

Analisi delle caratteristiche acustiche di alcuni teatri all'italiana toscani

Carlo Bartoli^a | Giacomo Salvadori^a | Tommaso D'Orazio^b | Claudia Guattari^{b*} |
Luca Evangelisti^c | Francesco Asdrubali^d

^a Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni, Via Carlo Francesco Gabba, 22, 56122 Pisa

^b Dipartimento di Filosofia, Comunicazione, Spettacolo, Università degli Studi Roma TRE, Via Ostiense, 234, 00146 Roma

^c Dipartimento di Ingegneria Industriale, Elettronica e Meccanica, Università degli Studi Roma TRE, Via Vito Volterra, 62, 00146 Roma

^d Dipartimento di Scienze Umane e Sociali Internazionali (SUSI), Università per Stranieri di Perugia, Piazza Giuseppe Ermini, 1, 06123 Perugia

* Autore di riferimento:
claudia.guattari@uniroma3.it

Ricevuto: 19/9/2024

Accettato: 24/4/2025

DOI: 10.3280/ria1-2025oa20510

ISSN: 2385-2615

Il presente lavoro analizza le caratteristiche acustiche di alcuni teatri toscani, basata sui risultati di campagne di misurazioni effettuate in vari contesti teatrali nel corso degli ultimi anni. L'obiettivo principale è quello di mettere in luce e discutere le specificità acustiche di questi spazi, tutti appartenenti alla tipologia del teatro all'italiana, pur mostrando differenze per dimensioni, materiali utilizzati ed epoche di costruzione. I dati raccolti offrono una visione approfondita delle qualità sonore dei teatri considerati, fornendo importanti indicazioni per una migliore comprensione dell'esperienza acustica all'interno di tali ambienti e per la conservazione della loro autenticità e rilevanza storico-culturale.

Parole chiave: teatri storici, acustica architettonica, tempo di riverbero, Valdarno

Investigation of the Acoustic Characteristics of Some Tuscan Italian-style Theaters

The present study examines the acoustic characteristics of several Tuscan theaters, based on the results of measurement campaigns conducted in various theatrical settings over the past years. The main goal is to highlight and discuss the acoustic specifics of these spaces, all belonging to the Italian-style theater typology, while showing differences in size, materials used, and construction epochs. The collected data offer an in-depth insight into the sound qualities of the theaters considered, providing significant indications for a better understanding of the acoustic experience within such environments and for the preservation of their authenticity and historical-cultural relevance.

Keywords: historical theaters, architectural acoustics, reverberation time, Valdarno

1 | Introduzione

I teatri rappresentano un ampio e vario insieme di spazi performativi caratterizzati da una vasta complessità e, allo stesso tempo, da una grande versatilità che li rende adatti a ospitare una molteplicità di eventi artistici e culturali [1]. Tra questi, in particolare, il teatro all'italiana si distingue come un tipo di struttura teatrale caratteristica del costruito italiano e particolarmente diffusa nel panorama architettonico italiano tra il XVIII e il XIX secolo. Le sue principali peculiarità architettoniche sono individuabili in una sala a forma di ferro di cavallo, che porta alla creazione di una platea che si traforma nel tempo da sala da ballo ad una zona deputata ad una migliore visibilità dello spettacolo, ottimizzata per la fruizione dello spettacolo dal vivo; nell'eliminazione delle gradinate per arrivare alla costruzione di palchi tra loro separati e divisi in altezza per ordini, che offrono al pubblico una visione privilegiata degli eventi; ad una maggiore profondità della scena progettata per permettere l'utilizzo delle innovative quinte prospettiche e la possibilità di recitare dentro la scena e non, come consuetudine nel teatro, davanti ad essa.

Un tempo l'opera lirica veniva rappresentata solo nei palazzi reali e nobiliari; perciò, era riservata solo a pochissime persone privilegiate. Il popolo inizia a godere di questa nuova forma di spettacolo solo dopo l'apertura del primo teatro d'opera, che nasce a Venezia nel 1637 [2].

2 | Le caratteristiche del teatro d'opera "all'italiana"

Tra il 1600 e il 1700 nasce una nuova tipologia di edificio teatrale chiamato "teatro all'italiana". Questa innovativa struttura non solo ha avuto un impatto significativo in Italia, ma è stata d'esempio per tantissimi teatri d'opera, influenzando la progettazione di numerosi teatri dell'opera in tutta Europa [3]. Rispetto ai precedenti modelli, il teatro all'italiana ha introdotto diverse novità architettoniche e funzionali. L'orchestra viene collocata in uno spazio più basso rispetto al palcoscenico, così da permettere al pubblico di vedere cosa accade in scena.

Il palcoscenico stesso diventa anche molto più grande, proprio per ospitare i tanti macchinari e le scene che diventano sempre più imponenti. Dove adesso si trova la "platea" (la distesa di poltrone che stanno davanti al palcoscenico) un tempo le persone potevano assistere allo spettacolo acquistando un biglietto e rimanendo per tutto il tempo in piedi, oppure su qualche scomoda panca.

Nei palchi più alti si trova il "loggione" dove un tempo prendeva posto il pubblico meno abbiente, come ad esempio i giovani, che solitamente, per riuscire a vedere lo spettacolo, dovevano stare in piedi. Il teatro era un importante luogo di ritrovo, dove gli ospiti potevano chiacchierare, mangiare, ascoltare un po' di musica e giocare d'azzardo non solo nei palchi, ma anche nel "foyer" che si trova all'entrata del teatro

e nei "ridotti", che erano delle grandi stanze utilizzate di solito per mangiare e bere.

L'influenza della disposizione architettonica, in particolare la configurazione dei palchi e delle logge, ha un impatto significativo sulla qualità dell'ascolto nei teatri storici. Lo studio condotto presso l'Università di Bologna da Cocchi, Garai & Tavernelli [4] incentrato sul Teatro Comunale di Bologna, ha dimostrato come la distribuzione spaziale e la geometria dei palchi possano alterare i parametri acustici percepiti dal pubblico, in particolare in termini di chiarezza sonora e definizione spaziale

Lo scopo di questo lavoro è il confronto tra le caratteristiche acustiche e architettoniche di nove teatri all'italiana toscani, situati in diverse province, studiati negli ultimi anni. Tale analisi mira a fornire una comprensione approfondita delle specificità di tali spazi e delle loro influenze sulla percezione sonora, contribuendo così alla valorizzazione e alla conservazione del patrimonio teatrale della Toscana.

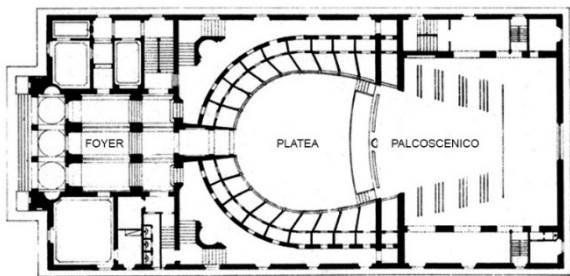


Fig. 1 – Planimetria tipica del teatro all'italiana.
Fonte: <https://spazioscenico.altervista.org/>
Typical floor plan of the Italian-style theater

3 | Analisi della letteratura

La storia degli studi sull'acustica risale all'antichità, con i greci che si confrontarono per primi con la sfida di rendere udibile e intelligibile il suono in spazi teatrali ampi e affollati. Nonostante basassero le loro conclusioni principalmente sull'esperienza pratica, riuscirono a ottenere risultati notevoli, come dimostrato dalla qualità dell'acustica nei loro teatri. Tuttavia, è nel corso dei secoli successivi che gli studi sull'acustica hanno fatto progressi significativi. È importante notare che i primi teatri all'italiana, che emersero tra il XVII e il XVIII secolo, furono progettati in maniera empirica, senza una piena comprensione della teoria della riverberazione e degli altri concetti acustici fondamentali. Solo più tardi, nel tardo XIX e all'inizio del XX secolo, con il lavoro di Wallace Clement Sabine, l'acustica architettonica iniziò a essere studiata sistematicamente. Il lavoro di Sabine ha gettato le basi per la comprensione scientifica della propagazione del suono negli ambienti chiusi, introducendo concetti come il tempo di riverberazione e fornendo metodi per misurare e ottimizzare l'acustica degli spazi teatrali e degli altri ambienti architettonici. Oggi, gli studi sull'acustica dei teatri comprendono una serie di parametri rilevanti, tra cui il tempo di riverberazione, l'indice di artico-

lazione, la distribuzione del suono e la diffusione spaziale. Questi fattori sono cruciali per garantire che gli spettatori possano godere di un'esperienza acustica ottimale durante le performance teatrali.

In particolare, gli studi di Kuttruff [5] sono fondamentali per la comprensione dell'acustica degli ambienti chiusi, poiché esaminano in profondità i fenomeni fisici legati alla propagazione del suono all'interno di spazi confinati, concentrandosi sui parametri che influenzano la qualità acustica. Kuttruff fornisce una base teorica solida per la comprensione di questi concetti e propone linee guida per la loro ottimizzazione in diversi contesti, tra cui teatri e sale da concerto. Inoltre, esplora anche le implicazioni pratiche della progettazione acustica, offrendo una combinazione di teoria e applicazione utile per l'analisi e il miglioramento delle prestazioni acustiche nei teatri storici, inclusi quelli all'italiana.

La standardizzazione delle misure acustiche nei teatri storici è un elemento essenziale per garantire la comparabilità e l'affidabilità dei dati raccolti. In tal senso, le linee guida proposte da Prodi & Pompoli [6] forniscono un protocollo metodologico dettagliato per la conduzione di misurazioni acustiche all'interno dei teatri d'opera storici, stabilendo criteri rigorosi per l'acquisizione e l'interpretazione dei parametri acustici fondamentali.

Anche le ricerche di Marshall Long [7] sono un riferimento per la progettazione acustica di spazi destinati a spettacoli, come teatri e sale da concerto. Long si concentra su parametri chiave come il tempo di riverberazione, la chiarezza e la definizione, discutendone l'impatto su vari tipi di esibizioni, dal parlato alla musica ed affrontando anche le tecniche costruttive e l'uso di materiali per ottimizzare la qualità acustica, fornendo strumenti pratici per la progettazione e la valutazione acustica di spazi come i teatri all'italiana. L'opera di Long è particolarmente utile per comprendere come configurare spazi performativi che rispondano adeguatamente alle esigenze acustiche.

La caratterizzazione acustica degli spazi, soprattutto nei contesti teatrali in cui l'acustica riveste un ruolo fondamentale, ha suscitato grande interesse negli studi scientifici. Questo articolo si concentra sulla caratterizzazione acustica di nove teatri tradizionali nella zona del Valdarno in Italia. Precedenti ricerche hanno investigato le caratteristiche acustiche dei teatri italiani, con particolare enfasi su quelli storici all'italiana e dell'opera.

Un'analisi dettagliata delle caratteristiche acustiche dei teatri storici italiani è stata condotta da Magrini et al. [8], il cui studio, presentato nell'ambito del convegno *Teatri d'opera dell'Unità d'Italia*, ha fornito un'ampia raccolta di dati sperimentali su parametri acustici chiave, quali tempo di riverberazione, chiarezza e definizione sonora. Questo lavoro rappresenta un riferimento fondamentale per comprendere le peculiarità acustiche di queste strutture e il loro ruolo nella diffusione del suono.

