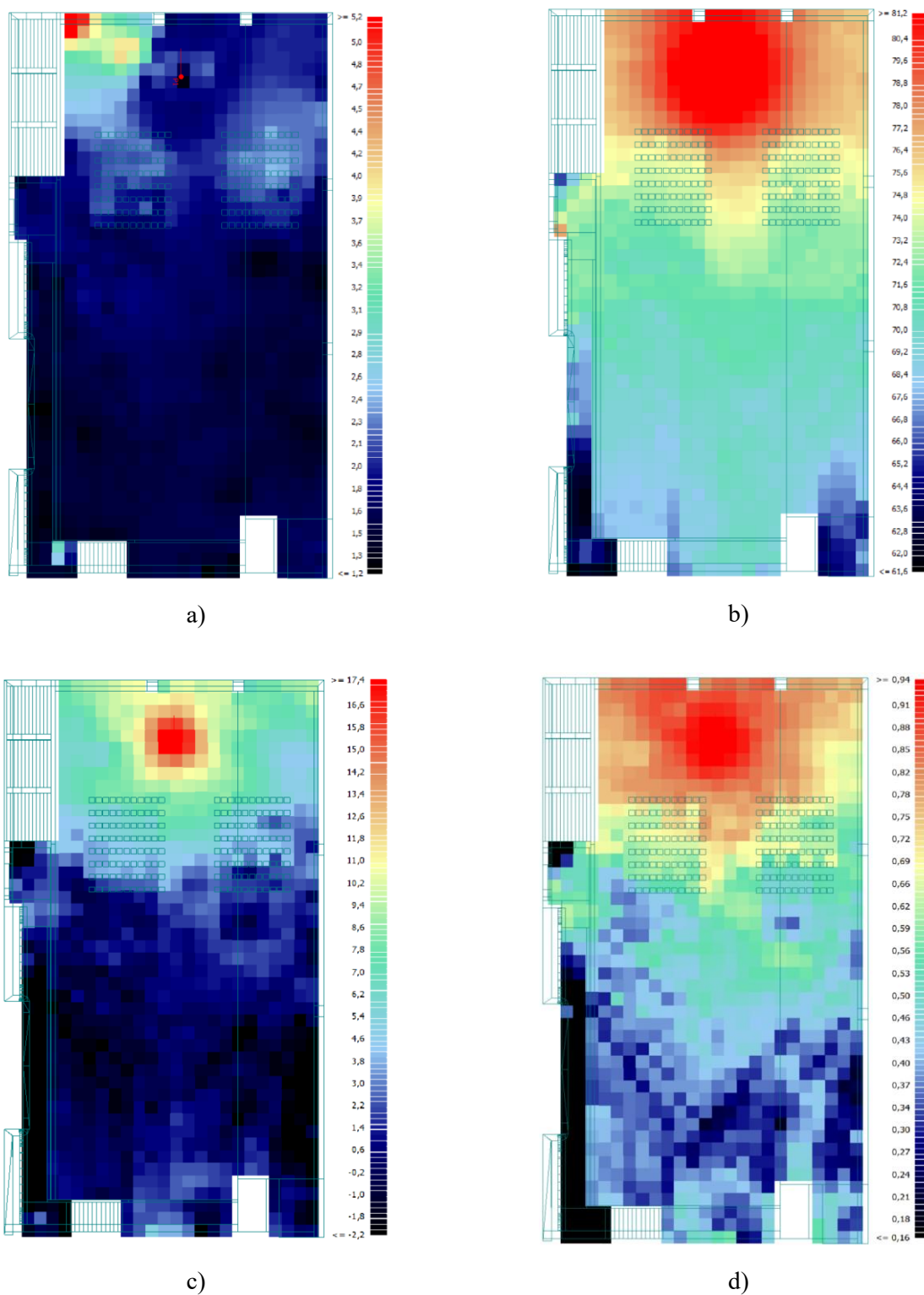


Figura 2.20 – Mappe acustiche ottenute tramite *receiver grid* nel secondo scenario della corte interna dell'ex Istituto Nicolò Tommaseo:

- a) distribuzione del tempo di riverbero T_{30} ,
- b) distribuzione del livello sonoro $SPL(A)$,
- c) distribuzione della chiarezza musicale C_{80} ,
- d) distribuzione della definizione D_{50} .

L'introduzione di sedute con un coefficiente di assorbimento superiore rispetto allo scenario precedente produce un effetto percettibile ma non sostanziale sul comportamento acustico del chiostro. Il T_{30} medio alla frequenza di 1000 Hz rimane pari a circa 1,8 s, valore identico allo scenario con sedute a bassa assorbenza, indicando che l'incremento di assorbimento introdotto dalle sedute non produce un'ulteriore riduzione apprezzabile del decadimento energetico globale. Questo risultato è coerente con la geometria della corte dell'ex Tommaseo, dove la maggiore apertura laterale e la disposizione spaziale delle superfici determinano già un livello di perdita energetica significativo e limitano l'efficacia di assorbitori aggiuntivi.

La griglia del T_{30} mostra una distribuzione molto simile a quella dello scenario precedente e non si osserva alcun miglioramento ulteriore, poiché la distribuzione dei valori rimane pressoché sovrapponibile. L'incremento dell'assorbimento introdotto dalle sedute non riesce a compensare la dispersione energetica verso l'alto caratteristica del chiostro.

Dalla distribuzione di $SPL(A)$ non emerge un cambiamento significativo nella conformazione del campo sonoro rispetto allo scenario precedente. Le sedute più assorbenti attenuano lievemente l'energia riflessa localmente, ma l'impatto complessivo sulla propagazione è marginale.

La mappa di C_{80} evidenzia un incremento localizzato della chiarezza nella zona palco e le prime file, con valori anche superiori a +6 dB, mentre la platea centrale registra valori compresi tra +3 e +5 dB. Nelle aree più distanti e laterali, invece, il parametro rimane molto basso, spesso inferiore a 0 dB, con ampie zone che mostrano un chiaro dominio dell'energia tardiva. Rispetto allo scenario con sedute poco assorbenti, il miglioramento è percepibile nella platea, ma il comportamento globale resta fortemente sbilanciato e lontano da condizioni ottimali per performance musicali o per parlato.

La mappa di D_{50} evidenzia differenze quasi impercettibili rispetto allo scenario precedente. Nella zona centrale e nelle file intermedie i valori si attestano generalmente tra 0,55 e 0,65, mentre le aree laterali e le posizioni più arretrate continuano a presentare valori inferiori a 0,40, segnalando una definizione sonora ancora insufficiente in ampie porzioni del chiostro. L'incremento di assorbimento introdotto non modifica in modo significativo il comportamento acustico complessivo: la dispersione laterale dell'energia rimane dominante e limita l'efficacia dello scenario rispetto allo stato iniziale.

Le sedute ad alta assorbenza producono un lieve beneficio locale nella platea, migliorando leggermente definizione e chiarezza rispetto allo scenario precedente. Tuttavia, l'effetto sul T_{30} rimane pressoché nullo e l'impatto complessivo è limitato dalla natura semiaperta del chiostro e dalla forte dispersione verso l'esterno. Persistono ampie zone periferiche con livelli insufficienti di chiarezza e definizione, e la risposta globale rimane non ottimale per eventi performativi. La Figura 2.21 riporta le *receiver grid* dei parametri simulati nel terzo scenario: T_{30} (a), $SPL(A)$ (b), C_{80} (c) e D_{50} (d).

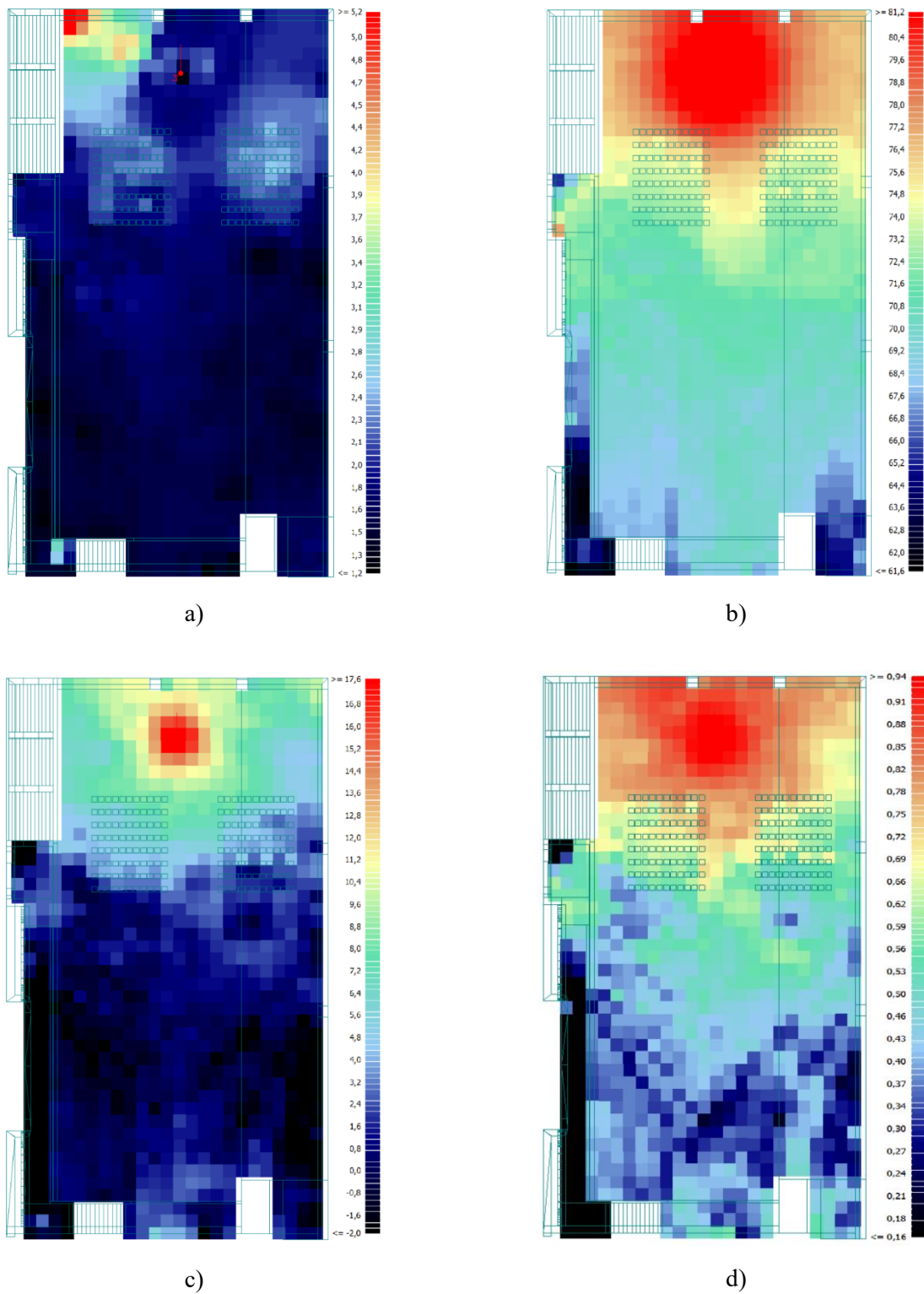


Figura 2.21 – Mappe acustiche ottenute tramite *receiver grid* nel terzo scenario della corte interna dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo:

- a) distribuzione del tempo di riverbero T_{30} ,
- b) distribuzione del livello sonoro $SPL(A)$,
- c) distribuzione della chiarezza musicale C_{80} ,
- d) distribuzione della definizione D_{50} .

Il quarto scenario prevede l'inserimento combinato di sedute ad alta assorbenza e tre elementi riflettenti posizionati intorno all'area del palco: una barriera verticale collocata dietro la sorgente, una barriera concava dietro alla platea e orientata verso il palco e un pannello orizzontale calpestabile posto sopra il palco. Il T_{30} medio a 1000 Hz risulta pari a circa 2,1 s, valore più elevato rispetto agli scenari con sole sedute assorbenti, ma con una distribuzione spaziale più controllata nella platea.

La mappa del T_{30} mostra come l'introduzione dei pannelli riflettenti generi valori più bassi nella platea e distribuiti in modo più uniforme, con ampie zone comprese tra 1,6 e 2,2 s e l'eterogeneità del campo tardivo nella platea risulta ridotta rispetto allo scenario precedente. Nel complesso, i pannelli riflettenti non riducono il tempo di riverbero medio, ma stabilizzano la distribuzione nella platea, rendendo l'andamento più leggibile rispetto ai tre scenari precedenti.

La mappa di $SPL(A)$ evidenzia un miglioramento netto nella distribuzione dell'energia all'interno della platea. Si nota un incremento dei livelli nelle zone centrali e nelle file arretrate, che negli scenari precedenti risultavano più deboli. La transizione tra area frontale e file posteriori risulta più graduale, con ampie porzioni superiori ai 71 dB e una riduzione significativa delle aree periferiche sotto i 70 dB. Nel complesso, i pannelli favoriscono più uniformità, migliorando la propagazione dell'energia diretta e delle prime riflessioni verso le posizioni più distanti dalla sorgente.

La mappa del C_{80} mostra un chiaro incremento della chiarezza nelle zone centrali e posteriori della platea rispetto agli scenari precedenti. La presenza dei pannelli riflettenti introduce prime riflessioni direzionate verso il pubblico, che portano molte posizioni della platea a raggiungere valori tra +4 e +8 dB. L'intervento produce quindi un miglior rapporto tra energia precoce e tardiva, con un miglioramento evidente delle condizioni per ascolti basati sul parlato o su musica leggera.

Il parametro D_{50} evidenzia un chiaro miglioramento dovuto ai pannelli riflettenti. Le zone centrali e arretrate della platea mostrano valori più elevati, spesso compresi tra 0,55 e 0,75, mentre nello scenario precedente molte postazioni si attestavano intorno a 0,40. L'effetto combinato di sedute assorbenti e pannelli incrementa quindi la componente precoce e rende più uniforme la distribuzione della definizione, migliorando la comprensione del parlato nelle posizioni più distanti dalla sorgente.

Il quarto scenario restituisce l'assetto acustico più equilibrato tra quelli analizzati. Il tempo di riverbero nella platea risulta più stabile e la distribuzione dell'energia sonora migliora in modo evidente, soprattutto nelle file posteriori. Anche chiarezza e definizione del parlato aumentano nelle zone centrali e arretrate, riducendo le criticità presenti negli scenari precedenti. Pur permanendo la dispersione legata all'apertura zenitale, la combinazione tra sedute assorbenti e pannelli riflettenti costituisce la configurazione più efficace, garantendo una maggiore uniformità del campo sonoro e una migliore qualità percettiva nella platea. La Figura 2.22 riporta le *receiver grid* dei parametri simulati nel quarto scenario: T_{30} (a), $SPL(A)$ (b), C_{80} (c) e D_{50} (d).

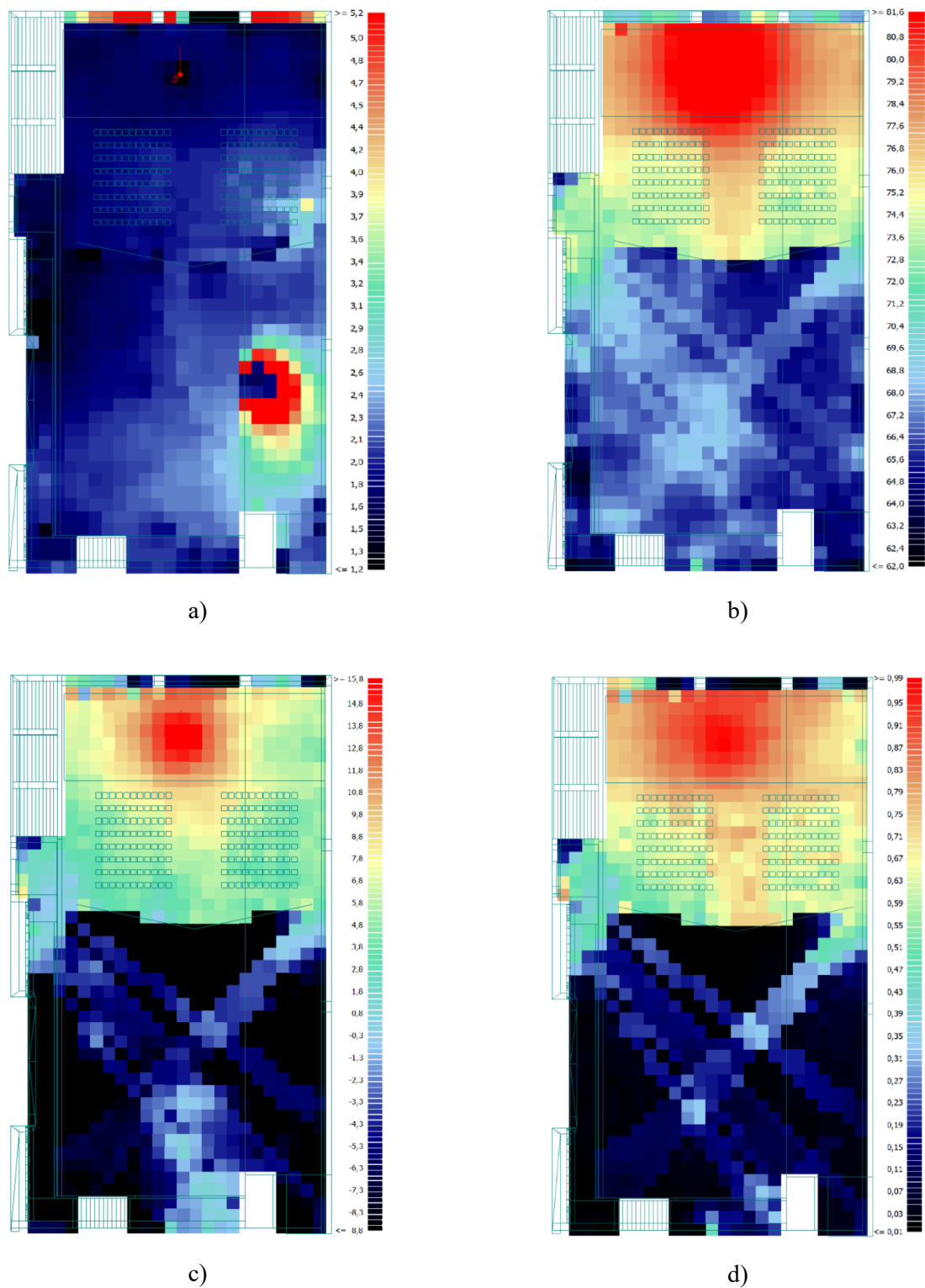


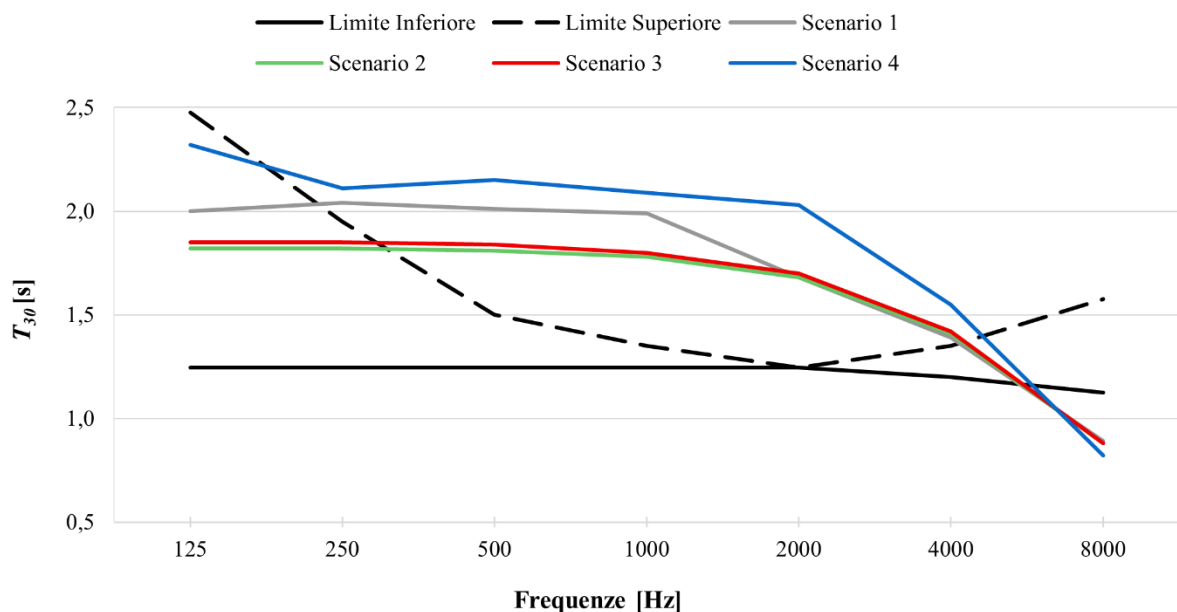
Figura 2.22 – Mappe acustiche ottenute tramite *receiver grid* nel quarto scenario della corte interna dell'ex Istituto Nicolò Tommaseo:
a) distribuzione del tempo di riverbero T_{30} ,
b) distribuzione del livello sonoro $SPL(A)$,
c) distribuzione della chiarezza musicale C_{80} ,
d) distribuzione della definizione D_{50} .

L'andamento del T_{30} in funzione della frequenza è stato valutato per le quattro configurazioni simulate della corte dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo (stato attuale, sedute poco assorbenti, sedute molto assorbenti, sedute molto assorbenti con pannelli riflettenti), analizzando le bande comprese tra 125 e 8000 Hz. La Tabella 2.10 riporta i valori di T_{30} nelle bande d'ottava comprese tra 125 Hz e 8000 Hz calcolati dal modello ODEON per ciascuno scenario della corte dell'ex Istituto Tommaseo.

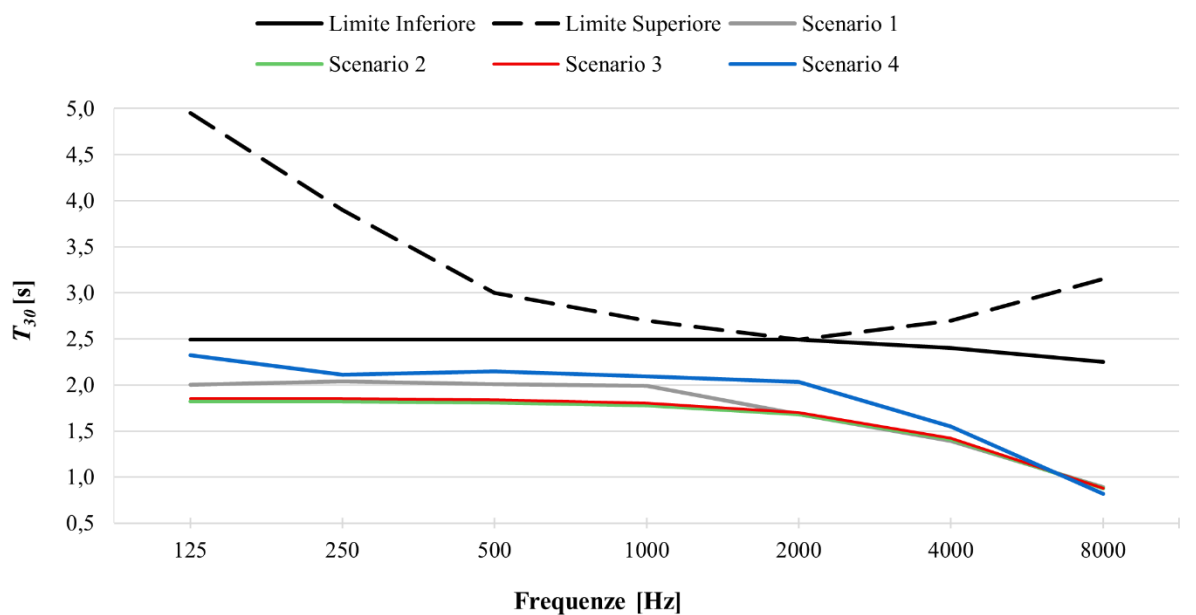
Tabella 2.10 – Valori di T_{30} espressi in secondi nelle bande d'ottava comprese tra 125 Hz e 8000 Hz per i quattro scenari analizzati della corte dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo.

Scenario	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
1	2.00	2.04	2.01	1.99	1.68	1.39	0.89
2	1.82	1.82	1.81	1.78	1.68	1.41	0.88
3	1.85	1.85	1.84	1.80	1.70	1.42	0.88
4	2.32	2.11	2.15	2.09	2.03	1.55	0.82

I grafici riportati nelle Figure 2.23a e 2.23b mostrano il confronto tra il tempo di riverbero T_{30} , espresso in secondi, relativo ai quattro scenari simulati per la corte dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo e gli intervalli ottimali presenti in letteratura per sale da concerto di grande volume di circa 50000 m³, distinti per parlato (Figura 2.23a) e musica (Figura 2.23b) nelle bande di frequenza comprese tra 125 e 8000 Hz. I riferimenti ottimali sono rappresentati da quattro curve limite, due per il parlato e due per la musica, rispettivamente valori massimi e minimi, utilizzate come criterio prestazionale superiore per valutare quanto ciascuna configurazione della corte si discosti dal comportamento acustico tipico di ambienti progettati per un uso professionale.



a)



b)

Figura 2.23 – Confronto tra i valori del tempo di riverbero T_{30} dei quattro scenari simulati della corte dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo e gli intervalli ottimali per il parlato (a) e musica (b) relativi a sale chiuse di grande volume nelle bande da 125 a 8000 Hz.

Nel grafico relativo al parlato, Figura 2.23a, le due curve di riferimento per una sala chiusa di circa 50000 m³ delimitano il campo dei valori ritenuti ottimali per ambienti chiusi concepiti per il parlato, e sono utilizzati qui esclusivamente come riferimento comparativo, consapevoli della diversa natura semiaperta del chiostro dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo.

Nel primo scenario, privo di sedute, il tempo di riverbero risulta sistematicamente superiore ai valori ottimali per il parlato lungo quasi tutto lo spettro di frequenze. Solo oltre i 4000 Hz la curva inizia a diminuire sensibilmente, collocandosi al di sotto del limite minimo a 8000 Hz. L'andamento conferma un comportamento eccessivamente riverberante, poco compatibile con esigenze di intelligibilità.

L'introduzione delle sedute non assorbenti produce una riduzione pressoché uniforme del T_{30} , rendendo la risposta acustica più controllata rispetto allo stato attuale. Nonostante ciò, i valori rimangono costantemente al di sopra del limite massimo ottimale fino a 4000 Hz, mostrando solo un avvicinamento parziale al *range* di riferimento. Alle alte frequenze si osserva nuovamente una discesa sotto il limite minimo, con un valore di 0,88 s a 8000 Hz. Lo scenario rappresenta un miglioramento, ma non sufficiente ad allineare il comportamento del chiostro ai target richiesti per il parlato.

La configurazione con sedute altamente assorbenti mostra un andamento molto simile allo scenario precedente: il T_{30} si riduce leggermente alle medie frequenze, ma permane superiore ai valori ottimali e continua a scendere al di sotto del limite minimo a 8000 Hz. Anche in questo caso si

conferma la tendenza del chiostro a un decadimento troppo rapido alle alte frequenze, dovuto alla dispersione verso l'apertura zenitale.

Lo scenario con sedute altamente assorbenti e pannelli riflettenti presenta valori di T_{30} più alti in tutte le bande rispetto alle configurazioni precedenti, con valori compresi tra 2,32 e 2,03 s tra 125 e 2000 Hz. Questa configurazione risulta quindi meno favorevole per il parlato: i pannelli incrementano la componente precoce e migliorano la chiarezza, ma non contribuiscono alla riduzione del tempo di riverbero generale della corte, che aumenta in modo consistente lungo l'intero spettro. Anche qui solo la banda a 8000 Hz presenta un valore inferiore al limite minimo. L'andamento complessivo conferma che, pur utili per altri parametri, i pannelli non apportano benefici al controllo del decadimento per applicazioni basate sul parlato.

Nel caso della musica, come mostrato in Figura 2.23b, i valori ottimali di riferimento per sale chiuse di grande volume risultano nettamente più elevati rispetto a quelli del parlato: alle basse frequenze i tempi di riverbero superano i 4 s, mentre alle alte frequenze rimangono comunque superiori ai 2 s. Ciò indica che un ambiente realmente idoneo alle esecuzioni musicali richiede un decadimento molto più lungo e sostenuto, caratterizzato da una persistenza energetica che i chiostri semiaperti non possono fisicamente garantire.

Le curve relative alla corte dell'ex Istituto Tommaseo mostrano un comportamento acustico chiaramente distante da tali condizioni. Lo scenario privo di sedute risulta sistematicamente al di sotto dell'intervallo di riferimento, evidenziando un decadimento troppo rapido per essere compatibile con un'acustica musicale adeguata. L'introduzione delle sedute, sia poco sia molto assorbenti, riduce ulteriormente i tempi di riverbero, accentuando la distanza dai valori richiesti per la musica e confermando la natura fortemente dissipativa dello spazio. L'unica configurazione che manifesta un parziale avvicinamento al *range* di riferimento è quella con sedute assorbenti e pannelli riflettenti: l'incremento dell'energia precoce e delle riflessioni dirette determina un lieve aumento del T_{30} rispetto agli altri scenari. Tuttavia, la curva rimane sempre al di sotto dei limiti minimi ottimali e non intercetta in alcuna banda le curve di riferimento. L'analisi complessiva conferma quindi l'impossibilità strutturale della corte di raggiungere tempi di riverbero compatibili con esecuzioni musicali che richiedano una risposta più prolungata e sostenuta.

L'analisi congiunta delle curve in frequenza e delle mappe numeriche dei parametri simulati nei quattro scenari della corte dell'ex Istituto Tommaseo evidenzia un comportamento acustico profondamente influenzato dalla natura semiaperta del volume, dalla totale assenza di confinamento superiore e dalla geometria allungata della corte. È importante sottolineare che il confronto con i valori ottimali di riferimento per sale chiuse di grande volume, di circa 50000 m³, riguarda il comportamento complessivo dell'intera corte, mentre l'interesse progettuale primario è rivolto alle

postazioni di ascolto, cioè alla platea, tuttavia, l'andamento globale fornisce un quadro utile per interpretare i limiti strutturali dell'ambiente.

La configurazione senza sedute presenta valori di T_{30} superiori ai limiti ritenuti idonei per il parlato fino a 4000 Hz e sistematicamente inferiori a quelli richiesti per la musica in tutto il *range* di frequenze. Le *receiver grid* confermano una forte eterogeneità spaziale: le zone prossime alla sorgente evidenziano livelli più elevati e un campo non controllato, mentre ampie porzioni laterali e posteriori presentano $SPL(A)$, C_{80} e D_{50} molto ridotti. La dispersione verso l'apertura zenitale domina il comportamento acustico, generando un decadimento tardivo poco controllato e una componente precoce insufficiente. Nel complesso, la condizione attuale non risulta adeguata né per il parlato né per performance che richiedano intelligibilità e stabilità percettiva.

L'introduzione di sedute non assorbenti riduce il T_{30} su tutto il *range* di frequenze, con un valore di 1,78 s a 1000 Hz rispetto ai 1,99 s dello scenario attuale. La diminuzione è più evidente nella platea, mentre le aree laterali e posteriori mantengono irregolarità significative. Anche $SPL(A)$ mostra un leggero riequilibrio, e i parametri C_{80} e D_{50} migliorano nelle file centrali grazie a una maggiore energia precoce. Pur rappresentando un primo passo verso una configurazione più controllata, questa soluzione resta lontana dai valori ottimali del parlato, mantenendo criticità diffuse e tempi ancora eccessivi.

Le sedute ad alta assorbenza non modificano sostanzialmente il T_{30} dell'intera corte, che a 1000 Hz rimane intorno a 1,80 s, ma migliorano la regolarità del campo nella platea. Le mappe mostrano un incremento della chiarezza nelle posizioni centrali e anteriori e una crescita del parametro D_{50} , segnale di una migliore definizione del segnale diretto. Tuttavia, la natura semiaperta dello spazio limita l'efficacia complessiva: il decadimento globale resta elevato e le zone perimetrali continuano a presentare carenza energetica e scarsa qualità percettiva. Il terzo scenario migliora la fruibilità nelle posizioni di ascolto, senza però modificare in modo decisivo il comportamento dell'intero ambiente.

Nell'ultimo scenario vengono introdotte tre superfici riflettenti, una barriera verticale dietro la sorgente, un pannello concavo orientato verso la platea e un pannello orizzontale posto sopra il palco, con l'obiettivo di incrementare l'energia precoce. Il T_{30} medio globale a 1000 Hz cresce rispetto allo scenario precedente, ma l'aumento è marginale. L'effetto più significativo riguarda invece la platea: si osserva un miglioramento netto dei parametri C_{80} e D_{50} nella parte centrale e, soprattutto, nelle file arretrate, dove negli scenari precedenti la chiarezza risultava insufficiente. Anche la distribuzione dello $SPL(A)$ diventa più regolare, con una copertura energetica più uniforme nelle posizioni distanti dalla sorgente. Il quarto scenario si configura quindi come la soluzione più efficace per la platea, capace di offrire un campo sonoro più omogeneo, maggiore chiarezza e una distribuzione più prevedibile del segnale diretto. Persistono tuttavia i limiti strutturali dello spazio, dovuti alla

dispersione verticale, e il T_{30} complessivo rimane superiore ai valori richiesti per un parlato pienamente intelligibile.

In conclusione, tutti gli scenari analizzati presentano tempi di riverbero complessivi troppo bassi in tutte le frequenze studiate rispetto al *range* ottimale richiesto per la musica. La morfologia aperta della corte impedisce strutturalmente il raggiungimento di tali condizioni, rendendo l'ex Tommaseo non idoneo per performance musicali che richiedano un decadimento lungo e sostenuto. Per il parlato, invece, le configurazioni con sedute altamente assorbenti, corrispondenti al terzo e al quarto scenario, rappresentano le soluzioni che più si avvicinano al comportamento desiderabile. Pur avvicinandosi ai limiti ottimali globali, il T_{30} della corte risulta influenzato dalle aree perimetrali e dalla parte non occupata dalle sedute. All'interno della platea, che costituisce la reale zona di fruizione, i parametri di chiarezza C_{80} e di definizione D_{50} mostrano incrementi consistenti negli scenari con maggiore assorbimento e con l'aggiunta dei pannelli riflettenti, permettendo di ottenere condizioni acustiche compatibili con la comprensione del parlato. La corte dell'ex Istituto Tommaseo, pur rimanendo vincolata alla dispersione energetica dovuta all'apertura zenitale, mostra un miglioramento progressivo al crescere dell'assorbimento e della diffusione introdotti. Lo scenario privo di sedute risulta complessivamente inadeguato, l'inserimento di sedute non assorbenti produce un primo miglioramento, le sedute ad alta assorbenza rafforzano in modo significativo la chiarezza e la definizione mentre la combinazione di sedute assorbenti e pannelli riflettenti costituisce infine la configurazione più equilibrata e performante per la platea. In sintesi, la corte dell'ex Istituto Tommaseo può essere ottimizzata per eventi basati sul parlato e su attività performative non musicali, mentre rimane strutturalmente inadatta a ospitare musica riverberante, come confermato sia dalle curve in frequenza sia dalle mappe numeriche prodotte dal modello acustico.

3 METAMATERIALI FONOASSORBENTI PER L'OTTIMIZZAZIONE ACUSTICA

3.1 Panorama applicativo e principi di funzionamento

3.1.1 Origini e contesto applicativo

Il concetto di metamateriale (AMM) nasce originariamente nell'ambito dell'elettromagnetismo, per poi essere adattato all'acustica negli anni successivi. Il termine "metamateriale" si riferisce a strutture artificiali progettate per ottenere proprietà fisiche non osservabili nei materiali naturali, come la densità di massa negativa o il modulo di comprimibilità negativo⁶⁷. Un fondamentale contributo per gli studi acustici avviene con i lavori di Liu et al.⁶⁸, che dimostrarono per la prima volta la possibilità di realizzare un materiale acustico con densità di massa negativa tramite risonatori incorporati in una matrice rigida. Questo risultato rappresentò un punto di svolta perché mostrò in modo sperimentale che l'introduzione di microstrutture risonanti all'interno di un mezzo rigido può modificare profondamente la risposta dinamica del sistema, generando un comportamento macroscopico del tutto inedito rispetto ai materiali convenzionali. Tale evidenza aprì la strada a una nuova stagione di ricerche dedicate a controllare il suono attraverso la progettazione geometrica, piuttosto che attraverso la sola scelta dei materiali. Da quel momento, la ricerca si è orientata verso la progettazione di sistemi capaci di manipolare la propagazione del suono in modo innovativo, anche in condizioni di spazio limitato. Tra i principali sviluppi, si annoverano AMM a risonanza locale e i sistemi con canali tortuosi, che sfruttano meccanismi risonanti per introdurre discontinuità dinamiche, generando bande proibite (*bandgaps*) o picchi di assorbimento localizzati in specifiche frequenze⁶⁹. Tali configurazioni operano efficacemente in regime *sub-wavelength*, cioè a dimensioni inferiori rispetto alla lunghezza d'onda del suono da assorbire⁷⁰.

Il progresso della modellazione analitica, con metodi come la matrice di trasferimento, unito alla diffusione di strumenti FEM, hanno reso possibile la progettazione sempre più accurata di

⁶⁷ Cfr. Steven A. Cummer, Johan Christensen e Andrea Alù, "Controlling Sound with Acoustic Metamaterials", «Nature Reviews Materials», vol. 1, n. 3, marzo 2016, p. 16001.

⁶⁸ Cfr. Zhengyou Liu, Xiaogang Zhang, Yiwei Mao, Y. Y. Zhu, Zhen Yang, C. T. Chan e Ping Sheng, "Locally Resonant Sonic Materials", «Science», vol. 289, n. 5485, settembre 2000, pp. 1734–1736.

⁶⁹ Cfr. Nicholas Fang, Dongjuan Xi, Jianhong Xu, Manos Ambati, Wanchun Srituravanich, Chunguang Sun e Xiang Zhang, "Ultrasonic Metamaterials with Negative Modulus", «Nature Materials», vol. 5, n. 6, giugno 2006, pp. 452–456.

⁷⁰ Cfr. Jun Mei, Guancong Ma, Meng Yang, Zhen Yang, Weijia Wen e Ping Sheng, "Dark Acoustic Metamaterials as Super Absorbers for Low-Frequency Sound", «Nature Communications», vol. 3, gennaio 2012, p. 756.

metamateriali sofisticati⁷¹. La capacità di prevedere numericamente il comportamento risonante, prima ancora della realizzazione fisica, ha permesso di ottimizzare forme, dimensioni e configurazioni in modo sistematico, riducendo tempi e costi sperimentali. In parallelo, la diffusione della stampa 3D ha consentito la realizzazione sperimentale di strutture complesse con alta ripetibilità geometrica. Questo ha portato allo sviluppo di numerosi prototipi destinati ad uso architettonico, ambienti confinati o installazioni temporanee.

Tale evoluzione tecnologica trova pieno riscontro nelle esigenze contemporanee dei contesti culturali e performativi, dove alla qualità sonora si affiancano vincoli di natura storica, funzionale ed estetica. Ambienti come teatri, studi di registrazione, chioschi e spazi espositivi, in particolare se aperti o semi-aperti, pongono sfide significative in termini di assorbimento acustico e controllo del riverbero, soprattutto alle basse frequenze.

In questi scenari, le soluzioni tradizionali come pannelli porosi o sistemi multistrato si rivelano spesso inadatte, sia per l'elevato spessore richiesto a bassa frequenza, sia per l'impatto visivo e strutturale che può compromettere il valore architettonico degli spazi⁷². Di fronte a queste criticità, gli AMM emergono come una tecnologia efficace, grazie alla loro capacità di ottenere attenuazioni acustiche selettive a profondità ridotte. In particolare, strutture come i risonatori di Helmholtz modificati e sistemi labirintici e tortuosi⁷³ garantiscono ottime prestazioni nella regione delle basse frequenze, garantendo al contempo dimensioni compatte e la possibilità di essere facilmente integrati, anche in modo modulare, nelle superfici architettoniche esistenti⁷⁴.

L'obiettivo di questo capitolo, in linea con quanto emerso nella letteratura recente, è quindi quello di progettare e testare un metamateriale fonoassorbente con una geometria ottimizzata per operare a bassa frequenza e adatto ad applicazioni nei contesti culturali e performativi come teatri, chioschi e installazioni sonore, rispettandone al contempo le esigenze di sostenibilità, reversibilità e compatibilità estetica.

⁷¹ Cfr. Sung Hoon Lee, Chul Min Park, Yong Moon Seo, Zi Gao Wang e Chul Kyu Kim, "Composite Acoustic Medium with Simultaneously Negative Density and Modulus", «Physical Review Letters», vol. 104, n. 5, febbraio 2010, p. 054301.

⁷² Cfr. Filipe Almeida, Jaime Ramis, Luís Godinho e Pedro Amado-Mendes, "Low-Frequency Sound Absorption of a Metamaterial with Symmetrical-Coiled-Up Spaces", «Applied Acoustics», vol. 172, gennaio 2021, p. 107636.

⁷³ Cfr. José A. Carbajo, Jaime Ramis e Luís Godinho, "Multi-Layer Perforated Panel Absorbers with Oblique Perforations", «Applied Physics Letters», vol. 117, n. 18, novembre 2020.

⁷⁴ Cfr. Dah-You Maa, "Potential of Microperforated Panel Absorber", «Journal of the Acoustical Society of America», vol. 104, n. 5, novembre 1998, pp. 2861–2866.

3.1.2 Meccanismi fisici fondamentali

I metamateriali acustici si distinguono dai materiali tradizionali per la possibilità di ottenere proprietà fisiche effettive non convenzionali, come densità di massa (ρ) o modulo di comprimibilità negativi (K), non accessibili attraverso la sola composizione del materiale. Nei materiali convenzionali, tali parametri sono sempre positivi, e la propagazione delle onde sonore avviene secondo i modelli classici dell'acustica lineare. Negli AMM, invece, è la geometria della struttura *sub-wavelength* a determinare una risposta macroscopica non convenzionale. In tali materiali, grazie alla presenza di microstrutture risonanti, è possibile ottenere parametri effettivi negativi in intervalli ristretti di frequenza, condizione che apre a fenomeni non lineari come l'inversione di fase e l'assorbimento selettivo⁷⁵.

Un tipico esempio del funzionamento dei metamateriali è rappresentato dal risonatore di Helmholtz (Figura 3.1a), la cui configurazione può essere ricondotta a un sistema meccanico massa-molla a un grado di libertà (Figura 3.1b). Il risonatore di Helmholtz è una cavità chiusa dotata di un collo sottile, assimilabile a una bottiglia con un'apertura stretta rispetto al volume del corpo. Perché il modello sia valido, deve valere la condizione $V \gg Al$, dove V è il volume della cavità, A la sezione del collo e l la sua lunghezza.