Prodi et al. [1] hanno analizzato le peculiarità acustiche di 48 teatri storici dell'opera italiana. Lo studio si basa su dati raccolti in condizioni standardizzate, utilizzando una sorgente

te omnidirezionale posizionata sul palcoscenico. L'analisi dei teatri considerati è stata suddivisa in due gruppi: il Gruppo A, caratterizzato da particolari condizioni che favoriscono un aumento del tempo di riverberazione, e il Gruppo B, comprendente teatri con caratteristiche più "regolari". I dati rilevati includono i parametri: T30, EDT, BR, C80, G, IACC e ITDG. I risultati mostrano una correlazione tra il tempo di riverberazione T30 e il volume della sala, con i teatri regolari che tendono a presentare una minore riverberazione. Tuttavia, la pendenza delle curve T30/V suggerisce che le differenze nel tempo di riverberazione dipendono più dal livello di assorbimento acustico che dalla geometria della sala. L'analisi del tempo di decadimento precoce EDT evidenzia una maggiore secchezza acustica nei teatri tradizionali rispetto a quelli moderni, anche con l'aumentare del volume. In contrasto, i teatri moderni mostrano una maggiore riverberazione con l'aumentare del volume, come indicato dalla pendenza della regressione EDT/V. Questi risultati contribuiscono alla comprensione delle differenze acustiche tra teatri tradizionali e moderni, offrendo preziose informazioni per la progettazione e l'ottimizzazione degli spazi teatrali.

Lo studio di Bevilacqua et al. [9] ha esaminato l'analisi acustica di quattro teatri situati in Campania, caratterizzati da una pianta a forma di ferro di cavallo. I teatri considerati sono il Teatro Vittorio Emanuele II di Benevento, il Teatro Garibaldi di Santa Maria Capua Vetere, il Teatro Mercadante di Napoli e il Teatro Verdi di Salerno. Questi teatri, con varie capacità e caratteristiche architettoniche, sono stati studiati per comprendere le loro prestazioni acustiche. Le misurazioni sono state condotte utilizzando un altoparlante omnidirezionale equalizzato ed un segnale sweep con una banda di frequenza da 40 Hz a 20 kHz. Le posizioni di misurazione sono state standardizzate e comprendevano la platea e diversi livelli dei palchi. I parametri acustici misurati includono EDT, T30, C80, D50 e LF80 in relazione alla frequenza. I risultati mostrano che il Teatro Vittorio Emanuele II è più adatto per le performance teatrali, mentre il Teatro Garibaldi è più idoneo per le performance musicali. Il Teatro Mercadante di Napoli e il Teatro Verdi di Salerno mostrano un equilibrio migliore tra le due qualità, con il Teatro di Napoli che si distingue come il migliore per l'ascolto della musica. Tutti e quattro i teatri presentano valori di STI che riflettono condizioni favorevoli per il discorso, con valori compresi tra 0,60 e 0,74.

Tronchin, Bevilacqua e Yan [10] hanno studiato il Teatro Ponchielli di Cremona, costruito nel 1808 dall'architetto Luigi Canonica e successivamente ristrutturato nel 1989. La struttura presenta una disposizione a "ferro di cavallo", con 4 ordini di logge e una galleria superiore, ospitando complessivamente 1188 posti. Il materiale predominante è il legno, utilizzato per soffitto e pareti, mentre le poltrone sono rivestite in tessuto imbottito. Lo studio presenta i risultati delle caratteristiche acustiche del teatro, ottenuti tramite misurazioni in situ e simulazioni acustiche con il software Ramsete 3.0. Le misurazioni sono state condotte con una sorgente dodecaedrica omnidirezionale posta sul palco. I parametri analizzati includono EDT, T20, C80, D50 e STI, e i risultati indicano ot-

time proprietà acustiche del teatro, adatto sia per spettacoli musicali che recitati. Simulazioni con il software hanno confermato le buone prestazioni acustiche in diverse condizioni di occupazione della sala. Infine, sono state confrontate le caratteristiche acustiche del Teatro Ponchielli con quelle del Teatro Mercadante di Napoli, del Teatro Verdi di Salerno e del Teatro Masini di Faenza attraverso appositi grafici.

Lo studio di Fausti & Prodi [11], condotto presso l'Università di Ferrara sul Teatro Municipale di Reggio Emilia, ha evidenziato come gli interventi di restauro possano modificare sensibilmente la risposta acustica dell'ambiente. Le ristrutturazioni nei teatri storici, infatti, devono essere condotte con particolare attenzione alla conservazione delle loro proprietà acustiche originarie. L'analisi comparativa dei parametri acustici prima e dopo le ristrutturazioni ha dimostrato l'importanza di un approccio metodico nella progettazione degli interventi di recupero, al fine di mantenere inalterate le qualità sonore originali.

Quaia, Bettarello e Caniato si sono concentrati sulle caratteristiche acustiche del Teatro Sociale di Rovigo e del Politeama di Como [12], entrambi esempi di teatri all'italiana realizzati in calcestruzzo armato. Il Teatro Sociale di Rovigo, con la sua struttura a ferro di cavallo su cinque livelli, offre una capacità di circa 1188 posti, mentre il Politeama di Como si sviluppa su tre piani, ospitando circa 1300 posti a sedere. I parametri acustici valutati includono T30, EDT, C80 e D50, misurati tramite un segnale sweep inviato da una sorgente dodecaedrica e con una gamma di frequenza da 20 Hz a 20 kHz. I risultati sono presentati attraverso grafici che mostrano la variazione dei valori acustici nelle diverse sezioni dei teatri. Nel Teatro Sociale di Rovigo si osserva un tempo di riverberazione uniforme e decrescente con la frequenza, risultando favorevole per spettacoli musicali e recitati. Al contrario, nel Politeama di Como i tempi di riverberazione sono più alti, indicando una preferenza per la musica rispetto al discorso parlato. Le differenze nell'acustica sono attribuite alle diverse finiture interne e alla presenza di arredi nei due teatri, nonostante entrambi siano costruiti con calcestruzzo armato.

Ancora Bevilacqua et al., [13] hanno studiato il Teatro Municipale di Piacenza, progettato dall'architetto Lotario Tomba e inaugurato nel 1804. La sala principale presenta una forma ellittica, con capacità totale di 1121 posti. In questo articolo sono state utilizzate due diverse tecniche di misurazione, la prima, più tradizionale, finalizzata alla misurazione dei parametri monoaurali e binaurali, mentre la seconda, più innovativa, finalizzata a catturare gli effetti necessari per una rappresentazione acustica per applicazioni di realtà virtuale. Nella misurazione dei parametri monoaurali e binaurali i parametri sono stati analizzati in linea con i requisiti standard stabiliti nella norma ISO 3382-1 [14]. Il segnale di eccitazione emesso dalla sorgente sonora è di tipo sweep a un livello uniforme di pressione sonora nell'intervallo tra 40 Hz e 20 kHz. Infine, i parametri riportati nell'articolo: C50, C80, D50, Ts, EDT, T20, T30, Jlf, Jlfc, Lj mostrano che il teatro è adatto sia per le performance musicali che per le rappresentazioni teatrali.

Infine, Garai et al. [15] hanno misurato le caratteristiche acustiche di undici teatri storici di piccole e medie dimensioni del nord Italia. I teatri sono accumulati dallo stesso periodo storico di costruzione (dalla fine del 1700 alla fine del 1800) e dalla stessa area geografica. Le misurazioni sono state condotte utilizzando una sorgente dodecaedrica in due posizioni all'interno del palco. I teatri possono essere sotto divisi in tre gruppi: il primo comprende i teatri con volume della sala di circa 3200 m³, il secondo gruppo è composto dai teatri di volume della sala di media grandezza, di circa 1800 m³ e l'ultimo gruppo è composto dai teatri il cui volume della sala non supera 1200 m³. I parametri calcolati in base alla norma ISO 3382-1 sono: T30, EDT, C80, Ts, G, IACCE, IACCL. I risultati calcolati definiscono in generale che le sale hanno un tempo di riverberazione T30 basso, EDT basso e valori elevati di C80, ideali per opere liriche italiane. Infine, il rapporto EDT/T30 inferiore a 1 identifica un decadimento di tipo "cliff-type" caratteristico delle sale storiche italiane.

4 | Descrizione dei casi di studio

Le sale analizzate nell'ambito dello studio sono tutte appartenenti alla tipologia del teatro all'italiana. In particolare, sono stati esaminati 9 teatri di cui 3 nella provincia di Pisa, 3 nella provincia di Livorno e i restanti 3 rispettivamente nelle province di Lucca, Carrara e Firenze.

I teatri studiati sono tra loro collegati dallo stesso territorio d'appartenenza (il Valdarno) e dalle analoghe caratteristiche architettoniche (teatri all'italiana). Il campione considerato comprende teatri costruiti dalla seconda metà del 1800 circa fino al 1900. Il più antico di questi è il teatro Animosi di Carrara risalente al 1840 mentre il più moderno è il teatro De Filippo di Cecina (Livorno) realizzato nel 1982 (Tab. 1).

Tab. 1 – Teatri oggetto di studio e loro epoca
Theaters under study and their era

Teatro	Anno
Teatro Francesco di Bartolo di Buti (PI)	1842
Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca (LU)	1790
Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno (PI)	1902
Teatro Animosi di Carrara (MS)	1840
Teatro Roma di Castagneto Carducci (LI)	1865
Teatro Concordi di Campiglia Marittima	1864
Teatro Marchioneschi di Guardistallo (PI)	1883
Teatro De Filippo di Cecina (LI)	1982
Teatro del Popolo di Castelfiorentino (FI)	1872

Inoltre, i casi di studio analizzati si differenziano in relazione alla cubatura della sala. Infatti, il campione studiato comprende teatri con volume della sala variabili, la prevalenza dei teatri esaminati, comunque, è caratterizzata da sale il cui volume non supera i 5000 m³.