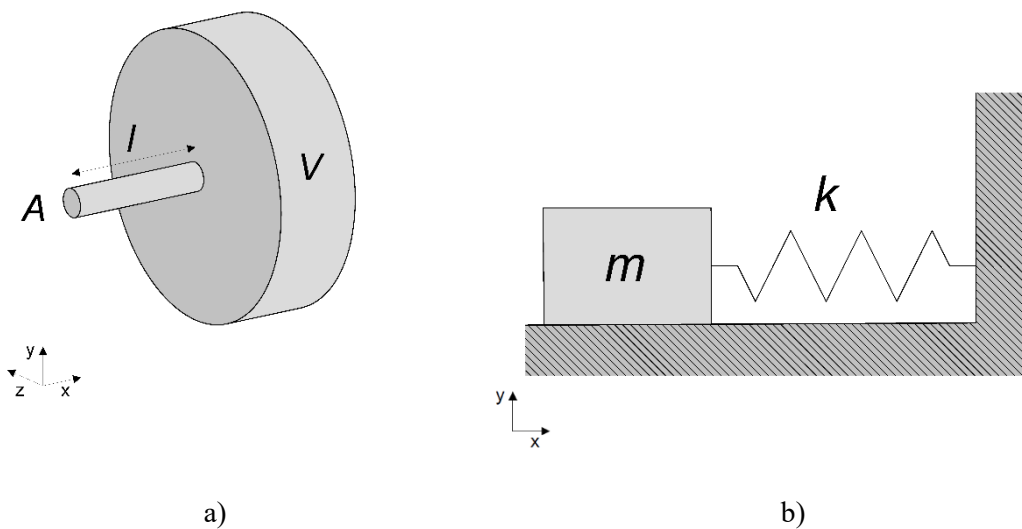


Figura 3.1 – a) Modello semplificato di un risonatore di Helmholtz con cavità e collo; b) Analogia con sistema equivalente massa-molla a un grado di libertà.

⁷⁵ Cfr. Vicente Romero-García, Georgios Theocharis, Olivier Richoux, André Merkel, Vincent Tournat e Vincent Pagneux, “Perfect and Broadband Acoustic Absorption by Critically Coupled Sub-Wavelength Resonators”, «Scientific Reports», vol. 6, gennaio 2016, p. 19519.

L'Equazione 3.1 descrive il moto elastico di un sistema massa-molla:

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (3.1)$$

dove:

- m : massa effettiva dell'elemento risonante,
- k : costante elastica,
- $F(t)$: forza applicata,
- $x(t)$: spostamento nel tempo.

In modo analogo, l'aria contenuta nel collo del risonatore di Helmholtz si comporta come una massa oscillante, mentre l'aria nel volume della cavità agisce come una molla comprimibile.

La frequenza di risonanza del sistema è descritta dall'Equazione 3.2⁷⁶:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{Vl}} \quad (3.2)$$

dove:

- c : velocità del suono nel mezzo,
- A : sezione del collo,
- V : volume della cavità,
- l : lunghezza del collo.

Nel contesto dei metamateriali acustici (AMM), il concetto di densità di massa effettiva $\rho_{eff}(\omega)$ costituisce uno degli elementi fondamentali per la comprensione dei fenomeni che governano il loro comportamento acustico. A differenza dei materiali convenzionali, in cui la densità rappresenta un parametro statico definito dal rapporto tra massa e volume reale, nei metamateriali essa assume un significato dinamico e frequenza-dipendente, descrivendo la risposta collettiva della struttura nel suo complesso quando viene investita da un campo acustico incidente. In questi sistemi, la distribuzione di massa e rigidità non è uniforme ma periodica, e tale periodicità induce effetti di inerzia anomala e di accoppiamento locale che modificano profondamente la propagazione delle onde.

⁷⁶ Cfr. Chao Cai e Cheuk Ming Mak, "Noise Attenuation Capacity of a Helmholtz Resonator", «Advances in Engineering Software», vol. 116, marzo 2018, pp. 60–66, disponibile su <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.12.003>.

La $\rho_{eff}(\omega)$ può assumere valori negativi in corrispondenza di specifiche frequenze legate alla risonanza locale di elementi strutturali come cavità con colli di risonanza o sistemi massa-molla. In queste condizioni, la massa apparente si comporta come se oscillasse in opposizione di fase rispetto alla forza di eccitazione esterna, generando un comportamento dinamico controintuitivo che si traduce in fenomeni di attenuazione e riflessione anomala delle onde sonore.

La densità di massa effettiva, che esprime il comportamento globale del metamateriale in funzione della frequenza, assume la forma⁷⁷:

$$\rho_{eff}(\omega) = \frac{p}{c^2} \left(1 - F + \frac{F\omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + j\omega\gamma} \right) \quad (3.3)$$

dove:

p : pressione statica,

F : fattore di riempimento, definito come $F = V_{risonatore}/V_{cella}$, che rappresenta il rapporto tra il volume del risonatore e il volume totale della cella unitaria geometrica,

ω_0 : frequenza di risonanza del sistema,

j : unità immaginaria,

γ : fattore di smorzamento legato alle perdite viscosse e termiche,

ω : pulsazione dell'onda incidente ($\omega = 2\pi f$).

La parte reale di $\rho_{eff}(\omega)$ può diventare negativa in corrispondenza di un intervallo spettrale attorno alla frequenza di risonanza ω_0 , in particolare per $\omega_0 < \omega < \omega_0\sqrt{1+F}$. In quel regime, l'opposizione di fase tra pressione e velocità causa una risposta inerziale non lineare in cui la densità di massa effettiva è negativa e l'accelerazione del sistema è opposta alla pressione, con la formazione di un *bandgap* acustico di frequenze in cui l'onda viene fortemente riflessa o attenuata. L'ampiezza e la profondità di questo effetto dipendono dalla geometria del risonatore e dal termine γ , che rappresenta il contributo dissipativo complessivo del sistema, includendo le perdite viscosse e termiche che si verificano sia nel collo che nella cavità del risonatore. Tali perdite smorzano la risonanza, influenzano l'ampiezza e la larghezza della banda in cui si manifesta l'effetto. Un valore elevato di γ comporta una risposta più smorzata, mentre un valore basso corrisponde a una risonanza più marcata e selettiva⁷⁸.

⁷⁷ Cfr. Xia Jing, Yanhua Meng e Xiaodong Sun, "Soft Resonator of Omnidirectional Resonance for Acoustic Metamaterials with a Negative Bulk Modulus", «Scientific Reports», vol. 5, ottobre 2015, p. 15377.

⁷⁸ Cfr. Guancong Ma e Ping Sheng, "Acoustic Metamaterials: From Local Resonances to Broad Horizons", «Science Advances», vol. 2, n. 2, febbraio 2016, p. e1501595.

Un comportamento analogo può verificarsi per il modulo di comprimibilità effettivo $K_{eff}(\omega)$, che descrive la relazione tra variazioni di pressione e cambiamenti di volume all'interno del metamateriale, in prossimità della frequenza di risonanza. In presenza di cavità risonanti o sistemi con canali labirintici, si può osservare una fase invertita tra pressione e volume, tale per cui l'aumento di pressione genera un aumento di volume, in contrasto con la risposta nei materiali convenzionali. Questa risposta atipica può essere modellata tramite una funzione in frequenza, in cui il modulo effettivo dipende dalla frequenza del segnale incidente.

Si può scrivere una formulazione del modulo di comprimibilità effettivo nella forma⁷⁹:

$$\frac{1}{K_{eff}(\omega)} = \frac{1}{K_0} \left(1 - \frac{F\omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + j\omega\gamma} \right) \quad (3.4)$$

dove:

K_0 ; modulo di comprimibilità del mezzo.

In prossimità della frequenza ω_0 , il modulo $K_{eff}(\omega)$ può assumere valori negativi, riflettendo un comportamento anomalo del sistema, che si traduce in un'accelerazione del fluido nella direzione opposta rispetto alla variazione di pressione⁸⁰. Anche in questo caso, l'effetto si manifesta all'interno di specifiche bande spettrali, contribuendo alla creazione di *bandgap* acustici e all'assorbimento selettivo di frequenze indesiderate.

Nel contesto applicativo del presente lavoro, l'esplorazione di configurazioni geometriche complesse, può favorire condizioni per cui $K_{eff}(\omega) < 0$, amplificando l'effetto di assorbimento alle basse frequenze. Tali condizioni offrono un ulteriore grado di libertà progettuale nella realizzazione di AMM ad alte prestazioni e spessori ridotti.

⁷⁹ Cfr. Frank Langfeldt, Henrik Hoppen e Wolfgang Gleine, "Broadband Low-Frequency Sound Transmission Loss Improvement of Double Walls with Helmholtz Resonators", «Journal of Sound and Vibration», vol. 476, settembre 2020, p. 115309, disponibile su <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115309>.

⁸⁰ Cfr. Sung Hoon Lee e Oliver B. Wright, "Origin of Negative Density and Modulus in Acoustic Metamaterials", «Physical Review B», vol. 93, gennaio 2016, p. 024302, disponibile su <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.024302>.

3.2 Metodologia e progettazione del metamateriale

3.2.1 Motivazioni e obiettivi progettuali

I risonatori acustici convenzionali, ampiamente impiegati nel controllo del rumore e nel trattamento acustico di ambienti architettonici, si basano tipicamente sulla configurazione canonica del risonatore di Helmholtz. Tale struttura prevede un pannello rigido forato, in cui ciascun foro (il “collo”) è generalmente un segmento rettilineo perpendicolare alla superficie, connesso a una cavità retrostante. Il meccanismo di assorbimento è fondato sul principio della risonanza: le oscillazioni dell’aria intrappolata nel collo, accoppiate alla compressibilità dell’aria nella cavità, determinano un picco di assorbimento in corrispondenza di una specifica frequenza. A questo comportamento si sommano le perdite viscoso e termiche che si sviluppano all’interno del collo e, in misura minore, nella cavità, e che contribuiscono in modo significativo all’attenuazione del suono⁸¹.

Sebbene questi dispositivi siano efficaci per attenuare componenti sonore risonanti, presentano una serie di limiti strutturali e funzionali. In particolare, l’assorbimento efficiente di basse frequenze impone dimensioni significative della cavità e/o del pannello, poiché la frequenza di risonanza risulta inversamente proporzionale alla lunghezza del collo e al volume della cavità (Equazione 3.2). Ciò rende problematica l’implementazione in contesti compatti, dove vincoli architettonici o estetici impongono soluzioni a basso spessore. Inoltre, l’efficacia di questi dispositivi può risultare fortemente limitata in bande strette, richiedendo eventualmente l’accoppiamento di più unità con caratteristiche geometriche differenti per ottenere una risposta su un intervallo di frequenze più ampio. Anche la variazione dei parametri geometrici (come la diminuzione del diametro del foro o la porosità complessiva) comporta compromessi progettuali tra prestazione acustica e requisiti costruttivi.

Per queste ragioni, risulta opportuno esplorare nuove configurazioni geometriche che consentano di ottimizzare l’assorbimento a bassa frequenza senza aumentare l’ingombro del sistema, aprendo la strada a dispositivi acustici innovativi adatti a installazioni leggere, modulari e integrabili in ambienti esistenti.

Negli ultimi anni, numerosi studi hanno cercato di superare i limiti intrinseci dei risonatori acustici convenzionali proponendo configurazioni geometriche alternative, in grado di migliorare le prestazioni di assorbimento alle basse frequenze senza aumentare lo spessore complessivo del sistema. In particolare, un filone di ricerca ha dimostrato come l’inclinazione delle perforazioni

⁸¹ Cfr. Paolo Ruggeri, Francesco Peron, Nicola Granzotto e Paolo Bonfiglio, “Analisi sperimentale parametrica sull’assorbimento acustico di risonatori acustici a cavità”, in *Proceedings of the 41st National Conference of the Italian Acoustical Association (AIA)*, Pisa, 2014.

rispetto alla superficie di incidenza acustica possa modificare significativamente il comportamento risonante della cella, abbassando la frequenza di picco e incrementando l'attenuazione sonora in specifici range di frequenza⁸². Queste configurazioni, pur mantenendo invariato lo spessore geometrico del dispositivo, riescono a simulare il comportamento di strutture più profonde, ottimizzando l'impedenza acustica dell'intero sistema.

Questi approcci costituiscono il punto di partenza concettuale per la presente ricerca. Tuttavia, mentre i lavori precedenti si sono focalizzati principalmente su perforazioni rettilinee inclinate, il progetto sviluppato in questa tesi propone un'evoluzione geometrica ulteriore, in cui il collo viene suddiviso in due segmenti inclinati tra loro, formando una struttura spezzata. Tale configurazione introduce nuove variabili di controllo progettuale, rappresentate dagli angoli indipendenti θ_1 e θ_2 , permettendo di modulare con precisione le frequenze di risonanza assorbite. L'aumento della lunghezza effettiva del collo, derivante dalla geometria spezzata, amplifica inoltre le perdite viscoso e termiche lungo il percorso dell'onda, migliorando così l'efficacia complessiva dell'assorbimento, anche in funzione di specifiche esigenze applicative.

3.2.2 Configurazione geometrica

La configurazione proposta è caratterizzata da una cavità risonante cilindrica e da un foro passante diviso in due segmenti inclinati, ciascuno con lunghezza e inclinazione variabile. I parametri geometrici fondamentali sono:

r : raggio della perforazione

L : spessore complessivo del campione,

D : profondità della cavità interna,

R_c : raggio interno della cavità,

R_w : raggio interno del tubo di impedenza,

θ_1, θ_2 : angoli di inclinazione rispettivamente del primo e secondo segmento del collo,

L_1, L_2 : lunghezze lineari dei due segmenti,

d_1, d_2 : lunghezze effettive dei due segmenti, tenendo conto della loro inclinazione rispetto all'asse normale.

La lunghezza totale L del sistema è suddivisa tra i due tratti (L_1 e L_2) secondo le relazioni descritte dalle Equazioni 3.5 e 3.6:

⁸² Cfr. José Carbajo, S. Ghaffari Mosanenzadeh, Seong Kim e Nicholas X. Fang, "Sound Absorption of Acoustic Resonators with Oblique Perforations", «Applied Physics Letters», vol. 116, n. 5, febbraio 2020, p. 054101.

$$L_1 = \frac{L}{\frac{\tan(\theta_1)}{\tan(\theta_2)} + 1} \frac{\tan(\theta_1)}{\tan(\theta_2)} \quad (3.5)$$

$$L_2 = \frac{L}{\frac{\tan(\theta_2)}{\tan(\theta_1)} + 1} \frac{\tan(\theta_2)}{\tan(\theta_1)} \quad (3.6)$$

Le lunghezze effettive dei due segmenti, ovvero le lunghezze reali del percorso acustico considerando l'inclinazione (d_1 e d_2), sono descritte dalle Equazioni 3.7 e 3.8:

$$d_1 = \frac{L \cos(\theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad (3.7)$$

$$d_2 = \frac{L \cos(\theta_1)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad (3.8)$$

Questa geometria permette di modificare selettivamente la lunghezza effettiva del collo acustico agendo su due gradi di libertà indipendenti (θ_1 , θ_2 , dove $0^\circ < \theta_i < 90^\circ$ con $i=1,2$), pur mantenendo costante lo spessore complessivo L . Ciò permette di ottimizzare l'assorbimento a bassa frequenza senza aumentare l'ingombro del pannello, rendendo il sistema compatibile con applicazioni a spessore ridotto. Inoltre, la scelta degli angoli incide direttamente sulla frequenza e l'ampiezza del *bandgap* di assorbimento, offrendo un controllo mirato sulle prestazioni acustiche del dispositivo. Le relazioni geometriche tra i parametri sono illustrate nella Figura 3.2, che rappresenta in sezione la cella unitaria considerata.

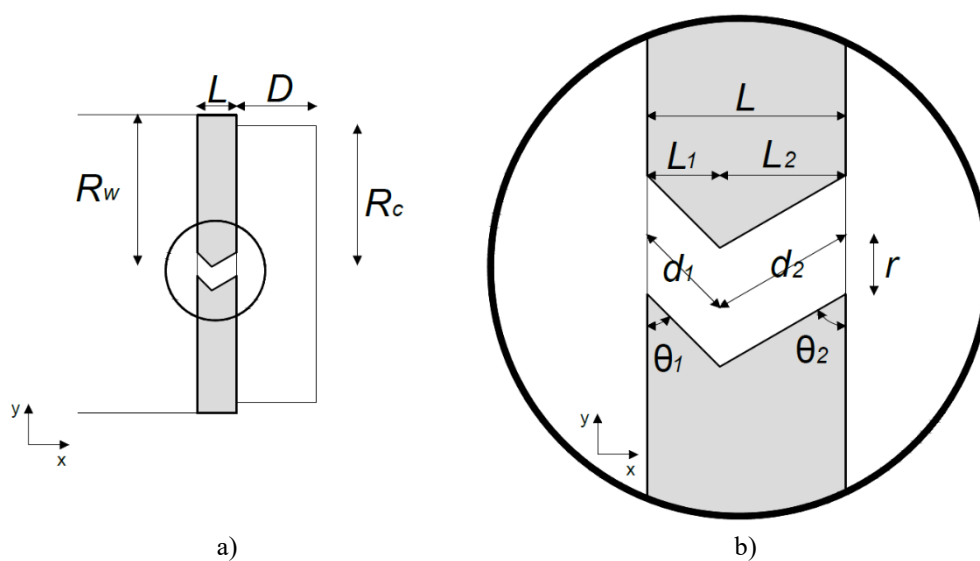


Figura 3.2 – a) Sezione trasversale della cella unitaria del risonatore, con indicazione del tubo di impedenza e della cavità; b) Dettaglio del collo spezzato del risonatore con indicazioni dei parametri geometrici.

3.2.3 Modello analitico (TMM + JCA)

Per la previsione del comportamento acustico del metamateriale proposto, è stato adottato un approccio analitico basato sul metodo della matrice di trasferimento (Transfer Matrix Method, TMM)⁸³, che consente di descrivere la propagazione delle onde sonore all'interno di sistemi stratificati o con geometrie complesse. Il modello è stato implementato in MATLAB⁸⁴ e considera l'interazione dell'onda sonora incidente con la cella unitaria del sistema, assumendo condizioni di incidenza normale e campo acustico in regime stazionario monodimensionale lungo l'asse principale del tubo di impedenza.

Il metamateriale viene modellato come un sistema composto da tre sottosezioni acusticamente distinte:

1. il primo segmento inclinato del collo (con lunghezza effettiva d_1),
2. il secondo segmento inclinato (con lunghezza effettiva d_2),
3. la cavità posteriore risonante (con profondità D).

Ciascuna regione è trattata come un mezzo acusticamente omogeneo e lineare, caratterizzato da proprietà equivalenti secondo il modello a fluido equivalente descritto da Johnson-Champoux-Allard (JCA)⁸⁵. Questa formulazione consente di tenere conto degli effetti di perdite viscoso e termiche nei canali stretti del collo. I parametri di trasporto richiesti dal modello quali densità effettiva (ρ_{eff}), comprimibilità effettiva (K_{eff}) e tortuosità (α_∞) sono stimati analiticamente, basate dalle formulazioni di Atalla e Sgard⁸⁶.

Questa formulazione consente di caratterizzare l'impedenza acustica (Z) del metamateriale (AMM) studiato tramite la concatenazione delle tre matrici di propagazione associate ai tre domini considerati (primo segmento inclinato, secondo segmento inclinato e la cavità). La risposta in frequenza ottenuta consente di stimare il coefficiente di assorbimento acustico (α), che costituisce il principale parametro di interesse per la valutazione delle prestazioni acustiche del dispositivo.

⁸³ Cfr. Munjal M. L., *Acoustics of Ducts and Mufflers*, New York, Wiley, 2014.

⁸⁴ MathWorks, *MATLAB® (Versione R2023a)* [Software], The MathWorks Inc., Natick (MA), 2023, disponibile su <https://www.mathworks.com>.

⁸⁵ Cfr. Jean Allard e Noureddine Atalla, *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials*, New York, Wiley, 2009.

⁸⁶ Cfr. Noureddine Atalla e François Sgard, "Acoustic Modeling of Porous Materials", «Journal of Sound and Vibration», vol. 303, giugno 2007, pp. 195–208.

Il coefficiente di assorbimento è calcolato tramite l'Equazione 3.9:

$$\alpha = 1 - \left| \frac{T(1,1) - Z_0 T(2,1)/S_w}{T(1,1) + Z_0 T(2,1)/S_w} \right|^2 \quad (3.9)$$

dove:

$T=M_1M_2M_c$: matrice di trasferimento,

$Z_0=c\rho_0$: impedenza caratteristica dell'aria,

$S_w=\pi R_w^2$: sezione del tubo d'impedenza.

Con c velocità di propagazione dell'onda acustica e ρ_0 densità dell'aria. M_i (con $i=1,2$) sono le matrici che descrivono la propagazione dell'onda acustica rispettivamente attraverso il primo e il secondo segmento inclinato del collo del AMM:

$$M_i = \begin{bmatrix} \cos(k_i L_i) & j Z_i \sin(k_i L_i) \\ \frac{j}{Z_i} \sin(k_i L_i) & \cos(k_i L_i) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

dove:

$k_i=\omega(\rho_i/B_i)^{1/2}$: numero d'onda del primo e del secondo segmento,

$Z_i=\sqrt{\rho_i B_i}/\pi r^2$: impedenza caratteristica del primo e del secondo segmento.

La matrice M_c che descrive la propagazione dell'onda acustica attraverso la cavità del risonatore acustico è descritta dall'Equazione 3.11:

$$M_c = \begin{bmatrix} \cos(k_0 D) & j \frac{Z_0}{S_c} \sin(k_0 D) \\ \frac{j S_c}{Z_0} \sin(k_0 D) & \cos(k_0 D) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

dove:

$k_0=\omega/c_0$: numero d'onda dell'aria,

$S_c=\pi R_c^2$: sezione della cavità.

Di seguito vengono riportate le equazioni che permettono di calcolare i principali parametri richiesti dal modello JCA per ciascun segmento perforato: la densità equivalente ρ_i (3.12), la tortuosità geometrica α_{coi} (3.13), il termine correttivo G_i associato alle perdite viscoso e termiche (3.14), e la resistenza al flusso σ_i (3.15).

$$\rho_i = \rho_0 \alpha_{\infty i} \left(1 + \frac{\sigma_i \phi_i}{j \omega \rho_0 \alpha_{\infty i}} G_i \right) \quad (3.12)$$

$$\alpha_{\infty i} = \frac{1}{\sin^2(\theta_i)} + 2 \frac{\varepsilon_{ei}}{d_i} \quad (3.13)$$

$$G_i = \sqrt{1 + \frac{4j \alpha_{\infty i}^2 \rho_0 \omega}{\lambda^2 \sigma_i^2 \phi_i^2}} \quad (3.14)$$

$$\sigma_i = \frac{(2d_i/r) \sin^2(\theta_i) + 4}{d_i \phi_i} R_s + \frac{8\eta}{\phi_i \left(\frac{r}{2}\right)^2 \cos^2(\theta_i)} \quad (3.15)$$

dove:

$\Phi_1 = S/S_w$: porosità aperta del primo segmento, con $S = \pi r^2$,

$\Phi_2 = S/S = 1$: porosità aperta del secondo segmento, essendo uguali i raggi dei due segmenti,

$\varepsilon_{ei} = 0.85rF_{ei}$: parametro empirico, calcolato tramite la funzione empirica: $F_{ei} = 1 - 1.4092\xi_i + 0.33818\xi_i^3 + 0.06793\xi_i^5 - 0.02287\xi_i^6 + 0.03015\xi_i^7 - 0.01641\xi_i^8$, con $\xi_i = (\Phi_i)^{1/2}$ Fork function,

$\lambda = r/2$: lunghezza caratteristica viscosa e termica,

η : viscosità dinamica dell'aria,

$R_s = \frac{\sqrt{2\eta\rho_0\omega}}{2}$: componente empirica aggiuntiva della resistenza al flusso.

La compressibilità effettiva del primo e del secondo segmento è descritta dall'Equazione 3.16:

$$B_i = \frac{\gamma P_0}{\phi_i} [\gamma - (\gamma - 1)(1 - HG')^{-1}]^{-1} \quad (3.16)$$

dove:

γ : rapporto tra calore specifico a pressione costante C_p e a volume costante C_v dell'aria,

P_0 : pressione statica dell'aria,

$H = \frac{8\eta}{j\lambda^2 Pr \omega \rho_0}$: fattore di correzione termica,

$Pr = 0.71$: numero di Prandtl per l'aria,

$G' = \sqrt{1 + \frac{jPr\omega\rho_0\lambda^2}{16\eta}}$: fattore correttivo della diffusione termica.

3.2.4 Modello numerico (FEM)

In questa sezione viene illustrato nel dettaglio il modello numerico tridimensionale sviluppato per simulare il comportamento acustico del pannello metamateriale (AMM) completo, costituito da quattro celle unitarie a collo spezzato disposte in configurazione simmetrica. La simulazione è stata condotta mediante il metodo agli elementi finiti (FEM), in regime armonico stazionario, utilizzando il software COMSOL Multiphysics (versione 5.3) con il modulo *Pressure Acoustics, Frequency Domain*.⁸⁷ Tale approccio consente di risolvere con elevata precisione l'equazione delle onde acustiche in mezzi fluidi compressibili, includendo effetti di interazione tra campo sonoro e geometria complessa del sistema.

L'obiettivo principale di questo modello è quello di riprodurre numericamente l'esperimento condotto in tubo di impedenza, replicando in modo realistico le condizioni al contorno, le proprietà del mezzo e la disposizione geometrica del campione, al fine di calcolare il coefficiente di assorbimento acustico $\alpha(\omega)$ del pannello. I risultati numerici ottenuti sono stati poi confrontati con quelli sperimentali così da validare la coerenza complessiva del comportamento acustico del sistema.

A differenza del modello analitico, applicato alle singole celle unitarie, la simulazione FEM è mirata alla caratterizzazione del comportamento globale del pannello, considerando tutte le sue geometrie reali e l'interazione con le pareti confinanti del tubo.

Il calcolo del coefficiente di assorbimento è effettuato secondo la norma ISO 10534-2:1998⁸⁸ ("Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: Transfer-function method"), che prevede la determinazione del coefficiente di riflessione $R(\omega)$ a partire dalla pressione incidente e riflessa. Il coefficiente di assorbimento $\alpha(\omega)$ risulta quindi:

$$\alpha(\omega) = 1 - |R(\omega)|^2 \quad (3.17)$$

Dove $R(\omega)=p_r/p_i$ è il coefficiente di riflessione ed è ricavato dal rapporto tra i segnali di pressione riflessa p_r in rapporto alla pressione incidente p_i , mediante il metodo della funzione di trasferimento.

⁸⁷ COMSOL AB, *COMSOL Multiphysics*® v. 5.3 [Software], Stockholm, Sweden, COMSOL AB, 2017, disponibile su <https://www.comsol.com>.

⁸⁸ International Organization for Standardization, ISO 10534-2:1998 *Acoustics – Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes – Part 2: Transfer-Function Method*, Geneva, ISO, 1998, disponibile su <https://www.iso.org/standard/40279.html>.

In Figura 3.3 è mostrata una vista schematica del dominio simulato, che include il tubo di impedenza e i punti di misura utilizzati per la valutazione del campo acustico. La geometria del modello comprende:

- un tubo cilindrico rigido di lunghezza $L_w=1000$ mm, raggio $R_w=18.75$ mm;
- un pannello metamateriale AMM composto da quattro celle unitarie con collo spezzato, disposte simmetricamente in pianta;
- due punti di misura della pressione, p_1 e p_2 , posizionati rispettivamente a $x_1=130.5$ mm e $x_2=100$ mm dalla parte finale del tubo, in conformità con la configurazione sperimentale.

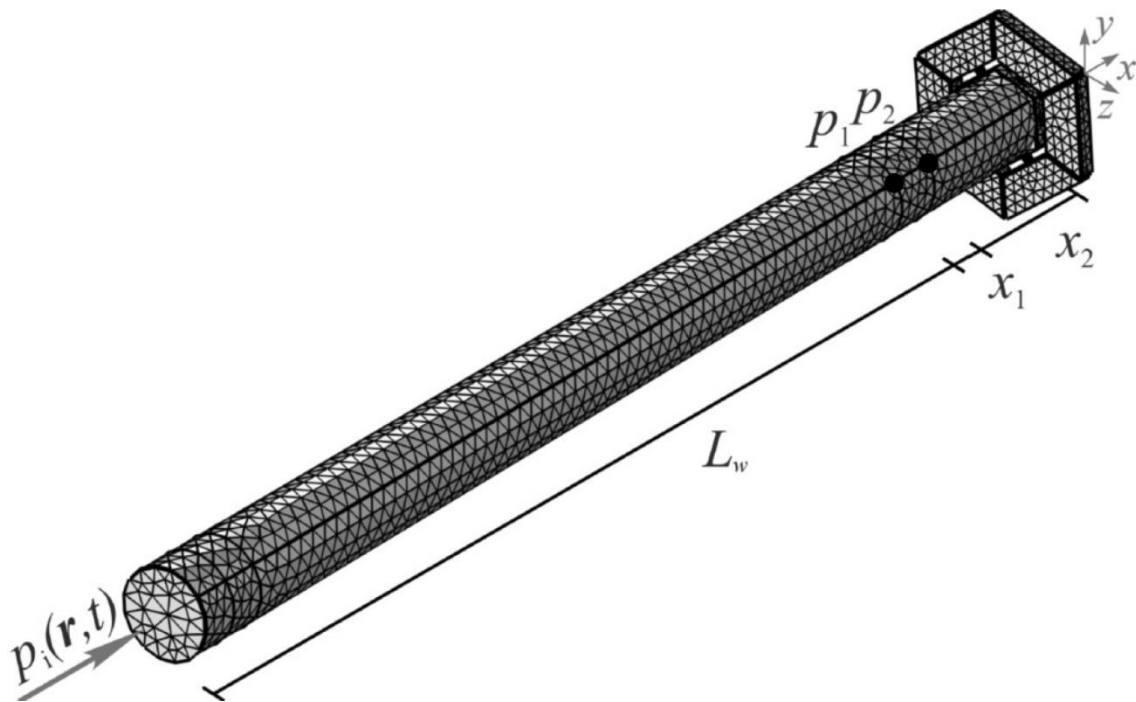


Figura 3.3 – Schema tridimensionale del modello FEM del tubo di impedenza.

Il tubo viene modellato come un condotto rigido a sezione circolare, al cui estremo viene collocato il pannello AMM. All'interno del dominio, la pressione sonora viene registrata in due punti prestabiliti lungo l'asse del tubo (p_1 e p_2), allo scopo di applicare il metodo della funzione di trasferimento per il calcolo del coefficiente di riflessione $R(\omega)$. La sorgente acustica è applicata in corrispondenza della sezione d'ingresso del tubo, mediante l'imposizione di un'onda piana armonica incidente. Il pannello viene inserito in corrispondenza dell'estremità opposta, a chiusura del tubo, in modo da simulare esattamente la condizione sperimentale. La geometria interna del pannello è stata ricostruita sulla base delle dimensioni reali dei campioni stampati in 3D, considerando le

configurazioni testate sperimentalmente. Ogni cella unitaria presenta un foro spezzato inclinato secondo le angolazioni progettate (θ_1, θ_2) , ed è collegata a una cavità cilindrica posteriore. Le quattro celle sono state modellate in modo solidale all'interno della stessa struttura, mantenendo la distribuzione e le proporzioni riscontrate nei campioni fisici.

L'intero dominio Ω è riempito con aria modellata come gas ideale in condizioni standard, con temperatura pari a 26 °C, densità $\rho_0=1.2 \text{ kg/m}^3$ e velocità del suono $c_0=343 \text{ m/s}$. Il modello è risolto in regime armonico stazionario nel dominio di frequenza, assumendo l'invarianza temporale e spaziale delle proprietà del fluido. Le condizioni al contorno sono descritte di seguito:

Sezione di ingresso Γ_1 :

Alla sezione iniziale del tubo viene imposta una condizione di pressione di un'onda piana incidente con ampiezza unitaria:

$$p_i(r, t) = P_0 e^{j(kx - \omega t)} \quad (3.18)$$

dove:

r : coordinata radiale,

t : tempo,

$P_0=1 \text{ Pa}$: ampiezza unitaria della pressione incidente,

j : unità immaginaria,

x : direzione longitudinale della propagazione,

$k=\omega/c$: numero d'onda.

Questo permette di simulare l'ingresso di un fronte d'onda perfettamente planare che si propaga lungo l'asse x verso il pannello.

Superfici laterali del tubo e della cavità Γ_2 :

Le superfici laterali del tubo e della cavità sono modellate come acusticamente rigide, imponendo una condizione di Neumann, ovvero è nulla la derivata della pressione rispetto alla normale n alla superficie, che implica l'annullamento del flusso normale della velocità acustica.

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (3.19)$$

Questa ipotesi è giustificata dalla rigidità meccanica delle pareti del tubo di impedenza e del corpo del pannello, sia nel modello numerico che nell'apparato sperimentale reale.

Superficie interna del collo del risonatore Γ_{neck} :

Le perdite visco-termiche che si sviluppano all'interno del collo sono modellate attraverso una condizione di impedenza al contorno basata sull'approccio Boundary Layer Impedance (BLI)⁸⁹. Questa tecnica consente di integrare nel modello l'effetto dissipativo degli strati limite acustici viscosi e termici, evitando la necessità di *mesh* estremamente raffinate.

La condizione imposta è descritta dall'Equazione 3.20:

$$\delta_v \frac{(j-1)}{2} \Delta_T p + \delta_T k_0^2 \frac{(j-1)(\gamma-1)}{2} + \frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (3.20)$$

dove:

$\delta_v = \sqrt{2\nu/\omega}$: spessore dello strato limite viscoso acustico, con ν : viscosità cinematica,

$\delta_T = \sqrt{2k/\omega\rho_0 c_p}$: spessore dello strato limite termico acustico, con k : conduttività termica,

$k_0 = \omega/c_0$: numero d'onda acustico nel mezzo,

$\gamma = c_p/c_v$: rapporto tra calore specifico a pressione costante C_p e a volume costante C_v dell'aria.

$\Delta_T p$: operatore laplaciano tangenziale della pressione.

La parte restante del dominio interno, la cavità, è invece considerata rigida e non dissipativa, in linea con le condizioni di stampa e l'approccio numerico semplificato. In Tabella 3.1 sono riassunte le principali condizioni al contorno del dominio.

Tabella 3.1 – Condizioni al contorno applicate nel dominio numerico.

Contorno	Descrizione	Condizione
Γ_1	Ingresso tubo	Onda piana
Γ_2	Pareti tubo e cavità	Superficie rigida
Γ_{neck}	Superficie interna del collo	Boundary Layer Impedance

La discretizzazione del dominio Ω simulato è stata effettuata tramite elementi tetraedrici 3D. All'interno del tubo, la *mesh* è stata costruita imponendo un numero minimo di 8 elementi per lunghezza d'onda acustica, per garantire un'adeguata risoluzione spaziale nella gamma di frequenze simulate. Il passo massimo della *mesh* nel tubo è stato quindi calcolato come: $\Delta_{wmax} = \frac{\lambda_{min}}{8}$ dove $\lambda_{min} = \frac{c_0}{f_{max}}$ è la minima lunghezza d'onda acustica considerata, calcolata in funzione della massima frequenza f_{max} simulata. La dimensione minima è stata adottata pari a $\Delta_{wmin} = \frac{\lambda_{min}}{32}$, in modo da

⁸⁹ Cfr. Mats Berggren, Andreas Bernland e Daniel Noreland, "Acoustic Boundary Layers as Boundary Conditions", «Journal of Computational Physics», vol. 371, settembre 2018, pp. 633–650, disponibile su <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.06.011>.

preservare l'accuratezza del calcolo anche in presenza di onde ad alta frequenza e ridurre la dispersione numerica.

La strategia di discretizzazione applicata al dominio dei colli spezzati è stata definita in modo da garantire una rappresentazione accurata degli effetti dissipativi locali, senza eccedere nel numero di elementi. In particolare, la dimensione massima degli elementi finiti all'interno del collo è stata fissata pari a un quarto della sua dimensione trasversale caratteristica: $\Delta_{neck_{max}} = \frac{2r}{4}$ dove r è il raggio del collo. La dimensione minima della *mesh* è invece stata impostata pari a metà dello spessore dello strato limite viscoso: $\Delta_{neck_{min}} = \frac{\delta v}{2}$, così da poter modellare correttamente le perdite visco-termiche che si sviluppano in prossimità delle pareti interne del collo.

Per la cavità posteriore, che non presenta rilevanti fenomeni dissipativi, è stato possibile adottare una maglia meno fitta. In questo caso, la *mesh* massima è stata assunta pari a metà della dimensione trasversale caratteristica: $\Delta_{c_{max}} = \frac{2R_c}{2}$, mentre la *mesh* minima è pari a un quarto di tale valore: $\Delta_{c_{min}} = \frac{2R_c}{4}$ dove R_c è il raggio della cavità. In Tabella 3.2 è riportato un riepilogo delle specifiche di discretizzazione adottate.

Tabella 3.2 – Specifiche delle discretizzazioni delle *mesh*.

Dominio	Dimensione massima	Dimensione minima
Tubo	$\lambda_{min}/8$	$\lambda_{min}/32$
Collo	$2r/4$	$\delta v/2$
Cavità	$2R_c/2$	$2R_c/4$

3.2.5 Produzione dei campioni

Per validare i modelli teorici sviluppati e ottenere una rappresentazione realistica del comportamento acustico dei metamateriali progettati, è stato necessario realizzare fisicamente una serie di campioni, impiegando tecniche di manifattura additiva.

La realizzazione dei campioni fisici è stata progettata mediante un software di modellazione tridimensionale CAD e i prototipi sono stati prodotti tramite un processo di estrusione termoplastica (*Fused Deposition Modelling* – FDM)⁹⁰, utilizzando una stampante Blocks One MK2 disponibile presso il laboratorio dell'Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering (ISISE) del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Coimbra. Il materiale impiegato è il

⁹⁰ Cfr. Tomasz G. Zieliński, Nicolas Dauchez, Thomas Boutin et al., "Taking Advantage of a 3D Printing Imperfection in the Development of Sound-Absorbing Materials", «Applied Acoustics», vol. 197, giugno 2022, p. 108941.

polilattato (PLA), un polimero termoplastico biodegradabile, scelto per le sue buone prestazioni acustiche a bassa frequenza e per la compatibilità con il metodo di stampa FDM. Le principali caratteristiche tecniche del dispositivo di stampa e le impostazioni operative adottate per la produzione dei campioni sono sintetizzate nella Tabella 3.3.

Tabella 3.3 – Caratteristiche del dispositivo e parametri di stampa 3D adottati per la realizzazione dei campioni.

Modello	Blocks One MK2
Tecnologia	Fused Deposition Modelling (FDM)
Dimensione ugello	0.4 mm
Materiale	Polilattato (PLA)
Diametro filamento	1.75 mm
Temperatura di estrusione	210 °C
Temperatura del piatto	50 °C
Velocità di stampa	50 mm/s

I campioni realizzati per la successiva fase sperimentale includono sia singole celle unitarie con foro spezzato, sia il pannello composto da quattro unità acustiche replicate (Figura 3.4). Gli AMM stampati riproducono fedelmente la geometria di riferimento, già descritta nel paragrafo § 3.2.2, che prevede un collo suddiviso in due segmenti inclinati secondo angoli variabili θ_1 e θ_2 , connesso a una cavità cilindrica posteriore.

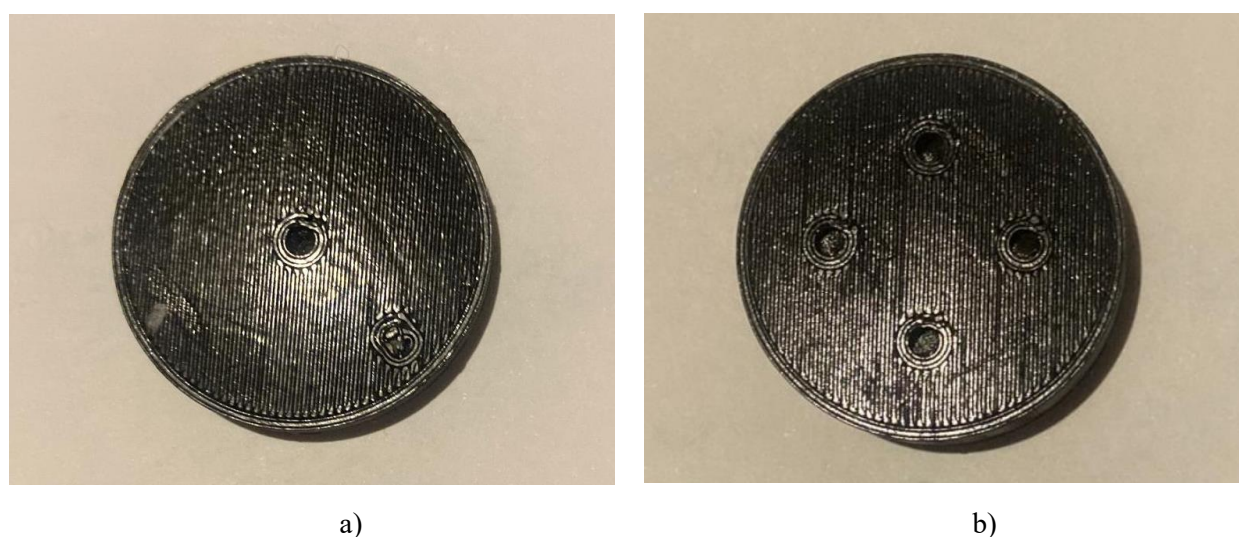


Figura 3.4 – Campioni realizzati mediante stampa 3D: a) singola cella unitaria; b) pannello acustico composto da più unità replicate secondo una configurazione simmetrica.

Per ciascun campione sono stati variati parametri geometrici specifici al fine di testare il comportamento acustico in funzione delle caratteristiche fisiche del sistema. In particolare, le varianti sperimentate differiscono per: gli angoli di inclinazione del collo spezzato (θ_1, θ_2), la profondità della cavità (D) e lo spessore complessivo del campione (L). Ciascuna cella unitaria è stata testata in quattro configurazioni, combinando $L=5$ mm e $L=10$ mm con $D=5$ mm e $D=10$ mm, per ciascuna coppia di angoli. In tali configurazioni, θ_1 indica l'inclinazione del primo segmento del collo, ovvero quello direttamente esposto all'onda incidente, mentre θ_2 si riferisce al secondo tratto, che guida il flusso verso la cavità posteriore.

Il pannello, costituito da quattro risonatori acustici, è stato realizzato con $L=10$ mm e combinato a due cavità caratterizzate da $D=5$ mm e $D=10$ mm. In entrambi i casi, la geometria include due colli con angoli $30^\circ-60^\circ$ e due con angoli $45^\circ-60^\circ$, disposti in modo simmetrico.

In Tabella 3.4 sono riepilogate le configurazioni sperimentali realizzate per ciascun tipo di campione, con le relative variabili geometriche.

Tabella 3.4 – Configurazioni sperimentali dei campioni stampati in 3D.

Campione	θ_1 [°]	θ_2 [°]	L [mm]	D [mm]
Cella unitaria	30	60	5	5
Cella unitaria	30	60	5	10
Cella unitaria	30	60	10	5
Cella unitaria	30	60	10	10
Cella unitaria	60	30	5	5
Cella unitaria	60	30	5	10
Cella unitaria	60	30	10	5
Cella unitaria	60	30	10	10
Cella unitaria	60	45	5	5
Cella unitaria	60	45	5	10
Cella unitaria	60	45	10	5
Cella unitaria	60	45	10	10
Cella unitaria	45	45	5	5
Cella unitaria	45	45	5	10
Cella unitaria	45	45	10	5
Cella unitaria	45	45	10	10
Cella unitaria	45	60	5	5
Cella unitaria	45	60	5	10
Cella unitaria	45	60	10	5
Cella unitaria	45	60	10	10
Pannello	30/45	60	10	5
Pannello	30/45	60	10	10

Tutti i campioni, sia di cella singola sia di pannello, sono stati progettati con forma esterna circolare, con raggio pari a $R_w=18,75$ mm, in modo da garantire il corretto inserimento all'interno del tubo di impedenza di diametro di 37,5 mm utilizzato nelle misure. L'interfaccia tra il campione e il tubo è stata sigillata tramite un anello di tenuta in gomma, inserito in una flangia di supporto appositamente realizzata, in modo da assicurare una connessione rigida e priva di fughe acustiche. Tale soluzione consente di rispettare le condizioni al contorno imposte dal metodo di misura, che prevede che tutto il fronte d'onda incidente interagisca esclusivamente con la superficie del campione.