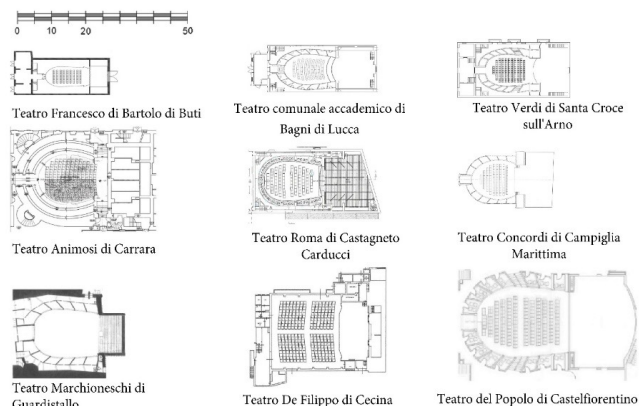


Fig. 2 – Planimetrie in scala dei teatri esaminati
Scale plans of the theatres examined

Tab. 2 – Dimensioni principali dei teatri esaminati
Main dimensions of the theatres examined

Teatro	Larghezza palco [m]	Lunghezza palco [m]	Area palco [m ²]
Teatro Francesco di Bartolo di Buti	7	6	42
Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca	10	10	105
Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno	14	7	92
Teatro Animosi di Carrara	14	13	182
Teatro Roma di Castagneto Carducci	13	9	119
Teatro Concordi di Campiglia Marittima	14	7	93
Teatro Marchioneschi di Guardistallo	10	7	65
Teatro De Filippo di Cecina	14	7	97
Teatro del Popolo di Castelfiorentino	12	12	146

Tab. 3 – Volume, posti totali e file in platea dei teatri esaminati
Volume, total seats and rows in the stalls of the theatres examined

Teatro	Volume [m ³]	Posti totali	File in platea
Teatro Francesco di Bartolo di Buti	900	236	9
Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca	2050	304	9
Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno	2250	260	11
Teatro Animosi di Carrara	4550	450	13
Teatro Roma di Castagneto Carducci	2150	190	11
Teatro Concordi di Campiglia Marittima	1513	207	9
Teatro Marchioneschi di Guardistallo	3000	150	9
Teatro De Filippo di Cecina	3174	400	15
Teatro del Popolo di Castelfiorentino	4950	354	12

Le strutture prese in esame, del resto, sono costruzioni antecedenti al XX secolo e perciò hanno subito nel corso degli anni molteplici ristrutturazioni. Nella maggior parte dei teatri, tuttavia, i restauri effettuati hanno lasciato invariate le caratteristiche originali degli edifici. Quasi la totalità dei casi in esame presenta una pavimentazione in parquet e materiali fonoassorbenti all'interno delle sale da teatro a eccezione del teatro comunale accademico di Bagni di Lucca (Lucca) in cui la pavimentazione è realizzata in calcestruzzo armato. Oltre alle comuni caratteristiche che dei teatri all'italiana, il teatro il Teatro del Popolo di Castelfiorentino (Firenze), il teatro comunale accademico di Bagni di Lucca (Lucca) e il teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno (Pisa) sono accomunati da una considerevole somiglianza stilistica e architettonica, marcata soprattutto dalla presenza a loro interno del soffitto a cupola.

4.1 | Teatro Francesco di Bartolo di Buti

Il Teatro Bartolo di Buti, eretto nel 1842 e soggetto a un restauro nel 1978, si caratterizza per una pianta rettangolare e un volume di circa 900 m³. L'interno, in pieno stile del teatro all'italiana, presenta un atrio che si apre su una sala a ferro di cavallo circondata da eleganti palchi, decorati da affreschi di Giarrè. Il palcoscenico, con ampio arco scenico, è dotato di camerini nel sottopalco. La sala ospita 236 posti a sedere, mentre il palcoscenico si estende per 7 m in larghezza, 6 m in profondità e sorge a 1.15 m dalla platea.

Considerate le dimensioni limitate della sala, è essenziale garantire un tempo di riverberazione ottimale, mantenendo valori contenuti. A tale scopo, la pavimentazione è realizzata in legno di abete e le poltrone sono rivestite in tessuto. Le pareti sono in cotto intonacato mentre il soffitto convesso è decorato con affreschi. Le aperture, provviste di tendaggi in velluto, sono studiate per uniformare l'assorbimento acustico, integrando dettagli che valorizzano l'aspetto complessivo della sala.



Fig. 3 – Teatro Francesco di Bartolo di Buti
Francesco di Bartolo theater in Buti

Fonte: www.quinewsvaldera.it/buti-il-teatro-si-sposta-di-luogo-in-luogo.htm

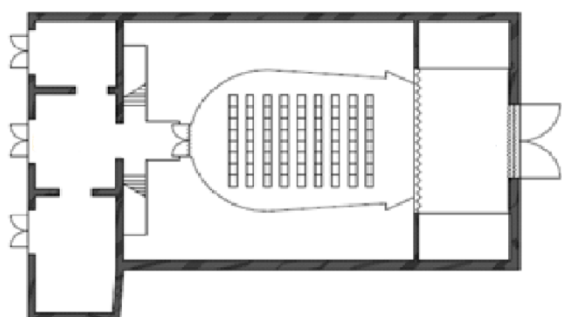


Fig. 4 – Planimetria del teatro Francesco di Bartolo di Buti
Floor plan of Francesco di Bartolo theatre in Buti

4.2 | Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca

Il Teatro Comunale Accademico di Bagni di Lucca, eretto nel 1790 e oggetto di una ristrutturazione nel 1986, sorge al centro del capoluogo del Comune di Bagni di Lucca. All'esterno, si presenta con un'elegante facciata articolata su due piani, ornata da lesene e sormontata da un timpano triangolare. Internamente, il teatro segue le tipiche forme dell'architettura all'italiana.

Un ampio ingresso conduce ai corridoi che conducono verso i piani superiori e alla sala principale, caratterizzata dalla tradizionale forma a ferro di cavallo, circondata da tre ordini di palchi. Dalla platea è possibile raggiungere la buca dell'orchestra, e tramite una scala laterale realizzata in legno e ferro è possibile accedere al palcoscenico, al di sotto del quale si trovano i camerini. La platea ha una larghezza di 10.30 m e una profondità di 10.20 m, offrendo un totale di 304 posti. Il palcoscenico, largo 12.50 m e profondo 8 m, contribuisce all'ampio volume complessivo del teatro, che ammonta a 2050 m³.

In seguito all'opera di ristrutturazione avviata negli anni '80, il teatro presenta ora materiali moderni che hanno sostituito le strutture originali. La pavimentazione e la volta a cupola sono state rinnovate in cemento armato, mentre le poltrone della platea e dei palchi sono realizzate in legno rivestito di velluto. L'ingresso è caratterizzato da importanti tendaggi, delle porte in legno chiudono i palchi e il corrimano del parapetto è rifinito con velluto.

In seguito all'opera di ristrutturazione avviata negli anni '80, il teatro presenta ora materiali moderni che hanno sostituito le strutture originali. La pavimentazione e la volta a cupola sono state rinnovate in cemento armato, mentre le poltrone della platea e dei palchi sono realizzate in legno rivestito di velluto. L'ingresso è caratterizzato da importanti tendaggi, delle porte in legno chiudono i palchi e il corrimano del parapetto è rifinito con velluto.



Fig. 5 – Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca
The Academic Municipal Theater of Bagni di Lucca

Fonte: <https://bellabagnidilucca.com/2013/01/02/bagni-di-lucca-teatro-accademico/>

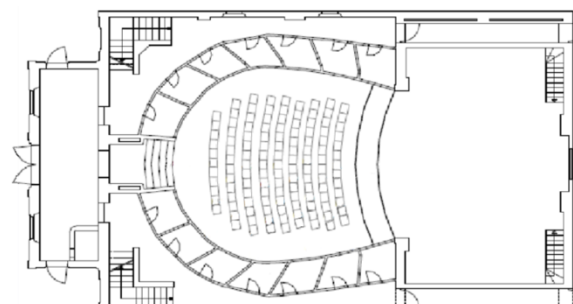


Fig. 6 – Planimetria del teatro comunale accademico di Bagni di Lucca
Floor plan of the Academic Municipal Theater of Bagni di Lucca

4.3 | Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno

Il Teatro Verdi, eretto nel 1902 e soggetto a un restauro nel 1983, si trova a Santa Croce Sull'Arno, nel territorio della provincia di Pisa. Ideato dall'architetto Michelangelo Majorfi, il teatro esibisce una facciata neorinascimentale. Internamente, assume la classica forma a ferro di cavallo, con tre ordini di palchi e una buca dell'orchestra, occupando uno spazio di circa 2250 m³. Il palcoscenico, profondo 6.80 m e largo 13.50 m, ha subito diverse ristrutturazioni nel corso degli anni, incluso un intervento negli anni '80 che ha rinforzato la struttura della sala, consolidato gli elementi lignei, rinnovato i camerini e adeguato gli standard di sicurezza. La capacità della sala è di circa 260 posti a sedere.

Dopo il restauro degli anni '80, sono state apportate ulteriori modifiche, tra cui l'irrigidimento della volta con resine, l'installazione di poltrone rivestite in tessuto, la posa di un pavimento in cotto, un palcoscenico realizzato in legno e l'aggiunta di un nuovo sipario in panno.



Fig. 7 – Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno
The Verdi Theater of Santa Croce sull'Arno

Fonte: www.toscanaspettacolo.it/teatro/teatro-comunale-verdi-santacrocesullarno/

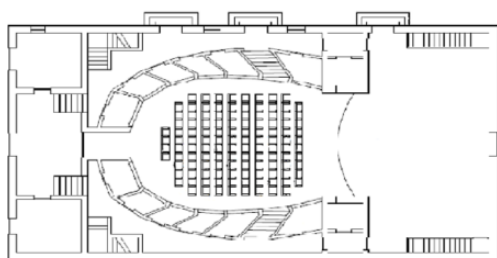


Fig. 8 – Planimetria del teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno
Floor plan of the Verdi Theater of Santa Croce sull'Arno

4.4 | Teatro Animosi di Carrara

Il Teatro, eretto nel 1840 e sottoposto a un restauro negli anni '80, si trova nella parte nord-ovest della città. Internamente, segue il tradizionale schema del teatro all'italiana, con palchi a ferro di cavallo disposti su tre ordini, loggione e palco reale

adornato da raffinati fregi marmorei. La platea, spaziosa con una larghezza di 11.50 m e una lunghezza di 13 m, si affaccia su un palcoscenico largo 14 m, profondo 13 m e alto 10 m. La capienza complessiva della sala è di circa 450 posti a sedere, con un volume totale di circa 4550 m³.

Dopo l'ultimo restauro negli anni '80, sono stati impiegati materiali moderni per conformare la struttura alle normative di sicurezza. La preesistente struttura portante in legno è stata sostituita da una nuova in cemento armato, colato in loco. La platea è stata completamente rifatta mediante l'uso di cemento, successivamente rivestito con parquet, rendendola anche resistente al fuoco. Le capriate originali del tetto sono state conservate, sottoposte a un trattamento ignifugo.



Fig. 9 – Teatro Animosi di Carrara
The Animosi Theater of Carrara

Fonte: <https://artbonus.gov.it/1538-teatro-animosi.html>

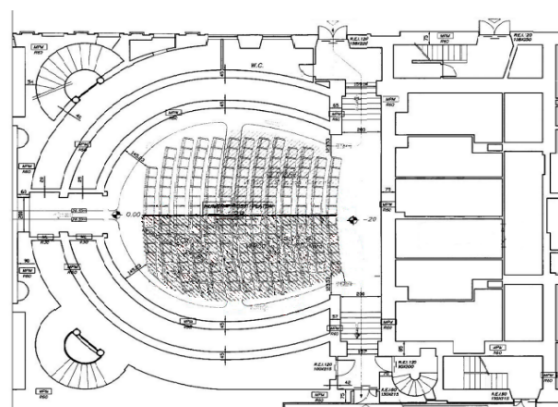


Fig. 10 – Planimetria del teatro Animosi di Carrara
Floor plan of the Animosi Theater of Carrara

4.5 | Teatro Roma di Castagneto Carducci

Il Teatro Roma di Castagneto Carducci, eretto nel 1865 e oggetto di una ristrutturazione nel 2004, presenta una sala ellittica caratterizzata da un ordine di 12 palchi e un piccolo palco "reale". La platea, con dimensioni di 9 metri per 12, offre una capienza di 154 posti, mentre il loggione sovrastante, profondo circa 2 metri e con una superficie

di 80 metri quadrati, si estende lungo tutto il perimetro dei palchi. Attualmente privo di arredi, il loggione originariamente ospitava panche lignee. Il boccascena, largo 6.30 metri e alto 5, è collocato in uno spazio di 9.20 per 12.90 metri, ampliato durante l'ultima ristrutturazione. Il proscenio, elevato di 1.30 metri rispetto al piano della platea e collegato al sottopalco e al sipario, presenta un'apertura alla Greca foderata in velluto. All'interno del vano del palcoscenico sono presenti due camerini di dimensioni 2×1.20 metri. Il soffitto e l'arcoscenico della sala, raggiungibili attraverso un foyer con biglietteria, vantano decorazioni in stile art déco realizzate dai Ciatti, una famiglia di artigiani locali. La capacità totale del teatro è di 190 posti, mentre il volume complessivo dell'edificio si attesta su 2150 m^3 .



Fig. 11 – Teatro Roma di Castagneto Carducci
The Roma Theater of Castagneto Carducci

Fonte: www.toscanaspettacolo.it/teatro/teatro-roma-castagnetocarducci/

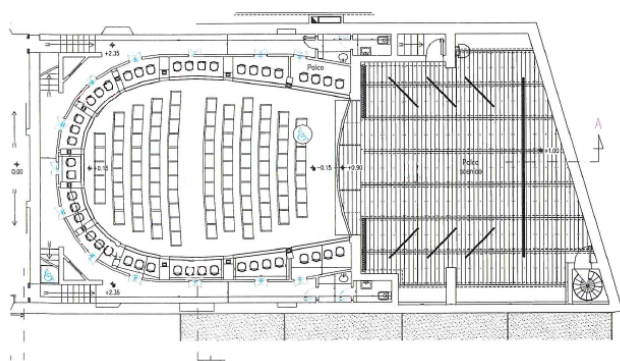


Fig. 12 – Planimetria del teatro Roma di Castagneto Carducci
Floor plan of the Roma Theater of Castagneto Carducci

4.6 | Teatro Concordi di Campiglia Marittima

Il Teatro Concordi di Campiglia Marittima, eretto nel 1864 e soggetto a una ristrutturazione nel 1987, ha visto il suo restauro concentrarsi principalmente sul ripristino delle condizioni statiche, funzionali e formali dell'edificio originario, costruito nel secolo precedente. Seguendo i rigorosi principi del teatro all'italiana, la struttura dispone di platea e palchi dispo-

sti a "ferro di cavallo" su tre ordini verticali. Il palcoscenico è inclinato verso il pubblico per garantire una visione ottimale, mentre la platea sale gradualmente verso il fondo con un'inclinazione rivolta alla scena. La copertura e il pavimento del palcoscenico sono realizzati in legno. Le dimensioni della sala sono di $9.20 \times 10.20 \text{ m}$, mentre quelle del palcoscenico sono di $6.90 \times 13.50 \text{ m}$, con una superficie totale di 740 m^2 e un volume totale di 7080 m^3 . Il numero totale di posti a sedere è di 207. Il volume d'aria è calcolato sommando i contributi di platea, palchetti e palcoscenico fino ai muri perimetrali, con un valore complessivo di 1513 m^3 .



Fig. 13 – Teatro Concordi di Campiglia Marittima
The Concordi Theater of Campiglia Marittima

Fonte: www.toscanaspettacolo.it/teatro/teatro-dei-concordi-campiglia-marittima/

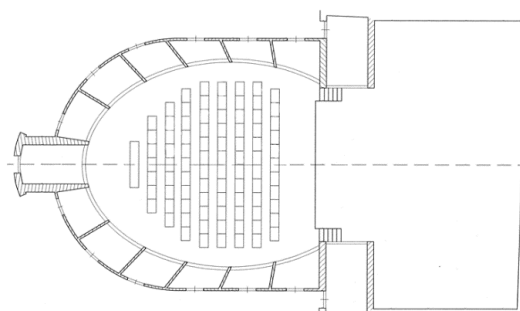


Fig. 14 – Planimetria del teatro Concordi di Campiglia Marittima
Floor plan of the Concordi Theater of Campiglia Marittima

4.7 | Teatro Marchionneschi di Guardistallo

Il Teatro V. Marchionneschi, inaugurato nel 1883 a Guardistallo e restaurato negli anni '90, presenta un palco rettangolare, di legno chiaro circondato da drappi rossi che funzionano come quinte e sipario, con dimensioni di 10×6.5 metri e un'altezza di circa 7.5 metri. La platea, con poltroncine rivestite in tessuto rosso, è di forma ellittica e si estende per 10×7 metri, con un'altezza interna di 8 metri. Le dimensioni dei palchetti, è di $2 \times 2.5 \text{ m}$, con un'altezza di 2 m. La superficie totale è di 230 m^2 , con un volume totale di 3000 m^3 . La capacità del teatro è di 150 posti, distribuiti tra platea e due ordini di gallerie.



Fig. 15 – Teatro Marchionneschi di Guardistallo
The Marchionneschi Theater in Guardistallo

Fonte: www.intoscana.it/it/guardistallo-borgo-residenza-artisti/

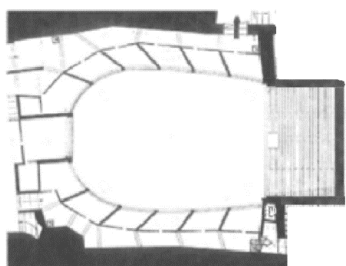


Fig. 16 – Planimetria del teatro Marchionneschi di Guardistallo
Floor plan of the Marchionneschi Theater in Guardistallo

4.8 | Teatro E. De Filippo di Cecina

Il teatro di Cecina nasce come auditorium del vicino complesso scolastico che ospitava, la sua trasformazione in teatro cittadino avviene negli anni Ottanta quando il Comune interviene per ristrutturarlo. Il teatro attualmente può accogliere solo 300 spettatori nella platea, dato che la galleria da 100 posti è inagibile a causa di problemi strutturali. Il pavimento è rivestito in linoleum, mentre pareti e soffitto sono dotati di pannelli fonoassorbenti. Il palco, con una pianta rettangolare e due piani, presenta dimensioni significative: 7.14 m di larghezza, 13.60 m di lunghezza e 7.90 m di altezza, con un volume totale di 3174 m³. La platea, con dimensioni di 16.20 m in lunghezza, 17.30 m in larghezza e un'altezza media del piano terra di 3.20 m, offre uno spazio considerevole per il pubblico.



Fig. 17 – Teatro E. De Filippo di Cecina
The E. De Filippo Theater in Cecina

Fonte: www.nuovagiovanile.it/inaugurazione-teatro-de-filippo-di-cecina/

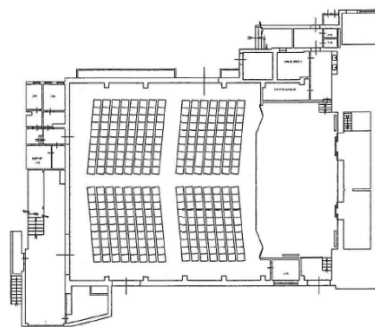


Fig. 18 – Planimetria del teatro E. De Filippo di Cecina
Floor plan of the E. De Filippo Theater in Cecina

4.9 | Teatro del Popolo di Castelfiorentino

Il Teatro del Popolo, eretto nel 1872 e successivamente restaurato nel 1929, incarna un esemplare teatro all'italiana nel centro storico del comune di Castelfiorentino, in provincia di Firenze. La struttura si presenta come un autentico teatro all'italiana, caratterizzato da una sala a ferro di cavallo, palchi distribuiti su tre ordini e un equilibrato rapporto tra la sala, il boccascena e le dimensioni del palcoscenico. La platea, con una larghezza di 11 m e una profondità di 14.30 m, è caratterizzata da una pavimentazione in parquet di rovere. La sala, che vanta tre ordini di palchi e un loggione, è dotata di tendaggi in velluto ignifugo. Il soffitto è costituito da una volta



Fig. 19 – Teatro del Popolo di Castelfiorentino
Popolo Theater in Castelfiorentino

Fonte: www.teatro.it/teatri/del-popolo-castelfiorentino-cartellone

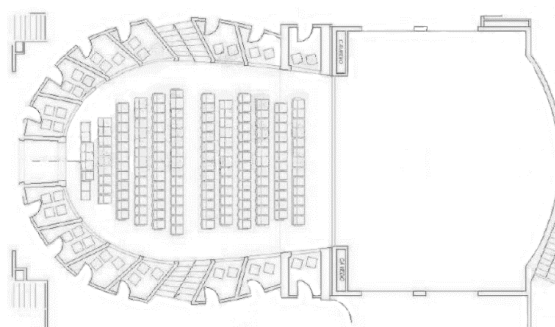


Fig. 20 – Planimetria del teatro del Popolo di Castelfiorentino
Floor plan of Popolo Theater in Castelfiorentino

sovrastata da un solaio in legno. Il boccascena, largo 8.80 m, si affianca a un palco con una larghezza utile di 12.20 m, una profondità massima di 12 m e un'altezza graticcio di 12 m. La capacità complessiva del teatro è di 354 posti, mentre la volumetria dell'edificio si attesta su 4950 m³.

5 | La metodologia applicata e la campagna sperimentale

L'analisi dell'acustica delle sale e la misurazione dei parametri acustici che le caratterizzano è stata effettuata sollecitando il sistema con un segnale impulsivo, ricavandone così la risposta all'impulso, o attraverso una sorgente omnidirezionale.

La tecnica di misura più tradizionale per ricavare la risposta all'impulso della sala è basata sulla generazione del segnale impulsivo attraverso l'uso di colpi di pistola a salve. La misurazione della risposta all'impulso della sala deve avvenire in assenza di sistemi di amplificazione accesi. Le prove sono state effettuate senza pubblico in sala (erano presenti solo gli operatori che hanno effettuato le prove), ma realizzando tutte le condizioni che si verificano durante gli spettacoli: porte chiuse, tende tirate, sipario aperto.

La risposta della sala è stata registrata utilizzando un fonometro, il microfono è sempre stato posto ad un'altezza di circa 1,20 m, corrispondenti all'altezza auricolare media degli ascoltatori seduti su poltrone tipo. Le misure sono state ripetute in diverse posizioni nella platea dei teatri esaminati [14, 16, 17].

5.1 | Teatro Francesco di Bartolo di Buti

Le indagini acustiche sono state eseguite in otto punti, di cui quattro nella platea e quattro nei due livelli dei palchi, al fine di determinare i valori di T30 e D50 (Fig. 21). La sorgente sonora è stata generata attraverso un segnale impulsivo generato dallo sparo di una pistola a salve. I parametri acustici così rilevati sono stati misurati e analizzati tramite lo strumento software "AURORA".

Le prove sono state condotte replicando le condizioni di uno spettacolo reale, con porte e tendaggi chiusi e sipario aperto. In Tab. 4 sono riportati i valori misurati durante la prova.