Per valutare l'accuratezza dimensionale dei campioni stampati, sono state misurate le principali grandezze geometriche mediante calibro digitale (Figura 3.5). I valori ottenuti sono stati confrontati con quelli nominali di progetto, al fine di quantificare gli scostamenti eventualmente introdotti dal processo di stampa 3D.

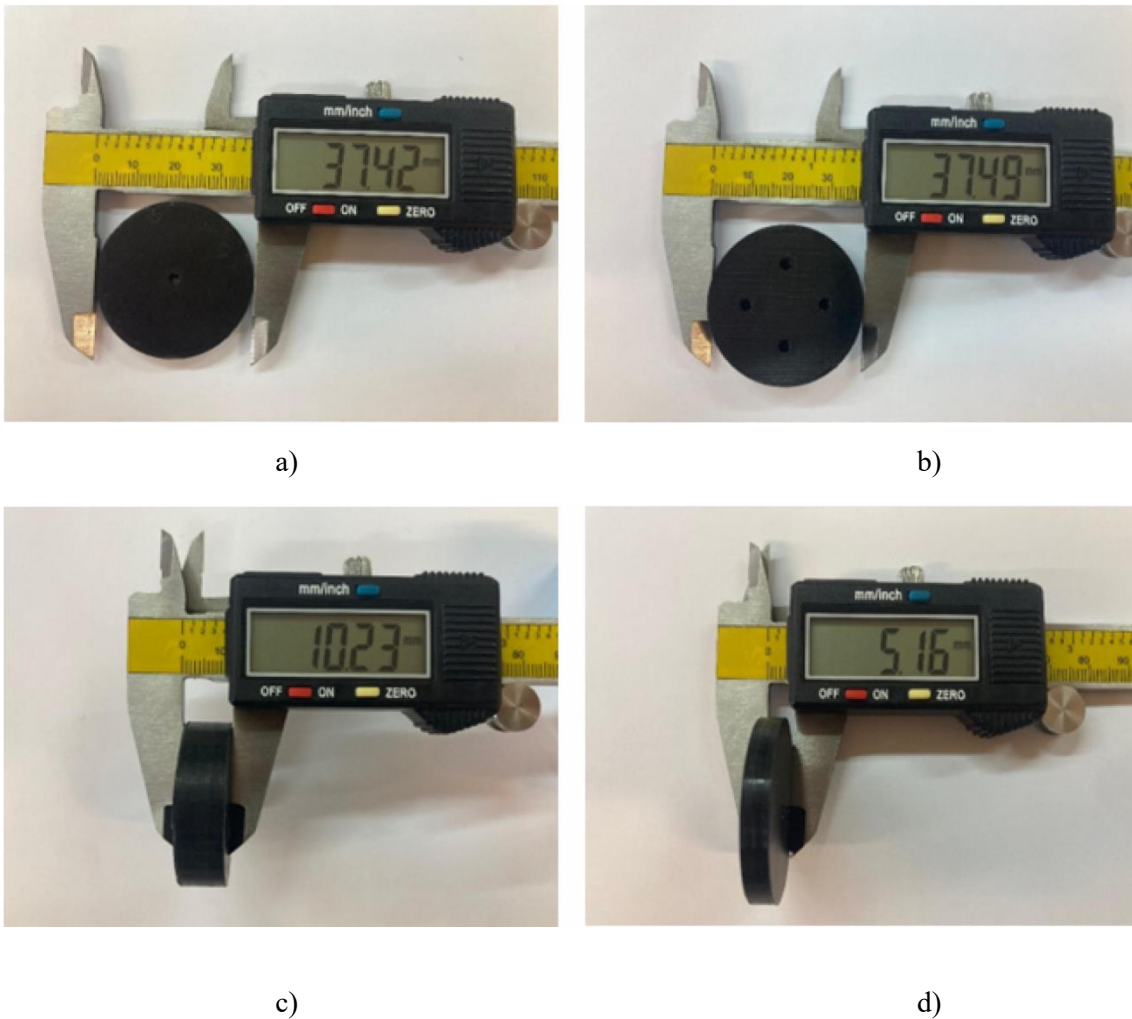


Figura 3.5 – Misure dimensionali effettuate con calibro digitale sui campioni stampati: a) Diametro esterno della cella unitaria, b) Diametro esterno del pannello, c) Spessore L del campione con spessore teorico di 10 mm, d) Spessore L del campione con spessore teorico di 5 mm.

Come noto in letteratura⁹¹, la risoluzione delle tecniche di stampa Fused Deposition Modeling (FDM) può incidere in modo significativo sulle prestazioni acustiche dei campioni, poiché anche variazioni minime nella geometria reale influenzano parametri chiave come il volume della cavità, la sezione del collo e la lunghezza effettiva del percorso risonante. Queste discrepanze, dovute a fenomeni quali imprecisioni di deposizione, variazioni termiche o ritiri del materiale durante il raffreddamento, possono determinare spostamenti della frequenza di risonanza e modifiche nel coefficiente di assorbimento previsto. Per questo motivo, durante la fase di stampa sono stati eseguiti aggiustamenti iterativi dei parametri di *slicing*, allo scopo di minimizzare le irregolarità morfologiche tipiche di tale tecnologia.

Tutti i valori misurati relativi agli spessori dei campioni (Figura 3.5c, 3.5d) sono riportati nella Tabella 3.5, insieme ai corrispondenti valori teorici di progetto. Tale confronto consente di quantificare l'entità degli scostamenti dimensionali.

Tabella 3.5 – Valori misurati e valori nominali dello spessore dei campioni stampati.

Campione	θ_1 [°]	θ_2 [°]	L misurato [mm]	L nominale [mm]
Cella unitaria	30	60	5.28	5
Cella unitaria	30	60	10.28	10
Cella unitaria	60	45	5.29	5
Cella unitaria	60	45	10.23	10
Cella unitaria	45	45	5.16	5
Cella unitaria	45	45	10.22	10
Pannello	30/45	60	10.18	10

In generale, gli scostamenti riscontrati sono inferiori a $\pm 0,3$ mm, e possono essere considerati accettabili per l'applicazione in esame. Tuttavia, nei componenti critici come il collo spezzato, anche minime deviazioni dimensionali possono modificare la frequenza di risonanza e l'impedenza acustica del sistema. Un esempio delle imperfezioni tipiche osservabili nel collo è riportato in Figura 3.6, dove si notano rugosità superficiali, bordi non perfettamente definiti e strati di deposizione non perfettamente uniformi, aspetti che potrebbero influire sul comportamento reale del risonatore.

⁹¹ Cfr. Tomasz G. Zieliński, François Chevillotte e Emil Deckers, "Sound Absorption of Plates with Micro-Slits Backed with Air Cavities: Analytical Estimations, Numerical Calculations and Experimental Validations", «Applied Acoustics», vol. 146, maggio 2019, pp. 261–279.



Figura 3.6 – Dettaglio al microscopio digitale della superficie interna del collo di un campione. Sono visibili imperfezioni superficiali dovute alla risoluzione limitata della stampa FDM.

3.2.6 *Setup sperimentale in tubo di impedenza*

La fase sperimentale descritta in questa sezione ha l'obiettivo di caratterizzare il comportamento acustico dei campioni progettati, attraverso la determinazione del coefficiente di assorbimento in funzione della frequenza. Le misure sono state effettuate in laboratorio mediante l'impiego di un tubo di impedenza rigido, seguendo la procedura standardizzata dalla norma ISO 10534-2:1998.

Il metodo si basa sull'eccitazione dell'ambiente confinato da parte di un'onda piana incidente e sulla registrazione della risposta acustica tramite due microfoni disposti lungo l'asse del tubo. L'analisi dei segnali di pressione acquisiti consente di calcolare la funzione di trasferimento tra i due microfoni, da cui è possibile determinare il coefficiente di riflessione acustica $R(\omega)$, e successivamente il coefficiente di assorbimento $\alpha(\omega)$.

Questa procedura permette di confrontare i risultati sperimentali con le previsioni ottenute tramite i modelli analitici e numerici, validando così il comportamento reale degli AMM a collo spezzato nelle condizioni operative di interesse.

Il tubo d'impedenza utilizzato per le misure sperimentali, mostrato in Figura 3.7, presenta un diametro interno di 37,5 mm e una lunghezza di 1000 mm, sufficiente a garantire lo sviluppo completo dell'onda incidente prima dell'interazione con il campione. La frequenza operativa utile per il sistema si estende approssimativamente da 200 Hz a 4800 Hz, in accordo con i limiti imposti dalla geometria e dalla distanza tra i microfoni. All'interno del tubo sono stati installati due microfoni di misura posizionati rispettivamente a 100 mm (x_2) e 130,5 mm (x_1) rispetto al campione, posto nella parte terminale del tubo, con una distanza reciproca pari a 30,5 mm, secondo le specifiche della norma ISO 10534-2. Il segnale acustico utilizzato per l'eccitazione del sistema è di tipo *sine-sweep* a banda larga, generato da un altoparlante collegato a un amplificatore M700 e controllato tramite interfaccia audio National Instruments e software MATLAB.

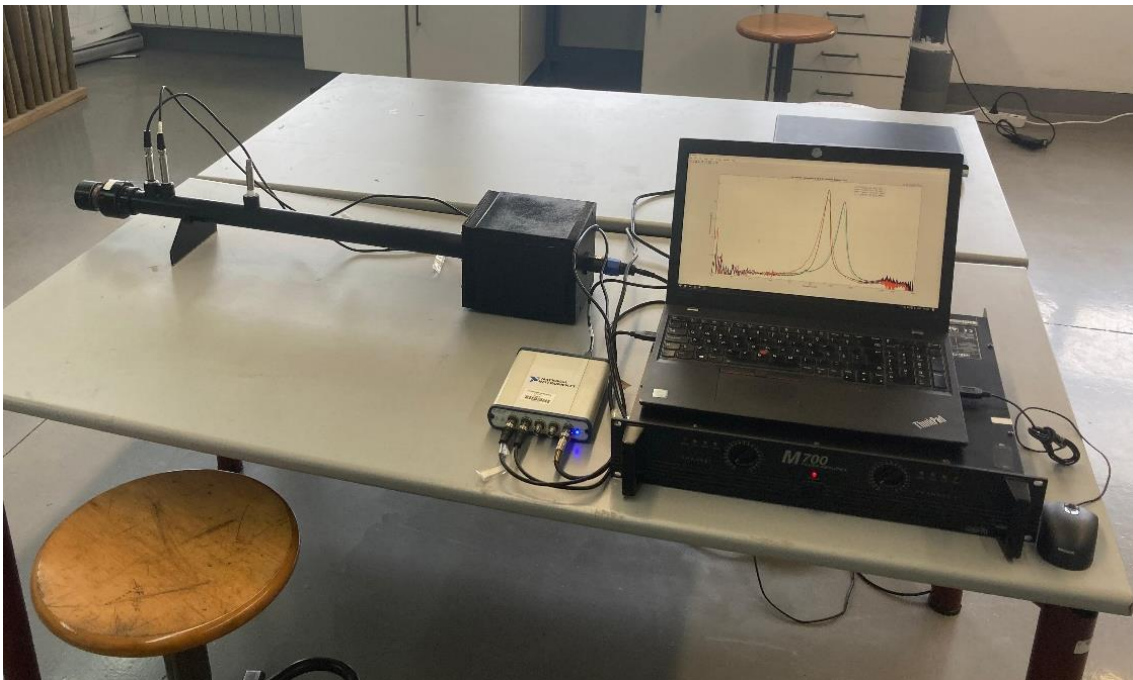


Figura 3.7 – Vista del banco di prova utilizzato per la misura del coefficiente di assorbimento secondo la norma ISO 10534-2, con evidenza del tubo di impedenza, dei microfoni, del sistema di acquisizione e del campione posizionato all'estremità..

La procedura di misura della pressione acustica all'interno del tubo, effettuata tramite i due microfoni p_1 e p_2 posizionati rispettivamente nei punti x_1 e x_2 , può essere descritta come segue:

$$P_1 = |p_i|e^{jkx_1} + |p_r|e^{-jkx_1} \quad (3.21)$$

$$P_2 = |p_i|e^{jkx_2} + |p_r|e^{-jkx_2} \quad (3.22)$$

dove $|p_i|$ e $|p_r|$ rappresentano, rispettivamente, le ampiezze delle componenti incidente e riflessa della pressione acustica sulla superficie del campione. Le funzioni di trasferimento H_i e H_r , relative alle due componenti, sono espresse tramite le Equazioni 3.23 e 3.24:

$$H_i = \frac{p_i e^{jkx_2}}{p_i e^{-jkx_1}} = e^{jks} \quad (3.23)$$

$$H_r = \frac{p_r e^{jkx_2}}{p_r e^{-jkx_1}} = e^{-jks} \quad (3.24)$$

dove $s=x_2-x_1$ è la distanza tra i due microfoni. La funzione di trasferimento tra i due punti di misura, H_{12} , è quindi definita come:

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{jkx_2} + R e^{-jkx_2}}{e^{jkx_1} + R e^{-jkx_1}} \quad (3.25)$$

dove R è il coefficiente di riflessione complesso. Quest'ultimo può essere ricavato dall'Equazione 3.26:

$$R = \frac{H_{12} + H_i}{H_r - H_{12}} e^{2jkx_1} \quad (3.26)$$

Una volta calcolato il coefficiente di riflessione, il coefficiente di assorbimento acustico $\alpha(\omega)$ per incidenza normale può essere determinato mediante l'Equazione 3.17.

3.3 Risultati e conclusioni

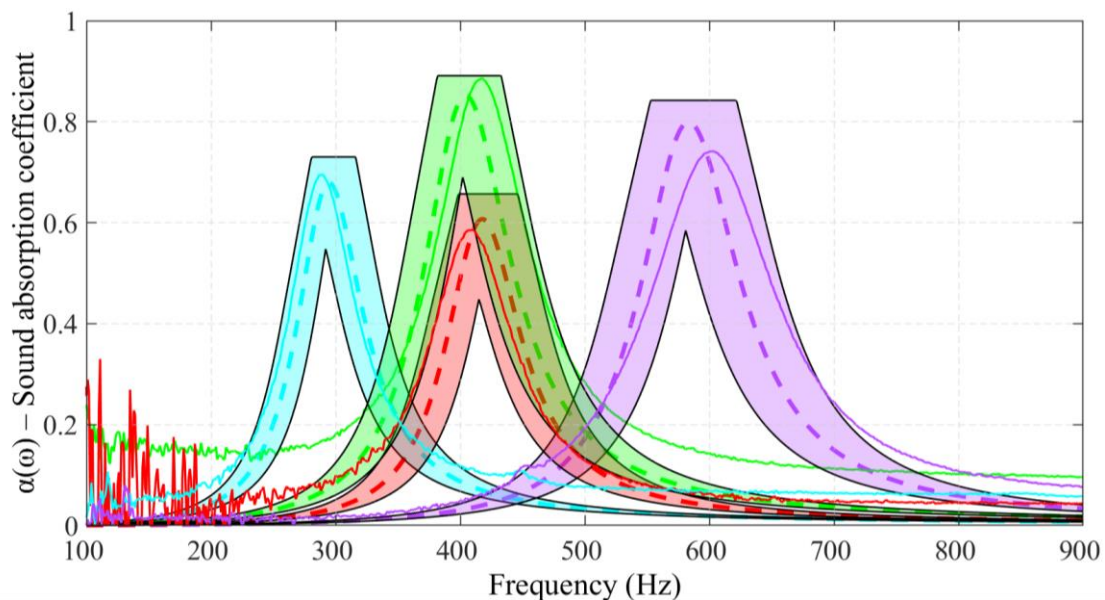
In questo capitolo vengono presentati e analizzati i risultati ottenuti nell'ambito della caratterizzazione acustica del metamateriale progettato, attraverso un confronto sistematico tra tre approcci distinti: la misura sperimentale in tubo di impedenza, la modellazione analitica tramite metodo della matrice di trasferimento (TMM) e la simulazione numerica agli elementi finiti (FEM). Il parametro di riferimento adottato per la valutazione comparativa è il coefficiente di assorbimento acustico $\alpha(\omega)$, calcolato in funzione della frequenza per ciascuna configurazione geometrica testata. Le analisi sperimentali sono state condotte su campioni fisici stampati in 3D, includendo sia celle unitarie singole con diverse misure dello spessore L , cavità D , e inclinazioni del collo ($\theta_1-\theta_2$), sia il pannello composto da più unità replicate. I dati acquisiti sono stati successivamente confrontati con le previsioni teoriche fornite dal modello TMM, sviluppato in ambiente MATLAB, per quanto riguarda le celle unitarie, e con i risultati numerici ottenuti tramite simulazione FEM condotta con il software COMSOL Multiphysics, relativi invece al pannello completo.

L'obiettivo del confronto è duplice: da un lato, verificare la validità dei modelli sviluppati nel riprodurre il comportamento reale del sistema; dall'altro, valutare l'efficacia acustica del metamateriale in relazione ai parametri geometrici che ne definiscono la configurazione, con particolare attenzione all'impatto della geometria "spezzata" del collo sulla risposta in frequenza.

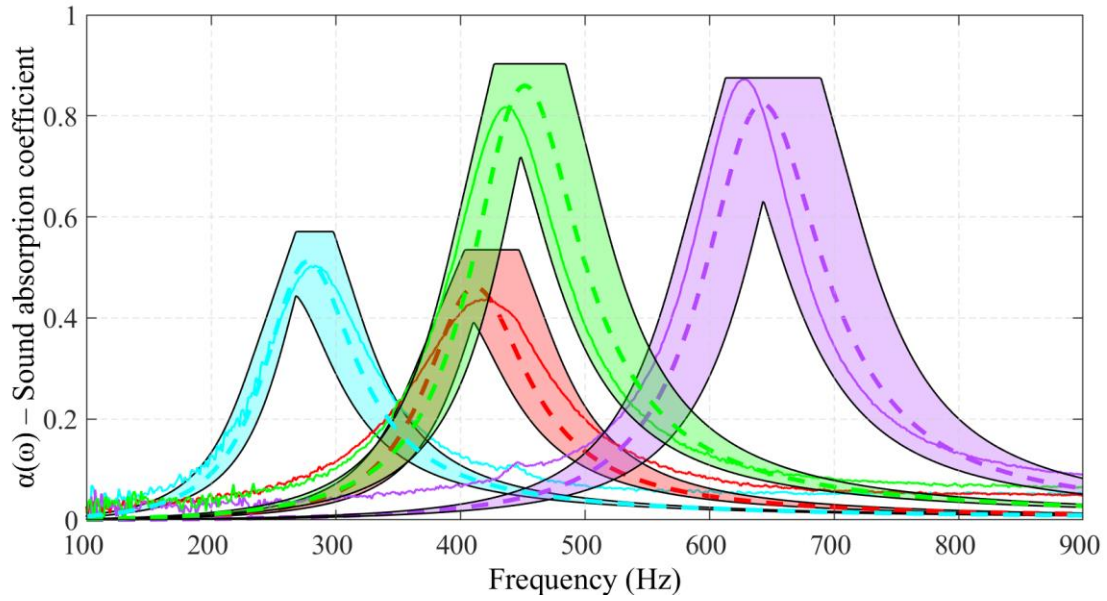
3.3.1 Confronto tra risultati sperimentali e modello analitico (TMM)

Le Figure 3.8a-3.8e illustrano il confronto tra i coefficienti di assorbimento $\alpha(\omega)$ ottenuti sperimentalmente in tubo di impedenza e quelli previsti dal modello analitico basato sul metodo della matrice di trasferimento (TMM), per cinque configurazioni angolari del collo spezzato. Per ciascun caso, sono considerate quattro varianti geometriche, ottenute combinando due valori di spessore ($L = 5 \text{ mm}$, 10 mm) con due profondità di cavità ($D = 5 \text{ mm}$, 10 mm). In ogni grafico, le curve continue rappresentano i dati sperimentali, mentre le bande colorate corrispondono agli involuipi teorici calcolati con il TMM, tenendo conto di una variazione del $\pm 5\%$ sul raggio del collo acustico r rispetto al valore nominale di 3 mm . Questa scelta tiene conto delle incertezze dimensionali introdotte dal processo di stampa 3D, che influenzano in modo significativo l'impedenza e la frequenza di risonanza del sistema. All'interno degli involuipi, sono riportate anche le curve tratteggiate, che rappresentano la previsione del modello TMM con raggio esattamente pari a 3 mm , senza considerazione di errore. Le curve e gli involuipi sono codificati con colori costanti in tutti i grafici:

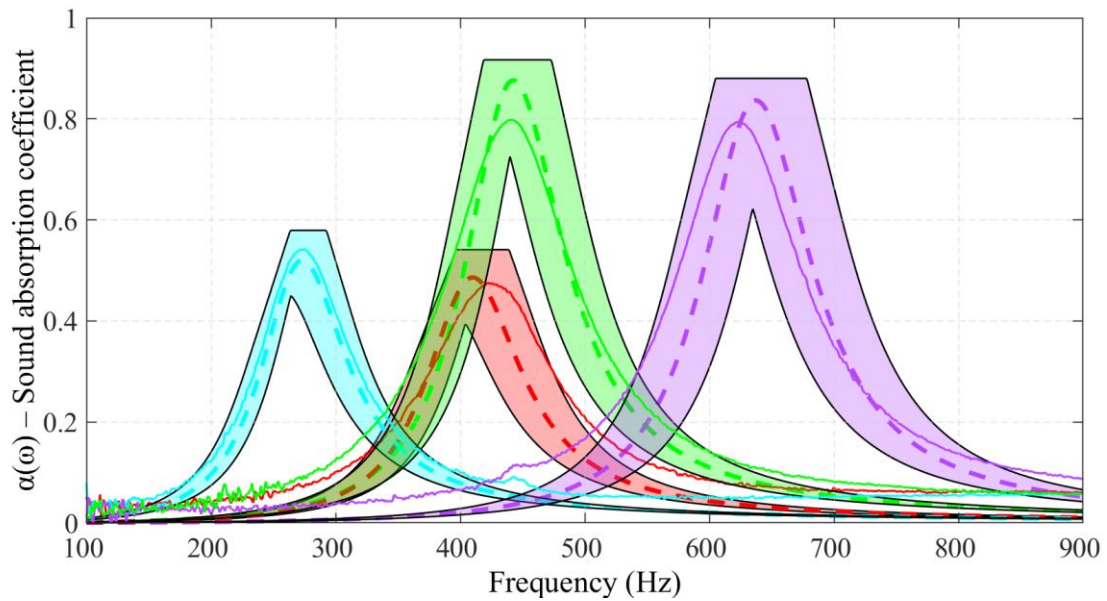
- viola per $D = 5 \text{ mm}$, $L = 5 \text{ mm}$;
- verde per $D = 5 \text{ mm}$, $L = 10 \text{ mm}$;
- rosso per $D = 10 \text{ mm}$, $L = 5 \text{ mm}$;
- azzurro per $D = 10 \text{ mm}$, $L = 10 \text{ mm}$.



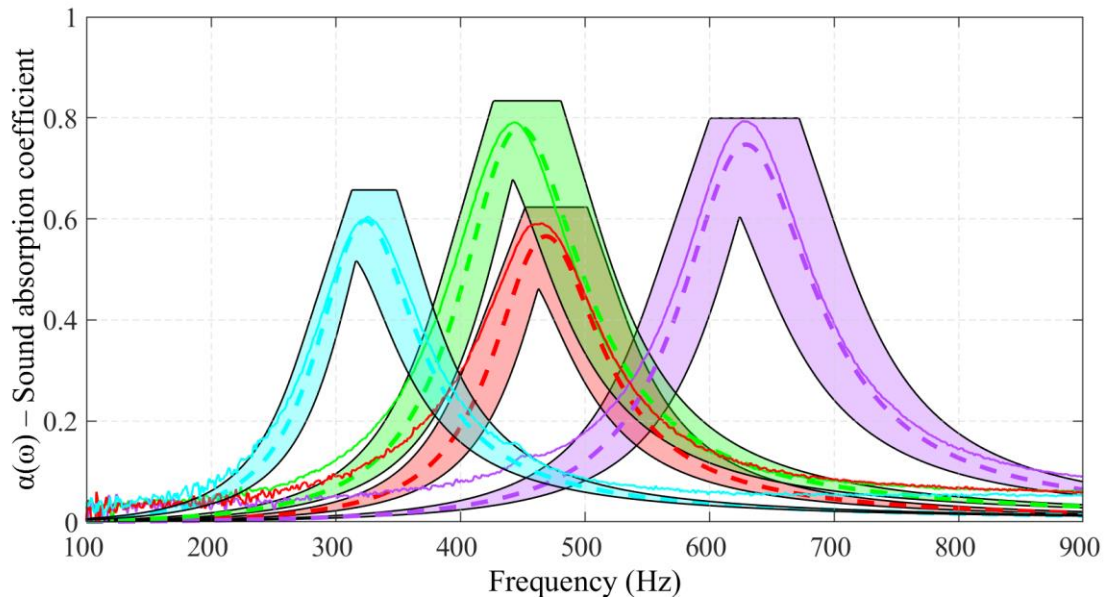
3.8a – configurazione con segmenti angolari: $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = 45^\circ$.



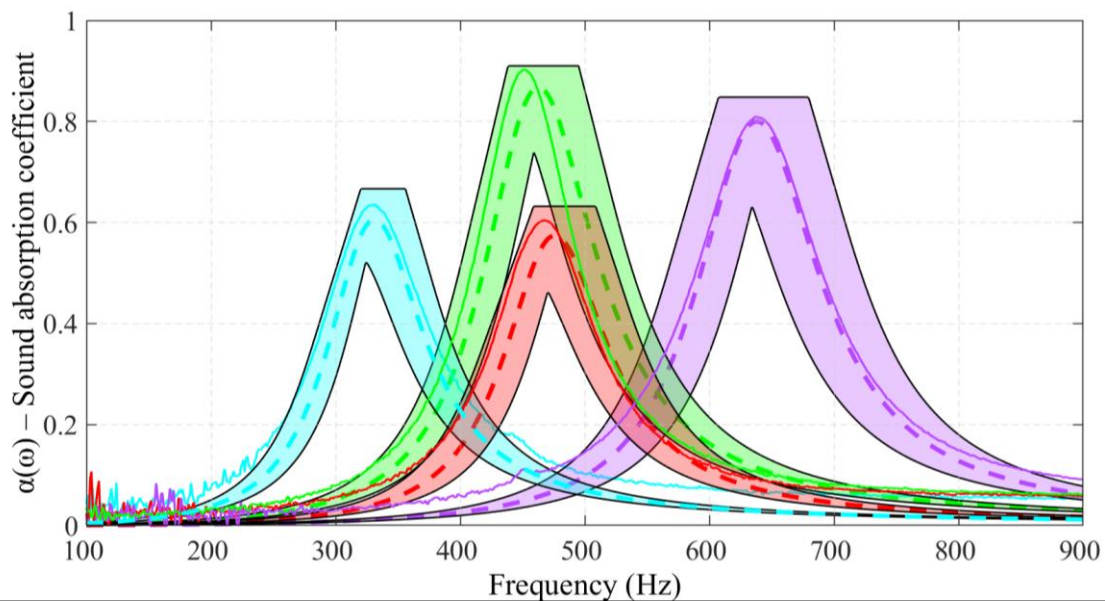
3.8b – configurazione con segmenti angolari: $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$.



3.8c – configurazione con segmenti angolari: $\theta_1 = 60^\circ$, $\theta_2 = 30^\circ$.



3.8d – configurazione con segmenti angolari: $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$.



3.8e – configurazione con segmenti angolari: $\theta_1 = 60^\circ$, $\theta_2 = 45^\circ$.

Figura 3.8 – Confronto tra i coefficienti di assorbimento $\alpha(\omega)$ ottenuti sperimentalmente (linee continue) e quelli previsti dal modello analitico TMM (bande colorate) per cinque configurazioni angolari del collo spezzato: **a)** $45^\circ-45^\circ$, **b)** $30^\circ-60^\circ$, **c)** $60^\circ-30^\circ$, **d)** $45^\circ-60^\circ$, **e)** $60^\circ-45^\circ$.

In ogni grafico sono riportati i risultati relativi a quattro combinazioni geometriche (D, L), codificate per colore: viola ($D = 5 \text{ mm}$, $L = 5 \text{ mm}$), verde ($D = 5 \text{ mm}$, $L = 10 \text{ mm}$), rosso ($D = 10 \text{ mm}$, $L = 5 \text{ mm}$), azzurro ($D = 10 \text{ mm}$, $L = 10 \text{ mm}$). Le curve tratteggiate rappresentano la risposta TMM con raggio del collo pari esattamente a 3 mm, mentre le bande colorate rappresentano gli involucri teorici tenendo conto di una tolleranza del $\pm 5\%$ sul raggio.

Nel complesso, il confronto mostra una buona coerenza tra il comportamento sperimentale e quello teorico: il modello TMM, descrive in modo accurato sia la frequenza di risonanza che la forma e l'ampiezza delle curve. Le leggere discrepanze sono da attribuire principalmente alle approssimazioni geometriche come l'effettiva area del collo, irregolarità interne, le variazioni di rugosità e all'influenza delle perdite viscosive reali, che non sono sempre pienamente catturate dal modello. L'inviluppo calcolato, grazie all'introduzione di incertezza su r , riesce a contenere la risposta reale, dimostrandosi uno strumento utile e realistico per la progettazione preliminare.

Come descritto dalla teoria dei risonatori di Helmholtz, e come illustrato dall'Equazione 3.2 nel Capitolo 3.1.2, la frequenza di risonanza è proporzionale alla radice quadrata del rapporto tra la sezione del collo e il prodotto tra il volume della cavità e la lunghezza del collo. In termini geometrici, ciò implica che riducendo sia D sia L , la frequenza di risonanza cresce, poiché si riduce la "massa" acustica del sistema e aumenta la sua rigidità complessiva. Questo è coerente con il comportamento della configurazione viola che rappresenta il caso con entrambi i parametri geometrici minimi ($D = 5$ mm, $L = 5$ mm), e mostra un picco a frequenze più alte rispetto alle altre. All'opposto, la configurazione azzurra ($D = 10$ mm, $L = 10$ mm) presenta un picco spostato verso frequenze più basse: un collo più lungo e una cavità più ampia determinano una massa d'aria più elevata e una "molla acustica" meno rigida, il che porta a una risonanza più lenta.

La minore efficienza d'assorbimento delle configurazioni rossa e azzurra rispetto a quelle viola e verde può essere attribuita a un rapporto meno ottimale tra la massa d'aria nel collo e il volume della cavità, che incide sulla dinamica della risonanza. In particolare, l'aumento del volume della cavità ($D = 10$ mm) tende a spostare il sistema verso una minore efficienza dissipativa, come suggerito dall'abbassamento del valore massimo del coefficiente di assorbimento osservato sperimentalmente. Questo comportamento potrebbe essere legato a un miglior accoppiamento tra geometria e condizioni viscosive/termiche nei casi con cavità più piccole ($D = 5$ mm), che risultano in un picco più pronunciato. L'andamento sperimentale appare coerente con l'ipotesi che, a parità di massa d'aria nel collo, un'eccessiva volumetria della cavità possa limitare l'efficienza del meccanismo risonante, riducendo di conseguenza l'ampiezza del picco di assorbimento.

Tra le diverse configurazioni angolari analizzate, quella con segmenti inclinati simmetricamente a 45° , ossia con primo e secondo tratto entrambi pari a 45° (Figura 3.8a), si distingue per assorbire, in tutte le combinazioni geometriche considerate, le frequenze più basse. Questo comportamento può essere attribuito al fatto che, a parità di lunghezza totale del collo L , la distribuzione simmetrica dei segmenti inclinati determina un percorso effettivo della linea centrale del collo, ovvero la somma delle lunghezze $d_1 + d_2$, maggiore rispetto alle altre configurazioni. Ciò si

traduce in una lunghezza acustica più lunga, che abbassa la frequenza di risonanza, secondo quanto previsto dalla relazione (2) dei risonatori di Helmholtz.

Nel confronto tra coppie di configurazioni speculari, come quella con inclinazioni di 30° - 60° (Figura 3.8b), e quella 60° - 30° (Figura 3.8c), oppure tra la combinazione 45° - 60° (Figura 3.8d) e quella 60° - 45° (Figura 3.8e), si osserva che le curve risultano molto simili sia per frequenza che per ampiezza del coefficiente di assorbimento. Questo indica che l'ordine dei segmenti inclinati non influenza in modo significativo il comportamento acustico, e che ciò che conta è la coppia di angoli nel loro insieme, più che la loro sequenza. La geometria globale del collo, quindi, sembra prevalere sul senso di orientamento delle sue parti nel determinare la risposta risonante.

Infine, un'ulteriore analisi può essere condotta confrontando coppie di configurazioni che condividono un angolo fisso, come quelle con secondo tratto a 60° (ad esempio 30° - 60° e 45° - 60°) o con primo tratto a 60° (come 60° - 30° e 60° - 45°). In entrambe le coppie, la configurazione con angolo acuto pari a 30° mostra, nelle configurazioni rossa ($D=10$, $L=5$) e azzurra ($D=10$, $L=10$), frequenze di picco e coefficienti di assorbimento inferiori rispetto alla controparte con angolo di 45° . Una possibile spiegazione, da considerare come ipotesi coerente con il comportamento osservato, è che un angolo più acuto come 30° possa favorire una maggiore riflessione del fronte d'onda incidente, riducendo così l'energia effettivamente trasferita all'interno della cavità. Questo effetto potrebbe penalizzare l'efficacia dell'assorbitore, diminuendo la quantità di suono che attiva la risonanza e quindi limitando l'ampiezza del picco di assorbimento.

3.3.2 Confronto tra risultati sperimentali e modello FEM

La Figura 3.9 mostra il confronto tra i coefficienti di assorbimento $\alpha(\omega)$ ottenuti sperimentalmente e quelli calcolati tramite simulazione numerica FEM per un pannello metamateriale (AMM) costituito da quattro unità risonanti. Il pannello è composto da due risonatori con angoli del collo pari a 30° - 60° e da due con angoli 45° - 60° , disposti in modo simmetrico rispetto all'asse centrale. Le simulazioni sono state effettuate per due varianti dimensionali, caratterizzate dalla profondità della cavità pari a $D=5$ mm e $D=10$, mantenendo lo spessore totale del pannello costante pari a $L=10$ mm.

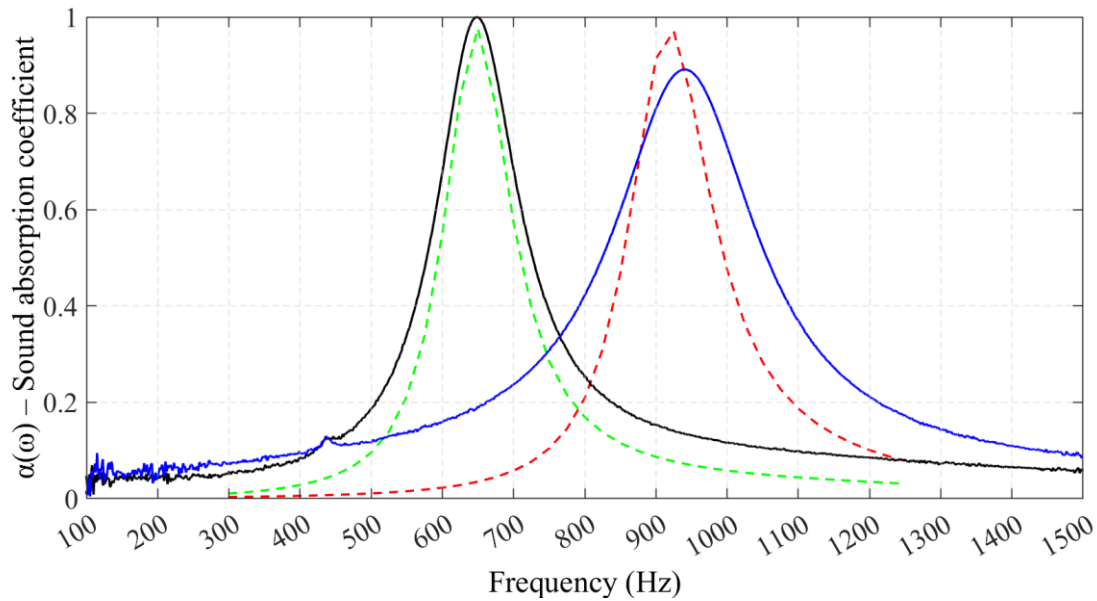


Figura 3.9 – Confronto tra i coefficienti di assorbimento $\alpha(\omega)$ ottenuti sperimentalmente (linee continue) e quelli previsti tramite simulazione FEM (tratteggiate). In particolare: la curva nera continua rappresenta il risultato sperimentale per $D=10$ mm, la curva verde tratteggiata rappresenta il risultato numerico FEM per $D=10$ mm, la curva blu continua rappresenta il risultato sperimentale per $D=5$ mm, la curva rossa tratteggiata rappresenta il risultato numerico FEM per $D=5$ mm.

L'accordo tra modello numerico e dati sperimentali risulta complessivamente buono: la posizione dei picchi di risonanza e la forma generale delle curve di assorbimento sono ben riprodotte dalle simulazioni FEM, in particolare per la configurazione con $D=10$ mm. Analogamente a quanto osservato per le celle unitarie, le divergenze residue tra modello FEM e misure sperimentali sono riconducibili principalmente a fattori geometrici non ideali, come la reale area del collo, la presenza di imperfezioni interne, le variazioni di rugosità superficiale e gli effetti dissipativi viscosi, che non vengono completamente riprodotti dal modello numerico. Anche in questo caso, il raggio nominale dei colli considerato in fase di progettazione è pari a $r = 3$ mm.

Rispetto ai risultati ottenuti sui risonatori singoli, si osserva qui un netto spostamento delle frequenze di risonanza verso valori più alti. Per la configurazione con $D=10$ mm, il massimo di assorbimento si verifica intorno ai 650 Hz, valore paragonabile o superiore alla frequenza più elevata riscontrata tra le celle unitarie (configurazione viola, con $D=5$ mm, $L=5$ mm). Ancora più marcato è lo spostamento nel caso del pannello con $D=5$ mm, dove il picco si colloca attorno ai 950 Hz. Questo incremento di frequenza può essere imputato a diversi fattori: l'accoppiamento acustico tra le cavità interne al pannello, la modifica delle condizioni di confinamento rispetto al caso isolato, e la presenza di una cavità posteriore condivisa che contribuisce ad aumentare la rigidità acustica complessiva del sistema. In particolare, la maggiore efficienza di accoppiamento tra le cavità e la disposizione

simmetrica delle celle può accorciare il tempo di transito dell'onda sonora nel collo, innalzando la frequenza di risonanza globale del sistema.

Dal punto di vista prestazionale, il comportamento del pannello mostra un chiaro miglioramento dell'efficacia di assorbimento rispetto alle celle singole. La curva sperimentale per $D=10$ mm raggiunge valori di $\alpha(\omega)$ prossimi all'unità, con un picco che sfiora il 100% di assorbimento, segno di una risonanza particolarmente efficiente. Questo risultato può essere giustificato proprio dalla minore dispersione dell'energia acustica all'esterno del sistema e dalla distribuzione simmetrica delle cavità, che favoriscono un trasferimento più efficace dell'energia sonora all'interno del sistema risonante, amplificando la risposta del metamateriale.

3.3.3 Considerazioni conclusive e prospettive applicative

Nel presente capitolo è stato affrontato in modo sistematico il processo di progettazione, modellazione, realizzazione e validazione sperimentale di un metamateriale fonoassorbente innovativo, basato su una configurazione geometrica a collo spezzato. Dopo aver introdotto i principi fisici che governano il comportamento acustico degli AMM è stata sviluppata una geometria in grado di ottimizzare le prestazioni di assorbimento a bassa frequenza senza aumentare lo spessore complessivo del dispositivo.

Sono stati implementati due modelli previsionali: uno analitico, implementato in MATLAB e basato sul metodo della matrice di trasferimento (TMM), e uno numerico, sviluppato in ambiente FEM tramite il software COMSOL Multiphysics. Entrambi i modelli sono stati calibrati per riprodurre il comportamento del sistema in condizioni realistiche, tenendo conto delle perdite visco-termiche nei colli risonanti.

Successivamente, sono stati prodotti mediante stampa 3D diversi campioni fisici, variando parametri geometrici come l'inclinazione dei due segmenti del collo (θ_1, θ_2), la profondità della cavità (D) e lo spessore complessivo (L) del campione. Le misure sperimentali, condotte in tubo di impedenza secondo la norma ISO 10534-2, hanno permesso di ottenere il coefficiente di assorbimento $\alpha(\omega)$ per ciascuna configurazione testata. I risultati ottenuti sono stati confrontati con le previsioni teoriche, sia per celle unitarie singole che per pannelli composti da quattro unità, analizzando in dettaglio l'influenza dei parametri geometrici sulla risposta in frequenza del sistema.

I risultati ottenuti evidenziano un'elevata coerenza tra i modelli previsionali e i dati sperimentali. In particolare, il modello analitico TMM si è dimostrato efficace nel descrivere la frequenza di risonanza, l'ampiezza e la forma generale delle curve di assorbimento delle celle unitarie, con differenze minime imputabili principalmente a irregolarità geometriche introdotte dal processo di stampa. L'introduzione di una tolleranza sul raggio del collo ($\pm 5\%$) ha permesso di

racchiudere le risposte sperimentali all'interno di involucri teorici realistici, confermando l'affidabilità del modello per la progettazione.

Anche il modello numerico FEM, sviluppato per simulare il comportamento del pannello completo a quattro celle, ha fornito risultati in buona concordanza con le misure sperimentali, sia in termini di posizione del picco di risonanza, sia per quanto riguarda la forma e l'intensità dell'assorbimento. Il pannello con cavità $D = 10$ mm ha mostrato valori di $\alpha(\omega)$ prossimi all'unità, evidenziando un comportamento risonante molto marcato e confermando l'efficienza del dispositivo nel trattenere e dissipare l'energia acustica.

Nel complesso, le analisi condotte hanno validato in modo robusto sia il modello analitico che quello numerico, dimostrando che la configurazione proposta è in grado di riprodurre con buona accuratezza il comportamento reale del metamateriale.

Il tipo di AMM a collo spezzato proposto può rappresentare una soluzione efficace per superare alcuni limiti strutturali dei sistemi tradizionali, in particolare in termini di spessore complessivo, modularità e integrazione architettonica. La possibilità di ottenere picchi di assorbimento a bassa frequenza con profondità contenute ($L \leq 10$ mm) lo rende particolarmente adatto a contesti in cui vincoli estetici e funzionali impediscono l'adozione di materiali porosi convenzionali o di risonatori di grande volume. La geometria spezzata consente inoltre di incrementare le perdite visco-termiche in modo controllato, migliorando l'efficienza dissipativa del sistema.

Grazie alla flessibilità progettuale offerta dai parametri geometrici indipendenti (θ_1, θ_2, D, L), è possibile modulare con precisione la frequenza di risonanza desiderata, adattando il dispositivo a specifiche esigenze acustiche. Questa caratteristica lo rende uno strumento estremamente versatile, capace di essere personalizzato per l'assorbimento selettivo di bande frequenziali critiche in diversi contesti applicativi.