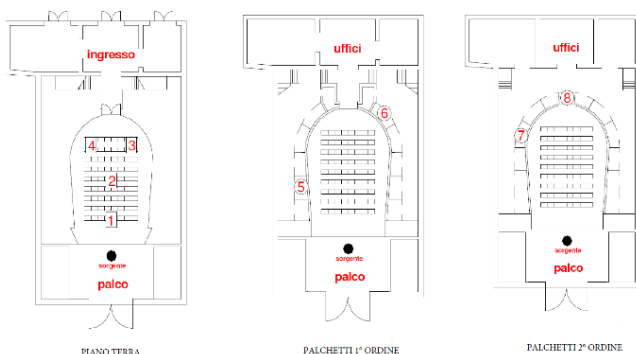


Fig. 21 – Punt di misura in pianta
Measuring points on the plan

5.2 | Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca

Le rilevazioni sono state eseguite su 29 posizioni, Fig. 22, di cui 18 nella platea disposte seguendo una griglia adeguata, mentre le restanti sono posizionate sui palchi, a un'altezza di 1.20 m dal pavimento, per determinare i valori di T20, T30, D50, C80 e EDT. Le prove sono state eseguite nella sala replicando le condizioni di uno spettacolo: porte e tendaggi chiusi, sipario aperto. La sorgente sonora, a 1.60 m dal pavimento, è generata da un segnale impulsivo ottenuto con lo sparo di una pistola a salve calibro 9 mm. Per eseguire la campagna di misurazione, è stato utilizzato il fonometro Larson-Davis modello LD824, con una scheda audio esterna Triton. I dati raccolti sono stati elaborati tramite il software Dirac. Per ciascuna posizione sono stati effettuati tre spari, e i valori riportati in Tab. 5 rappresentano la media aritmetica dei risultati di ogni singolo colpo.

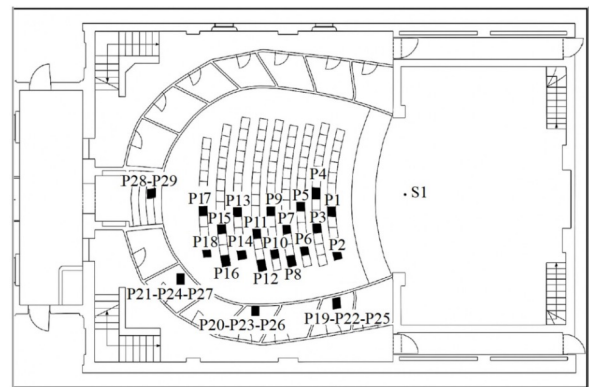


Fig. 22 – Punt di misura in pianta
Measuring points on the plan

5.3 | Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno

Le rilevazioni sono state eseguite in un totale di 29 posizioni, di cui 16 in platea e le restanti 13 distribuite tra i tre ordini di palchi, ad un'altezza di 1.20 m dal suolo, per calcolare i valori di T20, T30, D50, C80, EDT (Fig. 23). Le prove sono state condotte in una sala vuota, ricreando le condizioni che si verificano durante uno spettacolo: porte e tendaggi chiusi, sipario aperto. La sorgente sonora, posizionata a 1.50 m dal suolo, è

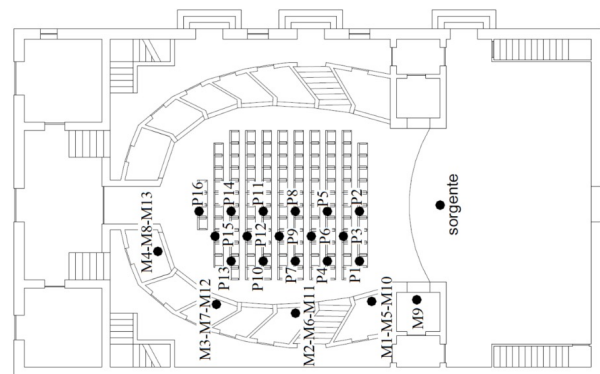


Fig. 23 – Punt di misura in pianta
Measuring points on the plan

stata generata da un segnale impulsivo ottenuto dallo sparo di una pistola a salve calibro 9 mm. La risposta è stata registrata tramite un fonometro Larson-Davis modello LD824, collegato ad una scheda audio esterna Triron. I dati raccolti sono stati elaborati tramite il software Dirac. Per ciascuna postazione sono stati eseguiti tre colpi di pistola, in modo di avere una media significativa e i valori riportati in Tab. 6 sono la media aritmetica dei risultati ottenuti da ciascun singolo sparo.

5.4 | Teatro Animosi di Carrara

Le misurazioni sono state eseguite tramite il fonometro modello 2250 della casa produttrice Brüel & Kjær su 29 posizioni di cui 17 in platea e 12 sui palchi e nel loggione, situate a un'altezza di 1,20 metri dal suolo, per determinare i valori di T20, D50, C80 e EDT (Fig. 24). Le prove sono state effettuate in una sala vuota, simulando le condizioni che si verificano durante uno spettacolo, con porte e tendaggi chiusi e sipario aperto. La sorgente sonora utilizzata è un altoparlante omnidirezionale 4292 della Brüel & Kjær e tramite il software Dirac sono stati analizzati i dati registrati.

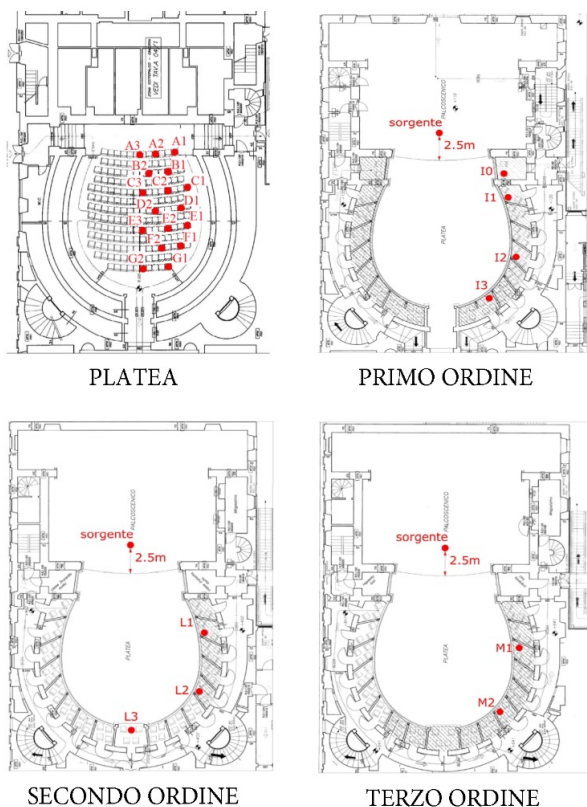


Fig. 24 – Punti di misura in pianta
Measuring points on the plan

5.5 | Teatro Roma di Castagneto Carducci

Le misurazioni acustiche sono state analizzate complessivamente 10 posizioni, di cui le prime 5 in platea, due sul primo ordine, una sul palco "reale" e altre due sul secondo ordine (Fig. 25). Questo approccio mira a coprire integralmente il volume del

teatro occupato dagli spettatori. Per ottenere la risposta all'impulso della sala, è stato utilizzato un segnale impulsivo mediante colpi di pistola a salve, con proiettili calibro 8. Tali misurazioni devono avvenire in assenza di amplificazione attiva. La sorgente sonora è posizionata sul palco, nel punto centrale, e sono stati determinati i valori significativi del T30 e della frequenza minima di Schroeder (48.42 Hz). La risposta è stata registrata utilizzando un fonometro (Larson-Davis) e mediante il software "AURA" sono stati analizzati i dati.

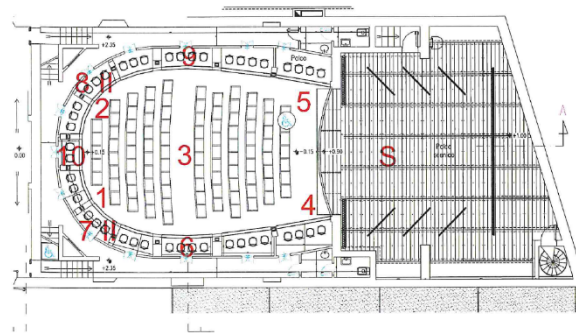


Fig. 25 – Punti di misura in pianta
Measuring points on the plan

5.6 | Teatro Concordi di Campiglia Marittima

Per le misurazioni acustiche, sono state esaminate 23 posizioni con fonometri a 1.20 metri d'altezza: 14 nella platea, 3 nel primo ordine, 4 nel secondo e 2 nel terzo ordine di palchi (Fig. 26).

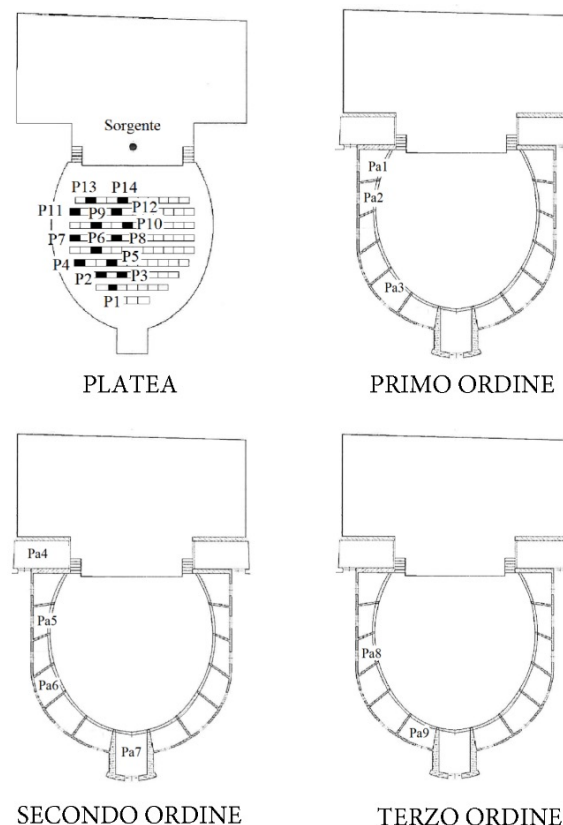


Fig. 26 – Punti di misura in pianta
Measuring points on the plan

Questo approccio mira a coprire integralmente il volume del teatro occupato dagli spettatori. Per ottenere la risposta all'impulso della sala, sono stati prodotti segnali impulsivi mediante colpi di pistola a salve, calibro 8, senza amplificazione attiva. La prova è stata condotta senza pubblico (solo con gli operatori), ricreando le condizioni degli spettacoli con porte chiuse, tende tirate e sipario aperto. La sorgente sonora, posizionata centralmente sul palco, ha permesso di determinare valori significativi come T30, D50, C80 e EDT. La risposta è stata registrata con un fonometro Larson-Davis e i dati sono stati successivamente analizzati tramite il software "AURA".

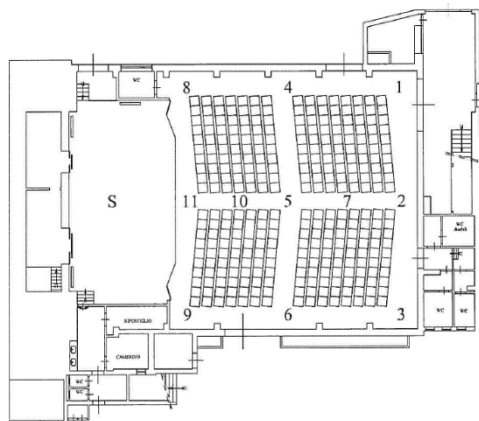


Fig. 28 – Punt di misura in pianta
Measuring points on the plan

5.7 | Teatro Marchionneschi di Guardistallo

Per ottenere la risposta all'impulso della sala in analisi, il segnale impulsivo è stato generato mediante l'utilizzo di colpi di pistola a salve, con proiettili calibro 8. Le 10 prove sono state condotte in diverse zone della sala, con 5 nel complesso della platea, 3 nel primo ordine di palchi e 2 nel secondo ordine di palchi (Fig. 27). Posizionando la sorgente sonora centralmente sul palco, è stato determinato il valore significativo del T30. Inoltre, è stata calcolata la frequenza limite di Schroeder, che si attesta a 48 Hz. Il fonometro Larson-Davis ha registrato la risposta, mentre l'elaborazione dei dati è stata eseguita con il software "AURA".