In particolare, la compattezza strutturale del dispositivo, unita alla sua efficienza prestazionale, ne rende l'impiego particolarmente strategico all'interno di contesti culturali e performativi, ovvero in quegli ambienti dove coesistono esigenze acustiche elevate e vincoli di natura architettonica, estetica o storica. Teatri storici, chioschi monumentali, musei, gallerie d'arte, studi di registrazione e installazioni sonore temporanee costituiscono scenari applicativi in cui soluzioni convenzionali (basate su pannelli porosi o rivestimenti ad alto spessore) possono risultare inadeguate o non compatibili con la conservazione e l'integrità visiva dello spazio.

In questi casi, un assorbitore sottile, efficace e progettualmente adattabile come quello a collo spezzato può rappresentare un'opportunità per migliorare la qualità sonora senza alterare la fruizione architettonica o comprometterne il valore simbolico e funzionale. La possibilità di definire la frequenza target di assorbimento agendo sui parametri geometrici offre inoltre un ulteriore vantaggio

in termini di personalizzazione acustica, rendendo il sistema estremamente flessibile nell'adattarsi alle esigenze specifiche di ciascun luogo e tipologia di evento.

Nonostante i risultati ottenuti siano molto promettenti, alcune limitazioni meritano attenzione in vista di futuri sviluppi. In particolare, sarà necessario approfondire l'influenza delle tolleranze dimensionali derivanti dalla stampa 3D e delle irregolarità morfologiche del collo sul comportamento acustico reale del dispositivo, soprattutto in configurazioni operative più complesse. Inoltre, l'effetto dell'interazione tra più celle accoppiate all'interno di pannelli estesi potrebbe generare fenomeni di accoppiamento acustico non trascurabili, attualmente non pienamente considerati nei modelli analitici e numerici sviluppati.

I risultati ottenuti, insieme alla versatilità progettuale dimostrata dal dispositivo, aprono la strada a sviluppi futuri orientati all'ottimizzazione prestazionale e all'ampliamento degli scenari applicativi. Da un lato, sarà possibile raffinare ulteriormente il modello analitico e numerico per includere effetti dissipativi non lineari, irregolarità geometriche o configurazioni multi-risonanti. Dall'altro, l'adozione di tecniche di produzione avanzate, materiali a maggiore precisione o l'integrazione con sistemi attivi potrà espandere il potenziale di questi assorbitori in direzione di soluzioni acustiche intelligenti e su misura.

In particolare, l'approccio proposto in questo lavoro si presta a essere esteso a contesti reali di progettazione acustica sostenibile, con l'obiettivo di coniugare l'efficacia tecnica con l'integrazione estetico-architettonica. La configurazione a collo spezzato potrà essere ulteriormente esplorata come unità modulare per pannelli più ampi, o come componente replicabile in interventi a carattere temporaneo e reversibile. In sintesi, il sistema analizzato rappresenta una soluzione acustica compatta, efficiente e progettualmente controllabile, in grado di rispondere a requisiti prestazionali elevati pur mantenendo compatibilità con i vincoli fisici ed estetici degli spazi culturali più delicati.

CONCLUSIONE

Gli obiettivi iniziali della ricerca (analizzare la percezione sonora negli spazi culturali, valutare le prestazioni acustiche di corti storiche e sviluppare un metamateriale per l'assorbimento selettivo) sono stati affrontati attraverso un impianto metodologico coerente che integra misurazioni in situ, modellazione numerica e sperimentazione.

L'analisi *soundscape*, descritto nel primo capitolo, ha mostrato come la combinazione tra misure oggettive, indicatori psicoacustici e questionari secondo la ISO 12913 permetta di correlare in modo quantitativo percezioni soggettive e parametri fisici, dimostrando la solidità dell'approccio adottato. L'integrazione tra misure oggettive e giudizi soggettivi ha mostrato una coerenza complessiva elevata: all'aumentare dell'energia sonora e della variabilità spettrale e temporale cresce sistematicamente la percezione di caos, fastidio e instabilità. Le postazioni esposte alla viabilità urbana (*spot 1 e spot 3*) confermano questa relazione, mentre le aree più schermate e con minore complessità spettrale (postazione 2) risultano percepite come calme e piacevoli. Le aree con intensa attività sociale (punto 4) mantengono una buona accettabilità anche a livelli sonori elevati poiché le sorgenti risultano coerenti con la funzione dello spazio. Al contrario, zone tranquille ma acusticamente povere (*spot 5*) tendono a essere percepite come monotone, mentre le aree dominate da sorgenti meccaniche intermittenti (postazione 6) ricevono valutazioni negative per la loro scarsa integrazione con il contesto. La qualità percepita dipende quindi in modo diretto dalla relazione tra scena sonora e funzione dello spazio. L'integrazione tra misure oggettive e giudizi soggettivi mostra che l'intensità sonora non costituisce un indicatore sufficiente: la distribuzione spettrale, la coerenza funzionale delle sorgenti e la stabilità temporale del segnale determinano differenze percettive significative anche in presenza di livelli energetici simili. Nel complesso dell'ex Mattatoio emerge chiaramente che la compatibilità acustico-percettiva è legata alla capacità dello spazio di presentare un'identità sonora coerente con le pratiche culturali che ospita. Per questo motivo, gli interventi progettuali dovranno privilegiare la stabilizzazione della scena sonora, limitando le sorgenti incoerenti e valorizzando quelle pertinenti alle attività artistiche e sociali. Gli spazi a forte vocazione aggregativa possono tollerare livelli elevati se supportati da sorgenti congruenti e da uno spettro equilibrato, mentre le aree dominate da rumori meccanici intermittenti richiedono azioni correttive mirate. Nel complesso, l'approccio condotto in questo lavoro sullo studio del *soundscape* all'interno dell'ex Mattatoio di Testaccio conferma la necessità di integrare parametri fisici e percezione per guidare scelte progettuali realmente coerenti con la fruizione culturale e con la qualità dell'esperienza dell'utente.

La caratterizzazione acustica dei chiostrì, sviluppata nel secondo capitolo, ha dimostrato che l'applicazione adattata delle norme ISO 3382, unita alla modellazione tridimensionale e alle simulazioni multiscenario, consente di stimare in modo attendibile la risposta sonora di ambienti semiaperti privi di riferimenti consolidati. L'analisi condotta sui chiostrì di San Pietro in Vincoli e dell'ex Istituto Niccolò Tommaseo ha mostrato evidenze tecniche comuni che definiscono i limiti strutturali di questa tipologia architettonica. In entrambi i casi, la natura semiaperta e l'assenza di confinamento superiore rappresentano il principale vincolo acustico. La dispersione verticale dell'energia impedisce infatti il raggiungimento di tempi di riverbero compatibili con la musica riverberante e genera decadimenti tardivi scarsamente controllati. Il campo sonoro risulta fortemente eterogeneo: le zone prossime alla sorgente mantengono livelli energetici superiori, mentre le parti piú distanti presentano decadimenti piú rapidi e parametri di chiarezza (C_{80}) e definizione (D_{50}) generalmente bassi senza interventi specifici. Questa condizione iniziale risulta inadeguata per attività che richiedono intelligibilità, stabilità percettiva e omogeneità spaziale. Per entrambi i chiostrì studiati, le simulazioni multiscenario hanno mostrato come i quattro assetti analizzati rappresentino un'evoluzione progressiva del comportamento acustico. Lo scenario iniziale, privo di sedute, evidenzia livelli insufficienti di tutti i parametri acustici. L'introduzione di sedute poco assorbenti riduce leggermente il T_{30} ma non risolve la disomogeneità globale. Le sedute molto assorbenti producono invece un miglioramento netto nella platea: i tempi di riverbero si avvicinano all'intervallo ottimale per il parlato e i parametri C_{80} e D_{50} aumentano in modo significativo, pur restando condizionati dalla perdita energetica verso l'alto. La soluzione piú efficace è risultata lo scenario con sedute assorbenti e pannelli riflettenti, capace di incrementare l'energia precoce nelle ultime file, migliorare l'uniformità del campo sonoro all'interno della platea e garantire condizioni adeguate per *performance* basate sul parlato. L'analisi congiunta dei due chiostrì consente di definire criteri generali applicabili anche ad altri spazi semiaperti. Il tipo di struttura architettonica impone un decadimento energetico non compatibile con la musica riverberante, rendendo l'intelligibilità il parametro progettuale prioritario. L'uniformità acustica è raggiungibile solo attraverso interventi localizzati nella platea, mentre le aree periferiche restano strutturalmente svantaggiate. La prestazione ottimale va quindi misurata nel settore di ascolto, non sull'intero volume, e gli interventi piú efficaci risultano quelli che combinano forte assorbenza e superfici riflettenti mirate. Nel complesso, i due chiostrì confermano che gli spazi semiaperti non possono raggiungere buone prestazioni musicali di tipo riverberante, ma possono essere ottimizzati in modo efficace per il parlato e per attività culturali che richiedono chiarezza, definizione e stabilità percettiva.

Il percorso dedicato ai metamateriali fonoassorbenti acustici, sviluppato nel terzo capitolo, ha verificato in modo sistematico l'efficacia della sequenza progettuale, analitica, numerica e sperimentale applicata al risonatore a collo spezzato. L'integrazione tra modello analitico tramite Transfer Matrix Method (TMM), simulazione agli elementi finiti (FEM) e misure sperimentali in tubo di impedenza ha prodotto risultati coerenti e convergenti, confermando la solidità dell'approccio e la validità del dispositivo proposto. Il modello TMM ha descritto con precisione la frequenza di risonanza, l'ampiezza del coefficiente di assorbimento e la forma della curva $\alpha(\omega)$, dimostrando un'elevata sensibilità alle variazioni geometriche introdotte nei diversi campioni. La simulazione FEM applicata al pannello completo a quattro celle ha riprodotto con accuratezza la curva di assorbimento acustico e la posizione del picco risonante, validando il comportamento del sistema multi-cella e l'effetto combinato delle diverse profondità di cavità e dei diversi angoli del collo spezzato. Le misure sperimentali ottenute in condizioni controllate confermano un comportamento stabile e ripetibile per tutte le configurazioni testate, mostrando un assorbimento efficace alle basse frequenze nonostante gli spessori estremamente ridotti (profondità pari a 5–10 mm). Questo risultato supera i limiti dimensionali dei risonatori convenzionali e dimostra la capacità della geometria spezzata di generare risonanze selettive anche in volumi molto contenuti. Alcune discrepanze residue, legate alle tolleranze del processo FDM, alle imperfezioni del collo e ai potenziali accoppiamenti tra celle adiacenti, non compromettono il comportamento globale, ma suggeriscono margini di ottimizzazione verso modelli più accurati e processi di stampa a maggiore risoluzione. Dal punto di vista applicativo, la compattezza, la sintonizzabilità geometrica e la modularità del sistema lo rendono adatto a contesti culturali e performativi in cui sono richiesti interventi reversibili, leggeri e non invasivi. Il risonatore può essere integrato in pannelli mobili, superfici temporanee, elementi scenografici o moduli architettonici sottili, risultando compatibile con chioschi, musei, teatri storici e spazi espositivi dove gli interventi tradizionali risultano impraticabili. La possibilità di definire con precisione la banda di assorbimento agendo indipendentemente su angoli, profondità e lunghezze del collo consente inoltre configurazioni multistrato e applicazioni mirate al controllo selettivo delle basse frequenze. Il collo spezzato rappresenta quindi un contributo originale rispetto allo stato dell'arte: offre prestazioni elevate con spessori ridotti, garantisce un controllo risonante non ottenibile con geometrie tradizionali e permette integrazioni architettoniche coerenti con i requisiti estetici e conservativi dei siti culturali. Il lavoro conferma così la validità del metamateriale sviluppato e ne evidenzia il potenziale come soluzione acustica compatta, efficiente e pienamente compatibile con le esigenze degli spazi performativi contemporanei.

I risultati mostrano che i tre assi della ricerca affrontano aspetti diversi ma convergono sugli stessi meccanismi acustici che determinano la qualità dell'esperienza sonora. L'analisi del *soundscape* evidenzia l'importanza di distribuzione spettrale, stabilità temporale e coerenza delle sorgenti per la qualità percepita. La caratterizzazione dei chiostrì conferma sperimentalmente questi fenomeni, mostrando come geometria, apertura zenitale e dispersione energetica influenzino intelligibilità, chiarezza e uniformità in ambienti semiaperti. Lo sviluppo dei metamateriali a collo spezzato interviene sulle componenti fisiche più rilevanti per l'ascolto, permettendo un controllo selettivo dell'energia precoce e dell'assorbimento nelle bande critiche. Ne emerge una continuità tra percezione, risposta ambientale e intervento tecnologico, che consente soluzioni acustiche coerenti con il contesto e calibrate sugli effettivi scenari d'uso. La sintesi dei tre assi definisce infine un modello metodologico versatile per la progettazione acustica degli spazi culturali, orientato alla qualità percepita, alla fruibilità e alla sostenibilità.

Ogni ambito analizzato presenta tuttavia limiti specifici. Nel *soundscape*, le percezioni raccolte riflettono le condizioni sonore e la composizione del campione nel giorno della misurazione, impedendone l'estensione automatica ad altri contesti urbani o a popolazioni differenti. Nei chiostrì, la risposta acustica è fortemente determinata da forma, dimensione e materiali, e i risultati non possono essere trasferiti direttamente a corti con configurazioni diverse. Per i metamateriali, la validazione è solida ma riferita a geometrie specifiche: l'applicazione su scala reale richiede ulteriori verifiche su pannelli più estesi, prove in situ e valutazioni sulla durabilità dei materiali.

Le prospettive future riguardano tre direzioni principali. Nel *soundscape*, l'integrazione tra misure oggettive e dati soggettivi potrà condurre allo sviluppo di modelli predittivi acustico-percettivi utili alla progettazione preventiva di eventi e allestimenti culturali. Nei chiostrì, l'ampliamento dei casi studio permetterà di definire criteri progettuali replicabili per interventi reversibili destinati al parlato, alla musica amplificata o a installazioni performative. Per i metamateriali, i passi futuri includono test in scala architettonica, integrazioni in allestimenti museali o temporanei e la progettazione di dispositivi personalizzati per specifiche bande critiche. Tale percorso potrà orientare il *design* acustico di musei, corti storiche e spazi performativi verso soluzioni sostenibili, adattive e coerenti con l'identità dei luoghi.

La tesi sviluppa tre contributi principali nel campo dell'acustica applicata ai contesti culturali, affrontando in modo coordinato gli aspetti percettivi, oggettivi e progettuali degli spazi dedicati alla fruizione artistica.

Il primo contributo riguarda l'analisi *soundscape* in un ambiente urbano e culturale complesso come l'ex Mattatoio, dove misure psicoacustiche, parametri oggettivi e valutazioni soggettive sono stati combinati per interpretare la qualità sonora in presenza di variabilità sociale, sorgenti multiple e

dinamiche d'uso eterogenee. L'impiego del *soundscape* come strumento progettuale mostra come la percezione degli utenti possa orientare scelte relative a percorsi, configurazioni performative e allestimenti temporanei, fornendo un supporto operativo per interventi mirati alla qualità esperienziale.

Il secondo contributo riguarda la definizione di criteri acustici per chiostrì storici semiaperti, spazi privi di riferimenti normativi consolidati. L'applicazione adattata delle norme ISO 3382, integrata con modellazione tridimensionale e simulazioni multiscenario, ha permesso di descrivere con buona affidabilità la risposta acustica di questi ambienti e di identificare i meccanismi che limitano intelligibilità, chiarezza e uniformità. La ricerca propone strategie reversibili basate su interventi localizzati capaci di migliorare la fruizione culturale senza alterare la morfologia storica delle corti.

Il terzo contributo consiste nella progettazione, modellazione e validazione sperimentale di un metamateriale acustico innovativo con collo spezzato, pensato per ottenere assorbimento selettivo a bassa frequenza con ingombri minimi. La convergenza tra modello analitico, simulazione FEM e prove sperimentali dimostra l'efficacia del dispositivo e la sua potenziale integrazione in pannelli architettonici o allestimenti temporanei, offrendo una soluzione non invasiva per il controllo acustico in siti storici o performativi.

Complessivamente, i risultati della tesi mostrano come l'acustica sostenibile possa contribuire alla valorizzazione del patrimonio culturale, migliorando la qualità sonora senza compromettere l'identità architettonica dei luoghi. L'integrazione di tecnologie leggere, interventi reversibili e materiali avanzati consente di conciliare esigenze estetiche, funzionali e percettive, delineando un approccio progettuale sensibile al contesto e orientato al benessere dell'utente.

Il percorso sviluppato evidenzia la forza dell'interdisciplinarietà: ingegneria acustica, psicoacustica, studi dello spettacolo e progettazione culturale convergono nella definizione di strumenti più efficaci per comprendere e ottimizzare gli spazi performativi contemporanei. La tesi conferma che la qualità sonora non è solo un parametro tecnico, ma una componente culturale fondamentale, capace di influenzare identità e fruibilità degli ambienti destinati alle arti.

BIBLIOGRAFIA

- Adams, M., N. Bruce, W. Davies, R. Cain, P. Jennings e A. Carlyle, “Soundwalking as a Methodology for Understanding Soundscapes”, «Proceedings of the Institute of Acoustics», 2008.
- Aletta, Francesco, Bhan Lam, Cynthia Tarlao e Andrew Mitchell, “Introduction to the Special Issue on: Advances in Soundscape: Emerging Trends and Challenges in Research and Practice”, «The Journal of the Acoustical Society of America», giugno 2025.
- Aletta, Francesco, Claudia Guattari, Luca Evangelisti, Francesco Asdrubali, Tin Oberman e Jian Kang, “Exploring the Compatibility of ‘Method A’ and ‘Method B’ Data Collection Protocols Reported in the ISO/TS 12913-2:2018 for Urban Soundscape via a Soundwalk”, «Applied Acoustics», vol. 155, 2019, pp. 190–203.
- Aletta, Francesco, Ke Zhou, Andrew Mitchell e Jian Kang, “Exploring the Relationships Between Soundscape Quality and Public Health Using a Systems Thinking Approach”, «Building and Environment», febbraio 2025.
- Aletta, Francesco, Francesco Asdrubali, Maria Rosaria De Blasiis, Luca Evangelisti e Claudia Guattari, “Influence of Soundscape in the Experience of an Urban Area: A Case Study in Rome”, «Human Factors in Architecture, Sustainable Urban Planning and Infrastructure», vol. 58, 2022, pp. 159–164.
- Aletta, F., J. Kang e Ö. Axelsson, “Soundscape Descriptors and a Conceptual Framework for Developing Predictive Soundscape Models”, «Landscape and Urban Planning», vol. 149, 2016, pp. 65–74.
- Aletta, Francesco, Stefano Brinchi, Stefano Carrese e Sergio Maria Patella, “Analysing Urban Traffic Volumes and Mapping Noise Emissions in Rome (Italy) in the Context of Containment Measures for the COVID-19 Disease”, «Noise Mapping», agosto 2020.
- Allard Jean e Nouredine Atalla, *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials*, New York, Wiley, 2009.
- Almagro-Pastor, José A., Rafael García-Quesada, Jerónimo Vida-Manzano, Francisco J. Martínez-Irureta e Ángel F. Ramos-Ridao, “The Acoustics of the Palace of Charles V as a Cultural Heritage Concert Hall”, «Acoustics», vol. 4, n. 3, 2022, pp. 800–820.
- Almagro-Pastor, José Antonio, Jerónimo Vida-Manzano, Rafael García-Quesada e Ángel Fermín Ramos-Ridao, “Soundscape Approach Applied to a Heritage Open-Air Concert Hall: The Case of the Corral del Carbón in Granada”, «Building Acoustics», vol. 32, n. 1, 2025, pp. 143–163.

- Almeida, Filipe, Jaime Ramis, Luís Godinho e Pedro Amado-Mendes, “Low-Frequency Sound Absorption of a Metamaterial with Symmetrical-Coiled-Up Spaces”, «Applied Acoustics», vol. 172, 2021, p. 107636.
- Almeida, Gildean do N., Erasmo F. Vergara, Leandro R. Barbosa, Arcanjo Lenzi, Paulo H. Mareze e Robert S. Birch, “Acoustic Analysis of a Metasurface for Normal and Random Incidence Sound Waves”, «Physics Letters A», vol. 451, 2022, art. 128417.
- Armellini, M., *Le chiese di Roma dal secolo IV al XIX*, Roma, Tipografia Vaticana, 1891.
- Asdrubali, Francesco, Barbara Ferracuti, Lidia Lombardi e Gianluca Grazieschi, “A Review of Structural, Thermo-Physical, Acoustical, and Environmental Properties of Wooden Materials for Building Applications”, «Building and Environment», vol. 114, 2017, pp. 307–332.
- Asdrubali, Francesco, Claudia Guattari, Luca Evangelisti, Paola Marrone, Federico Orsini e Gianluca Grazieschi, “Urban Soundscape Analysis: The Case Study of the Department of Human Arts of Roma Tre University”, in *Proceedings of the 24th International Congress on Sound and Vibration (ICSV24)*, London, IIAV, 2017.
- Asdrubali, Francesco, Giorgio Baldinelli, Brigitte Schulte-Fortkamp e Francesco D’Alessandro, “From the Soundscape to the Architectural Redevelopment of an Outdoor Public Space”, in *Proceedings of Forum Acusticum 2014*, Krakow, 2014.
- Atalla Nouredine e François Sgard, “Acoustic Modeling of Porous Materials”, «Journal of Sound and Vibration», vol. 303, 2007, pp. 195–208.
- Autodesk Inc., *AutoCAD® (Versione 2024)* [Software], San Rafael (CA), Autodesk Inc., 2024, disponibile su <https://www.autodesk.com>.
- Axelsson, Ö., M. E. Nilsson e B. Berglund, “A Principal Components Model of Soundscape Perception”, «Journal of the Acoustical Society of America», vol. 128, n. 5, 2010, pp. 2836–2846.
- Barron, M., *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, London, E & FN Spon, 1993.
- Bartoli, Carlo, Giacomo Salvadori, Tommaso D’Orazio e Francesco Asdrubali, “Analisi delle Caratteristiche Acustiche di Alcuni Teatri all’Italiana Toscani”, «Rivista Italiana di Acustica», vol. 49, n. 1, 2025, pp. 71–86.
- Begault, D. R., *3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia*, Academic Press, 2000.
- Beranek, Leo L., *Acoustics: Sound Fields and Transducers*, London, Academic Press, 2012.
- Beranek, Leo L., *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture* (2nd ed.), New York, Springer, 2004.