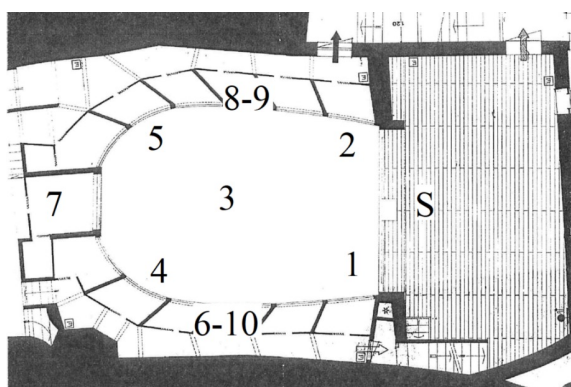


Fig. 27 – Punt di misura in pianta
Measuring points on the plan

5.8 | Teatro E. De Filippo di Cecina

La risposta acustica della sala è stata rilevata usando un segnale impulsivo prodotto da spari di pistola a salve, utilizzando proiettili calibro 8. Al fine di esaminare tutte le posizioni di ascolto possibili del pubblico, sono stati effettuati 11 spari, escludendo il piano superiore, inagibile e non utilizzabile dagli ascoltatori (Fig. 28). La sorgente sonora, centralmente posizionata sul palco, ha consentito di determinare il valore significativo del T30. È stata calcolata la frequenza limite di Schroeder, attestandosi a 42 Hz. Con un fonometro Larson-Davis sono stati registrati i dati e successivamente sono stati elaborati tramite il software "AURA".

5.9 | Teatro del Popolo di Castelfiorentino

Le misurazioni sono state eseguite su 38 punti distinti all'interno della sala, di cui 20 localizzati in platea e 18 distribuiti tra i palchi e il loggione, tutti posti a un'altitudine di 1.20 m dal suolo (Fig. 29). L'obiettivo era determinare i valori di T30, D50, C80 ed EDT. Le prove sono state condotte con la sala vuota, replicando le condizioni tipiche di uno spettacolo: porte e tendaggi chiusi, sipario aperto. La sorgente sonora, di tipo

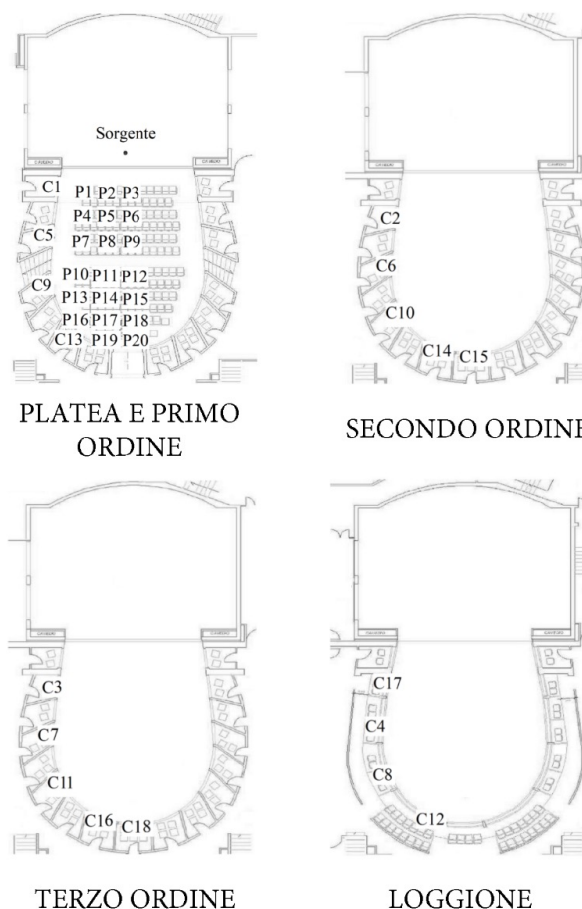


Fig. 29 – Punt di misura in pianta
Measuring points on the plan

dodecaedrico omnidirezionale, modello 4292 della casa Brüel & Kjær, è stata posizionata a un'altitudine di 1.50 m dal suolo, corrispondente alla posizione di un oratore. Il fonometro utilizzato è il modello 2250 della ditta Brüel & Kjær e i dati sono stati elaborati tramite il software "Dirac".

6 | Analisi dei risultati

6.1 | Teatro Francesco di Bartolo di Buti

Il Teatro Bartolo di Buti, con un tempo di riverbero di T30 = 1.36s e un volume di 900 m³, è adatto per spettacoli di musica leggera. Questo risultato è confermato dal grafico che confronta il tempo di riverbero ottimale con il volume della sala, Fig. 30, il quale indica che le caratteristiche acustiche del teatro sono compatibili con tali eventi. La sala offre una qualità acustica soddisfacente, con una migliore predisposizione per la musica rispetto alla prosa. I valori misurati relativi al Teatro Francesco Bartolo di Buti sono riportati in Tabella 4.

Tab. 4 – Valori misurati per bande di frequenze del Teatro Francesco Bartolo di Buti

Measured values for various frequency bands of the Francesco di Bartolo theatre in Buti

	125-250 [Hz]	500-1000 [Hz]	2000-4000 [Hz]
T30 [s]	1.57	1.36	1.15
D50 [%]	-	6.02	-

6.2 | Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca

Il teatro presenta un tempo di riverberazione di 0,85 secondi a 1000 Hz, risultando idoneo per gli spettacoli di prosa e il parlato generale, soprattutto considerando il suo volume di 2050 m³ (Fig. 30). L'indice di chiarezza (C80) mostra valori inferiori alle basse, mentre alle alte frequenze, con valori superiori a 3 dB, il campo sonoro è chiaro e più adatto all'ascolto del parlato [18]. Allo stesso modo, l'indice di definizione (D50) indica valori inferiori alle basse frequenze rispetto alle alte. In conclusione, nonostante alcune differenze, i parametri acustici

Tab. 5 – Valori misurati per bande di frequenze del Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca

Measured values for various frequency bands of the Academic Municipal theater of Bagni di Lucca

	125 [Hz]	250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]
EDT [s]	1.53	1.20	0.98	0.86	0.78	0.68
T20 [s]	1.71	1.24	0.99	0.85	0.77	0.70
T30 [s]	1.84	1.28	1.01	0.85	0.78	0.71
Ts [ms]	111.37	92.21	78.19	66.05	58.53	53.90
C80 [dB]	0.86	1.72	2.59	3.95	4.81	5.70
D50 [%]	0.42	0.42	0.45	0.52	0.57	0.59

indicano che il Teatro Comunale Accademico di Bagni di Lucca è più adatto per gli spettacoli di prosa rispetto alla musica (Fig. 30). I valori misurati relativi al Teatro Comunale Accademico di Bagni di Lucca sono riportati in Tabella 5.

6.3 | Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno

Il Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno si caratterizza per un tempo di riverberazione che si colloca in un intervallo intermedio tra i valori di riferimento tipici della musica operistica e del teatro di prosa (Fig. 30). L'indice di chiarezza (C80) rivela valori inferiori alle frequenze di 125 e 250 Hz, mentre alle alte frequenze, con valori superiori a 3 dB, il campo sonoro risulta più chiaro e adatto all'ascolto del parlato. L'indice di definizione suggerisce che la sala è più idonea per spettacoli musicali alle basse frequenze e per spettacoli di prosa e parlato alle alte frequenze [18]. I valori misurati del Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno sono riportati in Tabella 6.

Tab. 6 – Valori misurati per bande di frequenze del Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno

Measured values for various frequency bands of the The Verdi Theater of Santa Croce sull'Arno

	125 [Hz]	250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]
EDT [s]	1.41	1.22	0.98	0.87	0.68	0.71
T20 [s]	1.49	1.37	1.08	0.95	0.85	0.79
T30 [s]	1.57	1.38	1.10	1.02	0.86	0.79
Ts [ms]	104.01	96.00	85.04	73.02	64.02	58.04
C80 [dB]	1.67	1.19	2.25	3.31	4.39	5.01
D50 [%]	0.44	0.41	0.44	0.49	0.54	0.57

6.4 | Teatro Animosi di Carrara

Il Teatro Animosi di Carrara è adatto per spettacoli da ballo e da concerto. Questo risultato è confermato dal grafico che confronta il tempo di riverbero ottimale con il volume della sala, Fig. 30, il quale indica che le caratteristiche acustiche del teatro sono compatibili con tali eventi. Il parametro di chiarezza C80 supera il valore di +2 per ogni frequenza, indicando una propensione favorevole al parlato. Similmente, il parametro di definizione D50 supera il valore di 0.5 nelle medie frequenze, suggerendo che il teatro sia più adatto agli spettacoli di prosa [18]. I valori misurati del Teatro Animosi di Carrara sono riportati in Tabella 7.

Tab. 7 – Valori misurati per bande di frequenze del Teatro Animosi di Carrara

Measured values for various frequency bands of the Animosi Theater of Carrara

	125 [Hz]	250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]
EDT [s]	1.28	1.17	0.98	0.90	0.84	0.80
T20 [s]	1.50	1.32	1.11	1.05	0.99	0.87
C80 [dB]	2.25	2.34	3.73	5.05	5.34	5.74
D50 [%]	0.36	0.44	0.50	0.56	0.59	0.60

6.5 | Teatro Roma di Castagneto Carducci

Il Teatro Roma di Castagneto Carducci con un tempo di riverbero di $T_{30} = 1.26$ s e un volume di 2150 m^3 , è adatto per spettacoli da ballo e da concerto. Questo risultato è confermato dal grafico che confronta il tempo di riverbero ottimale con il volume della sala, Fig. 30. In conclusione, la recente ristrutturazione della sala ha comportato significativi miglioramenti nell'ascolto, sia per la musica che per la voce. I valori misurati del Teatro Roma di Castagneto Carducci sono riportati in Tabella 8.

Tab. 8 – Valori misurati per bande di frequenze del Teatro Roma di Castagneto Carducci

Measured values for various frequency bands of the Roma Theater of Castagneto Carducci

	125-250 [Hz]	500-1000 [Hz]	2000-4000 [Hz]	MEDIA
T30 [s]	1.68	1.10	1.00	1.26

6.6 | Teatro Concordi di Campiglia Marittima

Analizzando il tempo di riverberazione del Teatro Concordi di Campiglia Marittima, notiamo che si situa tra un teatro d'opera e uno di prosa nel diagramma tempo di riverberazione-volume (Fig. 30). Questo rende la sala idonea per spettacoli di prosa, ma meno adatta per la musica operistica. Il tempo di riverberazione trovato, pari a 0.75 s a $500-1000$ Hz, è infatti più vicino ai valori indicati per la prosa. Gli indici di chiarezza e definizione confermano la qualità acustica per la prosa. In sintesi, il Teatro Concordi è idoneo per spettacoli di prosa, ma miglioramenti nella riflettività sarebbero necessari per la musica operistica. I valori misurati del Teatro Concordi di Campiglia Marittima sono riportati in Tabella 9.

Tab. 9 – Valori misurati per bande di frequenze del Teatro Concordi di Campiglia Marittima

Measured values for various frequency bands of the Concordi Theater of Campiglia Marittima

	125 [Hz]	250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]
EDT [s]	1.09	0.91	0.71	0.63	0.61	0.60
T30 [s]	1.25	1.03	0.80	0.69	0.66	0.62
C80 [dB]	4.13	4.37	5.64	6.78	6.84	6.98
D50 [%]	0.58	0.58	0.59	0.64	0.65	0.67

6.7 | Teatro Marchionneschi di Guardistallo

Il Teatro Marchionneschi di Guardistallo con un tempo di riverbero di $T_{30} = 1.71$ s e un volume di 3000 m^3 , è adatto per ospitare concerti di musica leggera e classica. Questo risultato è confermato dal grafico che confronta il tempo di riverbero ottimale con il volume della sala, Fig. 30, il quale indica che le caratteristiche acustiche del teatro sono compatibili

con tali eventi. I valori misurati del Teatro Marchionneschi di Guardistallo sono riportati in Tabella 10.

Tab. 10 – Valori misurati per bande di frequenze del Teatro Marchionneschi di Guardistallo

Measured values for frequency bands of the Marchionneschi Theater in Guardistallo

	125-250 [Hz]	500-1000 [Hz]	2000-4000 [Hz]	MEDIA
T30 [s]	2.00	1.83	1.30	1.71

6.8 | Teatro E. De Filippo di Cecina

Il Teatro E. De Filippo di Cecina, con un tempo di riverbero di $T_{30} = 1.4$ s e un volume di 3174 m^3 , è adatto come sala da musica operistica e da concerto. Questo risultato è confermato dal grafico che confronta il tempo di riverbero ottimale con il volume della sala, Fig. 30, il quale indica che le caratteristiche acustiche del teatro sono compatibili con tali eventi. I valori misurati del Teatro E. De Filippo di Cecina sono riportati in Tabella 11.

Tab. 11 – Valori misurati per bande di frequenze del teatro E. De Filippo di Cecina

Measured values for various frequency bands of the E. De Filippo Theater in Cecina

	125-250 [Hz]	500-1000 [Hz]	2000-4000 [Hz]	MEDIA
T30 [s]	1.51	1.41	1.28	1.40

6.9 | Teatro del Popolo di Castelfiorentino

Il Teatro del Popolo di Castelfiorentino, seguendo il modello italiano, è concepito principalmente per la rappresentazione di opere teatrali incentrate sul parlato. Il Teatro del Popolo di Castelfiorentino, con un tempo di riverbero di $T_{30} = 0.84$ s e un volume di 4950 m^3 , è adatto come sala per autori del parlato. Questo risultato è confermato dal grafico che confronta il tempo di riverbero ottimale con il volume della sala, Fig. 30, il quale indica che le caratteristiche acustiche del teatro sono compatibili con tali eventi. I valori misurati del Teatro del Popolo di Castelfiorentino sono riportati in Tabella 12.

Tab. 12 – Valori misurati per bande di frequenze del teatro del Popolo di Castelfiorentino

Measured values for various frequency bands of Popolo Theater in Castelfiorentino

	125 [Hz]	250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]
EDT [s]	-	-	-	0.86	-	-
T30 [s]	1.53	1.41	1.06	0.84	0.76	0.69
C80 [dB]	1.33	3.37	5.12	7.25	8.17	9.50
D50 [%]	0.40	0.51	0.62	0.71	0.74	0.80

6.10 | Ulteriori approfondimenti sui parametri acustici rilevati nei teatri

La Tabella 13 riporta una sintesi dei parametri rilevati per ciascun teatro analizzato. In particolare, la tabella riporta i valori dell'Early Decay Time (EDT), del tempo di riverberazione (T30), dell'indice di chiarezza (C80) e dell'indice di definizione (D50).

Tab. 13 – Parametri rilevati per ciascun teatro
Parameters detected for each theatre

Teatro	EDT [s]	T30 [s]	C80 [dB]	D50 [%]
Teatro Francesco di Bartolo di Buti	-	1.36	-	0.60
Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca	0.86	0.85	3.95	0.52
Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno	0.87	1.02	3.31	0.49
Teatro Animosi di Carrara	0.9	1.05	5.05	0.56
Teatro Roma di Castagneto Carducci	-	1.26	0.00	0.00
Teatro Concordi di Campiglia Marittima	0.63	0.69	6.78	0.64
Teatro Marchioneschi di Guardistallo	-	1.71	-	-
Teatro De Filippo di Cecina	-	1.41	-	-
Teatro del Popolo di Castelfiorentino	0.86	0.84	7.25	0.71

Il parametro T30 è il solo che è stato misurato in tutte le sessioni di misurazione, mentre EDT, C80 e D50 sono stati misurati solo in alcuni dei teatri esaminati.

In Tabella 14 sono elencati i teatri oggetto delle diverse indagini sperimentali con il relativo volume e il T30 rilevato.

Tab. 14 – Teatri oggetto di studio e loro caratteristiche acustiche
Theaters under study and their acoustic characteristics

Teatro	Volume [m ³]	T30 [s]
Teatro Francesco di Bartolo di Buti	900	1.36
Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca	2050	0.85
Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno	2250	1.02
Teatro Animosi di Carrara	4550	1.05
Teatro Roma di Castagneto Carducci	2150	1.26
Teatro Concordi di Campiglia Marittima	1513	0.69
Teatro Marchioneschi di Guardistallo	3000	1.71
Teatro De Filippo di Cecina	3174	1.41
Teatro del Popolo di Castelfiorentino	4950	0.84

L'andamento dei parametri misurati a volte rientra tra i valori ottimali, a volte se ne discosta. Questi risultati dipendono ovviamente dal volume della sala e da quelle che sono le principali caratteristiche dei materiali presenti. Dai risultati sperimentali emerge una condizione eterogenea in termini di condizioni acustiche all'interno dei teatri toscani indagati nel corso negli anni. Dopo aver misurato i valori del tempo di riverberazione per ciascun teatro è possibile valutare quale sia la miglior destinazione d'uso tramite il grafico dei valori ottimali del tempo di riverberazione in funzione del volume della sala.

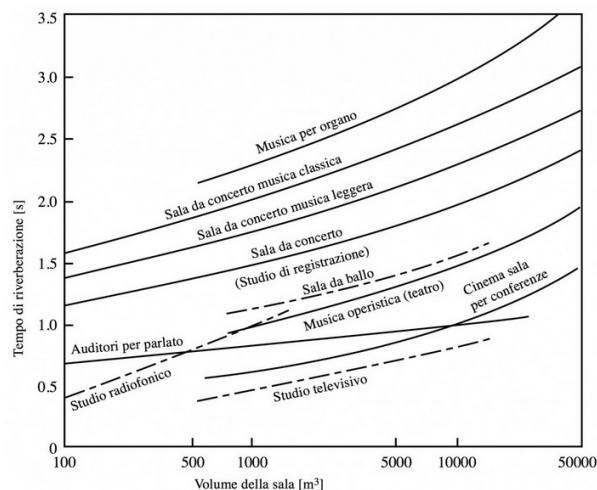


Fig. 30 – Grafico del tempo di riverbero ottimale in relazione al volume della sala e alla destinazione d'uso
Graph of the optimal reverberation time in relation to the volume of the room and the intended use

La maggior parte dei teatri presi in esame sono adatti ad ospitare concerti, in particolare il teatro Roma di Castagneto Carducci, il teatro de Filippo, il teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno, e il teatro Animosi di Carrara sono idonei come sala da musica operistica e da concerto; mentre il teatro Francesco Bartolo di Buti e il teatro Marchioneschi sono idonei per ospitare concerti di musica classica e leggera. Il teatro comunale accademico di Bagni di Lucca, il teatro Concordi di Campiglia Marittima e il teatro del Popolo, invece, a causa del basso valore del tempo di riverberazione, risultano più adatti per ospitare conferenze.

In Figura 31 è evidenziato il risultato del tempo di riverberazione T30 rappresentato in funzione volume della sala. La maggior parte dei teatri indagati hanno volumetrie significative, comprese tra i 2000 m³ e i 5000 m³, e hanno tempi di riverberazione medi molto differenti tra loro. La grande eterogeneità di valori al variare del volume della sala non è sempre in linea con i valori ottimali.

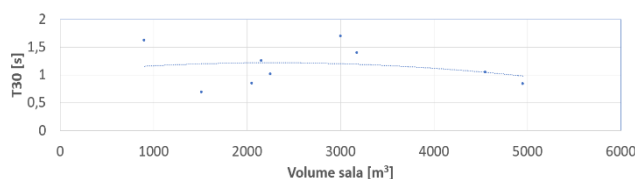


Fig. 31 – Valori di T30 in funzione del volume
T30 values as a function of the room volume

Pur nella loro variabilità, i valori di T30 risultano comunque in linea con quelli di precedenti studi [14].

7 | Discussione

L'analisi dei risultati acustici evidenzia una variazione nei valori misurati, influenzata dal volume della sala e dalle caratteristiche dei materiali utilizzati. Tuttavia, emergono alcune somiglianze tra alcuni teatri, suggerendo correlazioni interessanti.

Ad esempio, il Teatro Comunale Accademico di Bagni di Lucca, il Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno e il Teatro del Popolo presentano una caratteristica architettonica comune, ovvero la presenza di una cupola all'interno della sala. Nonostante qualche variazione, i valori di EDT, T30 e C80 di questi teatri sono simili, sebbene il Teatro del Popolo si discosti leggermente in termini di quest'ultimo parametro. È inoltre interessante notare che nella letteratura [1] sono stati condotti studi su teatri simili come il Teatro Piccinni di Bari e il Teatro Sociale di Rovigo, che presentano caratteristiche architettoniche, anno di costruzione e volumetria analoghe a quelli analizzati nel nostro studio. La Tabella 15 riporta i teatri insieme alle loro caratteristiche.

Tab. 15 – Teatri oggetto di studio con caratteristiche architettoniche simili ad altri teatri in letteratura e loro caratteristiche acustiche

Theaters under study with architectural features similar to other theaters in literature and their acoustic characteristics

Teatro	EDT [s]	T30 [s]	C80 [dB]
Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca	0.86	0.85	3.95
Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno	0.87	1.02	3.31
Teatro del Popolo di Castelfiorentino	0.86	0.84	7.25
Piccinni di Bari	1.09	1.11	3.30
Sociale di Rovigo	1.06	1.18	4.30

Inoltre, è stato notato un collegamento significativo tra i valori di EDT e T30 misurati in questa ricerca e i parametri acustici rilevati in studi precedenti [1, 9] su teatri di dimensioni analoghe. Ad esempio, i teatri esaminati, come il teatro comunale accademico di Bagni di Lucca e il teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno, mostrano una volumetria simile a quella dei teatri Vittorio Emanuele II di Benevento e il teatro Traetta di Bitonto, entrambi con un volume di circa 2000 m³. Nella Tabella 16 vengono comparati i valori di EDT e T30 di questi teatri in base al loro volume.