- Berggren, Mats, Andreas Bernland e Daniel Noreland, “Acoustic Boundary Layers as Boundary Conditions”, «Journal of Computational Physics», vol. 371, 2018, pp. 633–650.
- Blauert, J., *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*, MIT Press, 1997.
- Brambilla, Giovanni, Veronica Gallo, Francesco Asdrubali e Francesco D’Alessandro, “The Perceived Quality of Soundscape in Three Urban Parks in Rome”, «Journal of the Acoustical Society of America», vol. 134, n. 1, 2013, pp. 808–815.
- Bo, E., A. Astolfi, A. Pellegrino, D. Pelegrin-Garcia, G. E. Puglisi, L. Shtrepi e M. Rychtarikova, “The modern use of ancient theatres related to acoustic and lighting requirements: Stage design guidelines for the Greek theatre of Syracuse”, «Energy and Buildings», 95 (2015), pp. 106–115.
- Bradley J. S. e Y. K. Oh, “An acoustical comparison of two atrium spaces”, in *Proceedings of Acoustics Week in Canada 1996*, Calgary, National Research Council of Canada, 1996
- Brown, A. L., J. Kang e T. Gjestland, “Towards Standardization in Soundscape Preference Assessment”, «Applied Acoustics», vol. 72, 2011, pp. 387–392.
- Cai, Chao e Cheuk Ming Mak, “Noise Attenuation Capacity of a Helmholtz Resonator”, «Advances in Engineering Software», vol. 116, 2018, pp. 60–66.
- Carbajo, José A., Jaime Ramis e Luís Godinho, “Multi-Layer Perforated Panel Absorbers with Oblique Perforations”, «Applied Physics Letters», vol. 117, 2020.
- Carbajo, Jesús, Jaime Ramis, Luís Godinho, Paulo Amado-Mendes e Jesús Alba, “A Finite Element Model of Perforated Panel Absorbers Including Viscothermal Effects”, «Applied Acoustics», vol. 90, 2015, pp. 1–8.
- Carbajo, José A., S. Ghaffari Mosanenzadeh, Seong Kim e Nicholas X. Fang, “Sound Absorption of Acoustic Resonators with Oblique Perforations”, «Applied Physics Letters», vol. 116, 2020, p. 054101.
- Carvalho, Antonio P. O. e Anabela P. B. Carvalho, “Acoustic Characterization of Historic Cloisters in Portugal”, «Applied Acoustics», vol. 57, 1999, pp. 265–274.
- Carvalho, Antonio P. O. e S. R. C. Vilela, “Acoustic Characterization of Rehabilitated Cloisters”, «Journal of Sound and Vibration», vol. 241, 2001, pp. 435–446.
- Che Din, Nazli, Tio Seng Zhi e Chia Keng Soon, “Evaluation of Acoustical Performance for Atrium Design with Respect to Skylight Geometry and Material in the Tropics”, «Pertanika Journal of Science & Technology», vol. 30, n. 4, 2022, pp. 2983–2997.

- Cummer, Steven A., Johan Christensen e Andrea Alù, “Controlling Sound with Acoustic Metamaterials”, «Nature Reviews Materials», vol. 1, n. 3, 2016, p. 16001.
- D’Orazio, Tommaso, “Analisi Sperimentali e Numeriche di Cristalli Sonici Utilizzati in Barriere Antirumore”, «Enviroments», 2024.
- Daniel, P. e R. Weber, “Psychoacoustical Roughness: Implementation of an Optimized Model”, «Acustica», vol. 83, 1997, pp. 113–123.
- Drever, J. L., “Listening as Methodological Tool: Sounding Soundwalking”, *Soundwalking Methodology Guide*, 2019.
- Ettouney Sayed M. e Fergus R. Fricke, “Courtyard acoustics”, «Applied Acoustics», vol. 6, n. 2, 1973, pp. 119–132.
- Fastl, Hugo ed Eberhard Zwicker, *Psychoacoustics: Facts and Models*, Berlin, Springer, 2007.
- Fiorini, Costanza Vittoria, Miriam Di Matteo, A. Tarsitano e Andrea Vallati, “Acoustic Outcome of Refurbishing an Accommodation Building toward LEED and WELL Certifications: Guidelines for Effective Interventions Prioritization”, in *10th Convention of the European Acoustics Association*, gennaio 2022.
- Fiorini, Costanza Vittoria, Miriam Di Matteo, Anna Tarsitano e Andrea Vallati, “Acoustic Performance in Accommodation Buildings: From LEED and WELL Application to the Development of an Acoustic Classification Method and a Priority Index”, *preprint*, gennaio 2024.
- Fiorini, Costanza Vittoria, “Railway Noise in Urban Areas: Assessment and Prediction on Infrastructure Improvement Combined with Settlement Development and Regeneration in Central Italy”, «Applied Acoustics», gennaio 2022.
- Fang, Nicholas, Dongjuan Xi, Jianhong Xu, Manos Ambati, Wanchun Srituravanich, Chunguang Sun e Xiang Zhang, “Ultrasonic Metamaterials with Negative Modulus”, «Nature Materials», vol. 5, 2006, pp. 452–456.
- Flores-Villa, Lorna, Tin Oberman, Claudia Guattari e Francesco Aletta, “Exploring Relationships between Soundscape and Lightscape Perception: A Case Study with Onsite Data Collection around the Colosseum and Fori Imperiali in Rome”, «Lighting Research and Technology», marzo 2023, pp. 1–14.
- Fusaro, Gioia, Jian Kang, Francesco Aletta e Francesco D’Alessandro, “A Prototype of a Street Furniture Element for Soundscape Management”, in *Proceedings of the 23rd International Congress on Sound and Vibration (ICSV 2016)*, Atene, 2016.

- Gori, Paola, Claudia Guattari, Francesco Asdrubali, Alessandro Toscano et al., “Sustainable Acoustic Metasurfaces for Sound Control”, «Sustainability», vol. 8, n. 2, 2016, art. 107.
- Gori, Paola, Claudia Guattari, Luca Evangelisti e Francesco Asdrubali, “Layered Acoustic Structures with Equally Phased Elements”, «Acoustics», vol. 7, n. 1, 2025, art. 12.
- Guastavino, C., B. Katz, J. Polack, D. J. Levitin e D. Dubois, “Ecological Validity of Soundscape Reproduction”, «Acta Acustica united with Acustica», vol. 91, 2005, pp. 333–341.
- Guattari, Claudia, Paola Gori, Roberto De Lieto Vollaro e Filiberto Bilotti, “Robustness of Acoustic Scattering Cancellation to Parameter Variations”, «Sustainability», vol. 6, n. 7, 2014, pp. 4416–4425.
- Guattari, Claudia, Francesco Aletta, Lorna Flores-Villa e Francesco Asdrubali, “Influenza del Paesaggio Sonoro e Luminoso nella Percezione dei Beni Culturali: Proposta Metodologica per un Caso Studio a Roma”, in *Proceedings of the 47° Convegno Nazionale dell’Associazione Italiana di Acustica*, 2021.
- HEAD acoustics GmbH, *ArtemiS Suite* (versione 15.2) [Software], disponibile su <https://www.head-acoustics.com>.
- Hornikx, Maarten, *Numerical Modelling of Sound Propagation to Closed Urban Courtyards*, Göteborg, Chalmers University of Technology, 2009.
- Iannace, Gino, “The Use of Historical Courtyards for Musical Performances”, «Building Acoustics», vol. 23, 2016, pp. 207–222.
- International Organization for Standardization, *ISO 10534-2:1998: Acoustics – Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes – Part 2: Transfer-Function Method*, Geneva, ISO, 1998.
- International Organization for Standardization, *ISO 12913-1:2014: Acoustics – Soundscape – Part 1: Definition and Conceptual Framework*, Geneva, ISO, 2014.
- International Organization for Standardization, *ISO 12913-2:2018: Acoustics – Soundscape – Part 2: Data Collection and Reporting Requirements*, Geneva, ISO, 2018.
- International Organization for Standardization, *ISO 12913-3:2019: Acoustics – Soundscape – Part 3: Data Analysis*, Geneva, ISO, 2019.
- International Organization for Standardization, *ISO 1996-1:2016: Acoustics – Description, Measurement and Assessment of Environmental Noise – Part 1*, Geneva, ISO, 2016.
- International Organization for Standardization, *ISO 226:2023: Acoustics – Normal Equal-Loudness-Level Contours*, Geneva, ISO, 2023.

- International Organization for Standardization, *ISO 3382:2008: Acoustics – Measurement of Room Acoustic Parameters*, Geneva, ISO, 2008.
- International Organization for Standardization, *ISO 3382-1:2009: Acoustics – Measurement of Room Acoustic Parameters – Part 1: Performance Spaces*, Geneva, ISO, 2009.
- International Organization for Standardization, *ISO 3382-2:2008: Acoustics – Measurement of Room Acoustic Parameters – Part 2: Reverberation Time in Ordinary Rooms*, Geneva, ISO, 2008.
- Jambrošić, Kristian, Bojan Ivančević e Marjan Sikora, “Acoustic Properties of an Old Stone Atrium Used for Concerts”, «Acta Acustica united with Acustica», vol. 91, 2005, pp. 330–336.
- Jing, Xia, Yanhua Meng e Xiaodong Sun, “Soft Resonator of Omnidirectional Resonance for Acoustic Metamaterials with a Negative Bulk Modulus”, «Scientific Reports», vol. 5, 2015, p. 15377.
- Kang, Jian e Brigitte Schulte-Fortkamp (a cura di), *Soundscape and the Built Environment*, Boca Raton, CRC Press, 2016.
- Kim, M. J., H. S. Yang e J. Kang, “A Case Study on Controlling Sound Fields in a Courtyard by Landscape Designs”, «Landscape and Urban Planning», 123 (2014), pp. 10–20.
- Kuruköşe Cal, Hatice, Francesco Aletta e Jian Kang, “Integration of Soundscape Assessment and Design Principles into International Standards and Guidelines for Learning Environment Acoustics”, «Building Acoustics», luglio 2025.
- Kuruköşe Cal, Hatice, Francesco Aletta, Jian Kang e Peter Clarke, “Student Perception of School Soundscapes and Wellbeing: A Mixed Methods Examination of Natural and Musical Sounds”, «Building and Environment», giugno 2025.
- Kuttruff, Heinrich, *Room Acoustics*, 6th ed., Boca Raton, CRC Press, 2016.
- Langfeldt, Frank, Henrik Hoppen e Wolfgang Gleine, “Broadband Low-Frequency Sound Transmission Loss Improvement of Double Walls with Helmholtz Resonators”, «Journal of Sound and Vibration», vol. 476, 2020, p. 115309.
- Larrosa Navarro María, Pedrero González Antonio e de la Prida Caballero Daniel, “Caracterización acústica de los espacios sonoros del Real Monasterio de San Lorenzo del Escorial”, in *Actas del 53º Congreso Español de Acústica – TECNIACÚSTICA 2022 / XII Congreso Ibérico de Acústica*, Elche, Sociedad Española de Acústica, 2022.

- Lee, Sung Hoon, Chul Min Park, Yong Moon Seo, Zi Gao Wang e Chul Kyu Kim, “Composite Acoustic Medium with Simultaneously Negative Density and Modulus”, «Physical Review Letters», vol. 104, 2010, p. 054301.
- Loewenthal, K.-M., *An Introduction to Psychological Tests and Scales*, Hove, Psychology Press, 2001.
- Lombardi, Ilaria, Gino Iannace e Amelia Trematerra, “The Acoustic of a Courtyard”, «Building Acoustics», vol. 26, 2019, pp. 237–249.
- Long, M., *Architectural Acoustics*, 2nd ed., Amsterdam, Elsevier, 2014.
- Liu, Zhengyou, Xiaogang Zhang, Yiwei Mao, Y. Y. Zhu, Zhen Yang, C. T. Chan e Ping Sheng, “Locally Resonant Sonic Materials”, «Science», vol. 289, 2000, pp. 1734–1736.
- Macpherson, E. A. e J. C. Middlebrooks, “Listener Weighting of Cues for Lateral Angle: The Duplex Theory of Sound Localization Revisited”, «Journal of the Acoustical Society of America», vol. 111, 2002, pp. 2219–2236.
- MathWorks, *MATLAB® (Versione R2023a)* [Software], Natick (MA), MathWorks, 2023.
- Mareze, Paulo H., Olavo M. Silva, William D’A. Fonseca, Eric Brandão e Luís Godinho, “Optimization of Acoustic Porous Material Absorbers Modeled as Rigid Multiple Microducts Networks: Metamaterial Design Using Additive Manufacturing”, «Journal of Sound and Vibration», vol. 596, 2025, art. 118739.
- Meyer, Jürgen, *Acoustics and the Performance of Music*, 5^a ed., New York, Springer, 2009.
- Middlebrooks, J. C. e D. M. Green, “Sound Localization by Human Listeners”, «Annual Review of Psychology», vol. 42, 1991, pp. 135–159.
- Møller, H., D. Hammershøi, C. B. Jensen e M. F. Sørensen, “Evaluation of Artificial Heads in Listening Tests”, «Journal of the Audio Engineering Society», vol. 44, 1996, pp. 445–469.
- Møller, H., M. F. Sørensen, C. B. Jensen e D. Hammershøi, “Binaural Technique: Do We Need Individual Recordings?”, «Journal of the Audio Engineering Society», vol. 43, 1995, pp. 448–460.
- Molerón Miguel, Simon Félix, Vincent Pagneux e Olivier Richoux, “Low-Frequency Acoustic Resonances in Urban Courtyards”, «Journal of the Acoustical Society of America», vol. 135, n. 1, 2014, pp. 74–82.
- Munjal, M. L., *Acoustics of Ducts and Mufflers*, New York, Wiley, 2014.
- Naeemae Rozhin e Zühre Sü Gül, “Assessment of reverberation perception in atrium spaces”, in *Proceedings of Euronoise 2021*, Madeira, European Acoustics Association, 2021, pp. 1840–1849.

- ODEON A/S, *ODEON Room Acoustics Software* (Versione 17.0) [Software], Lyngby (DK), ODEON A/S, 2023.
- Opiela, K. C., Tomasz G. Zieliński e Keith Attenborough, “Limitations on Validating Slitted Sound Absorber Designs through Budget Additive Manufacturing”, «Materials & Design», vol. 218, 2022, art. 110703.
- Öztürk, Zeynep Sena Akdemir, Jian Kang e Francesco Aletta, “The Influence of Soundwalk Direction on Healthy Street Metrics”, in *Forum Acusticum Euronoise 2025*, giugno 2025.
- Öztürk, Zeynep Sena Akdemir, Jian Kang e Francesco Aletta, “Scoping Review of Soundscape Research in Urban Streets”, *poster*, Urban Sound Symposium 2025, aprile 2025.
- Payne, S. R., W. J. Davies e M. D. Adams, “Research into the Practical and Policy Applications of Soundscape Concepts in Urban Areas”, «Proceedings of the Institute of Acoustics», vol. 31, 2009.
- Portoghesi, Paolo, *Roma del Rinascimento*, Roma, Laterza, 1976.
- Rachman, Zulfi, Francesco Aletta e Jian Kang, “Advancing Soundscape Assessment in Open-Plan Offices: Insights from Expert Focus Groups”, «Building Acoustics», giugno 2025.
- Ramaccia, Davide, Claudia Guattari, Filiberto Bilotti e Alessandro Toscano, “Metamaterial Split-Ring Resonators for Retrieval of Soil Electromagnetic Properties”, in *Proceedings of the 2013 7th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (METAMATERIALS 2013)*, 2013.
- Ramos, Denilson Del Teto, Francesco Pompoli, Cristina Marescotti e Paulo Mareze, “Modelling the Sound Transmission Properties of a Side-Branch Acoustic Metamaterial Using a Rigid-Frame Porous Model”, in *10th Convention of the European Acoustics Association*, gennaio 2022.
- Ramos, Denilson Riccelli Del Teto, *Multi-Resonant Metamaterials for Sound Absorption and Reduction in Building Applications*, Coimbra, University of Coimbra, 2024.
- Ramos, Denilson Del Teto, Luís Godinho, Paulo Amado Mendes e Paulo Mareze, “Broadband Low-Frequency Bidimensional Honeycomb Lattice Metastructure Based on the Coupling of Subwavelength Resonators”, «Applied Acoustics», settembre 2022.
- Ramos, Denilson, Francesco Pompoli, Cristina Marescotti, Luís Godinho, Paulo Amado-Mendes e Paulo Mareze, “Modelling the Effective Sound Propagation Properties of a Hexagonal Acoustic Metamaterial Using a Dissipative Equivalent-Fluid Approach under Different Termination Conditions”, «Journal of Sound and Vibration», vol. 598, 2025, art. 118855.

- Raimbault, Myriam e Danièle Dubois, “Urban Soundscapes: Experiences and Knowledge”, «Cities», vol. 22, 2005, pp. 339–350.
- Romero-García, Vicente, Georgios Theocharis, Olivier Richoux, André Merkel, Vincent Tournat e Vincent Pagneux, “Perfect and Broadband Acoustic Absorption by Critically Coupled Sub-Wavelength Resonators”, «Scientific Reports», vol. 6, 2016, p. 19519.
- Rychtáriková Monika, Vojtech Chmelík, Daniel Urbán e Andrea Vargová, “Acoustic conditions in the atrium of Slovak philharmonic”, «Procedia Engineering», vol. 155, 2016, pp. 464–471.
- Ruggeri, Paolo, Francesco Peron, Nicola Granzotto e Paolo Bonfiglio, “Analisi sperimentale parametrica sull’assorbimento acustico di risonatori a cavità”, in *Proceedings of the 41st National Conference of the Italian Acoustical Association (AIA)*, Pisa, 2014.
- Schafer, R. Murray, *The Tuning of the World*, New York, Knopf, 1977.
- Schafer, R. Murray, *The Soundscape: Our Sonic Environment and the Tuning of the World*, Rochester (VT), Destiny Books, 1993.
- Sberna, Achille, Francesco Asdrubali e Brigitte Schulte-Fortkamp, “Piazza del Marchese Paolo: An Architectural and Soundscape Design to Redevelop an Outdoor Public Space”, «Journal of the Acoustical Society of America», vol. 130, n. 4, 2011, p. 2532.
- Stinson, Michael R., “The Propagation of Plane Sound Waves in Narrow and Wide Circular Tubes, and Generalization to Uniform Tubes of Arbitrary Cross-Sectional Shape”, «Journal of the Acoustical Society of America», vol. 89, n. 2, 1991, pp. 550–558.
- Sousa, Laura Lourenço de, Luís Pereira, David Mg. e Luís Godinho, “Experimental Analysis and Simulation of a Porous Absorbing Layer for Noise Barriers”, «Applied Sciences», febbraio 2023.
- SIUSA – Sistema Informativo Unificato per le Soprintendenze Archivistiche, *Scuola elementare statale Niccolò Tommaseo*, Ministero della Cultura, disponibile su <https://siusa-archivi.cultura.gov.it/cgi-bin/pagina.pl?Chiave=80533&TipoPag=prodente>.
- Sultana Nadia, Thirion Marco A. Rico, Maedot S. Andargie e Marianne F. Touchie, “Acoustic Impact on Work and Study Spaces Caused by Multifunctional Use of an Atrium in an Educational Building”, «ASHRAE Transactions», vol. 127, n. 2, 2021
- Thompson, Emily, *The Soundscape of Modernity*, Cambridge (MA), MIT Press, 2002.
- Titi, F., *Descrizione delle Pitture, Sculture e Architetture esposte in Roma*, Roma, 1763.
- Truax, Barry, *Handbook for Acoustic Ecology*, Cambridge Street Publishing, 1999.

- Xu, Xinyan, Huan Tong e Jian Kang, “Soundscape Research in Wind Farms: A State-of-Art Review”, «Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control», vol. 0, 2025, pp. 1–18.
- Urbán Daniel, Júlia Zrneková, Peter Zaťko, Carl Maywald e Monika Rychtáriková, “Acoustic comfort in atria covered by novel structural skins”, «Procedia Engineering», vol. 155, 2016, pp. 361–368.
- Zhang, Weitao, Xuewei Liu e Fengxian Xin, “Normal Incidence Sound Absorption of an Acoustic Labyrinthine Metal-Fibers-Based Porous Metamaterial at High Temperature”, «International Journal of Mechanical Sciences», vol. 237, 2023, art. 107821.
- Zhang Dong, Yu Feng e Meng Zhang, “Sound field of a traditional Chinese Palace courtyard theatre”, «Building and Environment», vol. 230, 2023, art. 109741.
- Zieliński, Tomasz G., Kamil C. Opiela, Nicolas Dauchez, Thomas Boutin, Marie-Annick Galland e Keith Attenborough, “Extremely Tortuous Sound Absorbers with Labyrinthine Channels in Non-Porous and Microporous Solid Skeletons”, «Applied Acoustics», vol. 217, 2024, art. 109816.
- Zieliński, Tomasz G., Nicolas Dauchez, Thomas Boutin et al., “Taking Advantage of a 3D Printing Imperfection in the Development of Sound-Absorbing Materials”, «Applied Acoustics», vol. 197, 2022, p. 108941.
- Zieliński, Tomasz G., François Chevillotte e Emil Deckers, “Sound Absorption of Plates with Micro-Slits Backed with Air Cavities”, «Applied Acoustics», vol. 146, 2019, pp. 261–279.