Tab. 16 – Confronto dei valori misurati di EDT e T30 con teatri di precedenti studi di simile volumetria

Comparison of measured EDT and T30 values with theaters from previous studies of similar volume

Teatro	Volume [m ³]	EDT [s]	T30 [s]
Teatro comunale accademico di Bagni di Lucca	2050	0.86	0.85
Teatro Verdi di Santa Croce sull'Arno	2250	0.87	1.02
Traetta di Bitonto	1925	0.95	1.15
Vittorio Emanuele II di Benevento	2000	0.85	1.00

Infine, la stessa tendenza si riscontra per il teatro Animosi di Carrara, con un volume di circa 4500 m³, il quale presenta valori molto simili di EDT, T30 e C80 rispetto al teatro Rossini di Pesaro, il teatro Alfieri di Asti, il teatro Verdi di Salerno e il teatro del Pavone di Perugia, tutti oggetto di studi precedenti [1], con una volumetria simile. Di seguito, nella Tabella 17, sono riportati i confronti dei valori dei teatri in relazione al loro volume.

Tab. 17 – Confronto dei valori misurati di EDT, T30 e C80 con teatri di precedenti studi di simile volumetria
Comparison of measured EDT, T30, and C80 values with theaters from previous studies of similar volume

Teatro	Volume [m ³]	EDT [s]	T30 [s]	C80 [dB]
Teatro Animosi di Carrara	4550	0.90	1.05	5.05
Rossini di Pesaro	4000	0.96	1.03	5.50
Alfieri di Asti	4000	0.90	1.00	5.30
Verdi di Salerno	4500	0.96	1.07	5.20
Teatro del Pavone di Perugia	4725	1.01	1.11	4.90

8 | Considerazioni conclusive

L'articolo esamina nove teatri all'italiana che appartengono tutti alla stessa regione geografica, il Valdarno in Toscana. Inoltre, presentano una simile estetica architettonica tipica dei teatri all'italiana, caratterizzata dalla presenza di logge e dalla disposizione a ferro di cavallo all'interno dello spazio teatrale. Infine, essi risalgono a un periodo storico comune, compreso tra il 1800 e il 1900. Nonostante le molte caratteristiche comuni, i teatri presi in esame presentano significative differenze. Tra queste, spiccano le variazioni volumetriche delle sale: dal Teatro Francesco di Bartolo di Buti, con un volume di 900 m³, al Teatro del Popolo di Castelfiorentino che raggiunge i 4950 m³. Inoltre, vi sono differenze nei materiali impiegati all'interno: alcuni teatri utilizzano materiali assorbenti, indicativi di interventi di restauro mirati a migliorare l'acustica, mentre altri adottano materiali meno performanti, con conseguenti variazioni nei valori delle caratteristiche acustiche, in particolare del tempo di riverberazione T30. Va notato che altri parametri acustici come EDT, C80 e E50 non sono stati calcolati per tutti i teatri, rendendo difficile un confronto diretto. Confrontando i valori misurati con il grafico del tempo di riverberazione ottimale in relazione al volume della sala, emerge chiaramente una diversa destinazione d'uso per ciascun teatro. Dai grafici ottenuti tramite i valori del tempo di riverberazione (T30) in relazione al volume della sala, si osserva una tendenza generale a una riduzione con l'aumentare del volume. Ciò suggerisce, come evidenziato da Prodi et al. [1], che le differenze nel tempo di riverberazione dipendono più dal livello di assorbimento acustico, e quindi dai materiali presenti, che dalla geometria della sala.

Sono stati analizzati anche altri aspetti relativi alle caratteristiche architettoniche e compositive dei materiali nei teatri considerati nell'analisi. Particolare attenzione è stata dedicata al comportamento dei teatri con simili peculiarità architettoniche, analizzando principalmente la presenza delle cupole nelle sale. Si è osservato che tali elementi architettonici influenzano in modo analogo i valori di EDT, T30 e C80. Infatti, i parametri misurati evidenziano similitudini tra i teatri esaminati in questa ricerca che presentano una cupola, e quelli con caratteristiche architettoniche analoghe documentati in altre indagini [1]. Infine, è stato riscontrato un forte legame tra i valori misurati di EDT, T30 e C80 nei teatri della presente ricerca e i teatri do-

cumentati in precedenti studi [1, 9] con simile volumetria, evidenziando così l'importanza della cubatura della sala nella determinazione di tali parametri acustici. In conclusione, questo studio offre una dettagliata analisi delle proprietà acustiche dei teatri all'italiana nel Valdarno, mettendo in luce le variazioni all'interno di questa tipologia architettonica e il loro impatto sull'esperienza uditiva durante le diverse forme di spettacolo. Comprendere tali differenze è cruciale per assicurare un ambiente acustico ottimale sia per il pubblico che per gli artisti che si esibiscono in questi teatri storici.

Conclusions

The article examines nine Italian theaters, all belonging to the same geographical region, the Valdarno. Furthermore, they exhibit a similar architectural aesthetic typical of Italian theaters, characterized by the presence of loggias and a horseshoe arrangement within the theater space. Finally, they date back to a common historical period, ranging from 1800 to 1900. Despite many common features, the theaters under examination present significant differences. Among these, the volumetric variations of the halls stand out: from the Teatro Francesco di Bartolo in Buti, with a volume of 900 m³, to the Popolo Theater in Castelfiorentino, which reaches 4950 m³. Additionally, there are differences in the materials used inside: some theaters use absorbent materials, indicative of targeted restoration interventions to improve acoustics, while others adopt less performing materials, resulting in variations in acoustic characteristic values, particularly in the reverberation time T30. It should be noted that other acoustic parameters such as EDT, D50 and C80 were not calculated for all theaters, making direct comparison difficult. Through the table of measured values and the graph of optimal reverberation time relative to the volume of the hall, a different intended use for each theater clearly emerges. From the graphs obtained using the reverberation time (T30) values in relation to the room volume, a general trend of reduction is observed as the volume increases. This means that, as observed by Prodi et al. [1] the differences in reverberation time are more related to the absorption properties, and thus to the characteristics of the materials, than to the geometry of the theater. Other aspects related to the architectural and compositional characteristics of the materials in the theaters considered in the analysis were also analyzed. Particular attention was paid to the behavior of theaters with similar architectural peculiarities, mainly analyzing the presence of domes in the halls. It was observed that such architectural elements similarly influence the values of EDT, T30, and C80. Indeed, the measured parameters highlight similarities between the theaters examined in this research that feature a dome, and those with analogous architectural characteristics documented in other investigations [1]. Finally, a strong connection was found between the measured values of EDT, T30, and C80 in the theaters of this research and theaters documented in previous studies [1, 9] with similar volumes, thus highlighting the importance of the hall's volume in determining these acoustic parameters. In conclusion, this study offers a detailed analysis of the acoustic properties of Italian theaters in the Valdarno, highlighting the variations within this architectural typology and their impact on auditory experience during different forms of performance. Understanding such differences is crucial to ensure an optimal acoustic environment for both the audience and the artists performing in these historic theaters.

Bibliografia

- [1] Prodi N., Pompoli R., Martellotta, F., Sato S.I., *Acoustics of Italian Historical Opera Houses*, J. Acoust. Soc. Am., 138 (2015), pp. 769-781. DOI: 10.1121/1.4926905
- [2] Prodi, N., Pompoli, R., *Acoustic in the restoration of Italian historical Opera Houses: A review*, J. Cult. Herit., 21(2016), pp. 915-921. DOI: 10.1016/j.culher.2016.03.004
- [3] Tronchin L., Bevilacqua A., *The Royal Tajo Opera Theatre of Lisbon: From architecture to acoustics*, J. Acoust. Soc. Am., 153 (2023), pp. 400-414. DOI: 10.1121/10.0016861
- [4] Cocchi, A., Garai, M., & Tavernelli, C. (2000). Boxes and sound quality in an Italian opera house. *Journal of Sound and Vibration*, 232(1), 171-191. doi:10.1006/jsvi.1999.2692.
- [5] Kuttruff, H., *Room Acoustics*, CRC Press, 6th Edition, (2014)
- [6] Pompoli, R., & Prodi, N. (2000). Guidelines for acoustical measurements inside historical opera houses: Procedures and validation. *Journal of Sound and Vibration*, 232(1), 281-301. doi:10.1006/jsvi.1999.2821.
- [7] Long, M., *Architectural Acoustics*, Elsevier, 2nd Edition, (2006).
- [8] Magrini, A., Zecchin, R., Di Bella, A., Farina, A., Capra, A., Maffei, L., Iannace, G., Ianniello, C., Dragonetti, R., Cirillo, E., Martellotta, F., Masoero, M., Astolfi, A., Pompoli, R., Prodi, N., Tarabusi, V., & Tronchin, L. (2011). Caratteristiche acustiche dei teatri storici italiani: una collaborazione di ricerca tra le Università di Bologna, Ferrara, Napoli Federico II, Napoli 2, Padova, Parma, Pavia e dei Politecnici di Bari e Torino. *Convegno Teatri d'Opera dell'Unità d'Italia*, Venezia, 23 novembre 2011.
- [9] Bevilacqua, A., Sukaj, S., Ciaburro, G., Iannace, G., Lombardi, I., & Trematerra, A. (2022). How a quartet of theatres plays under an acoustic perspective: A comparison between horseshoe-shaped plans in Campania. *Building Acoustics*, 29(3), 317-329. <https://doi.org/10.1177/1351010X221080769>.
- [10] Tronchin L., Bevilacqua A., Yan R., *Acoustic Characterization and Quality Assessment of Cremona's Ponchielli Theater* Appl. Sci. 2023, 13, 4057. <https://doi.org/10.3390/app13064057>.
- [11] Fausti, P., & Prodi, N. (2002). On the testing of renovations inside historical opera houses. *Journal of Sound and Vibration*, 258(3), 563-575. doi:10.1006/jsvi.5276.
- [12] Quaia A., Bettarello F., Caniato M. *Qualificazione acustica del Teatro So ciale di Rovigo e del Politeama di Como*, Atti del 42° Convegno Nazionale AIA, Firenze 2015.
- [13] Bevilacqua A., Merli F., Armelloni E., Farina A., Farina A., Tronchin L., *Acoustic parameters of the Municipal Theatre of Piacenza shown on different ways of representation*, Conference: 2021 Immersive and 3D Audio: from Architecture to Automotive (I3DA).
- [14] ISO 3382, *Acoustics - Measurement of Room Acoustic Parameters*, International Organization for Standardization, (1997/2009).
- [15] Garai M., Morandi F., D'Orazio D., De Cesaris S., Loreti L., *Acoustic measurements in eleven Italian opera houses: correlations between room criteria and considerations on the local evolution of a typology*, Build. Environ., 94 (2015), pp. 900-912. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.07.026
- [16] UNI/TS 11326-2:2015 <https://store.uni.com/uni-ts-11326-2-2015>.
- [17] Bartoli C., Salvadori G., D'Orazio T., Guattari C., Evangelisti L., Asdrubali F., *Analisi delle caratteristiche acustiche di alcuni teatri all'italiana toscani*. In: Atti del 49° Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica, 2023.