

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

Anna Magrini ⁽¹⁾

Roberto Zecchin, Antonino Di Bella ⁽²⁾

Angelo Farina, Andrea Capra ⁽³⁾

Luigi Maffei, Gino Iannace ⁽⁴⁾

Carmine Ianniello, Raffaele Dragonetti ⁽⁵⁾

Ettore Cirillo, Francesco Martellotta ⁽⁶⁾

Marco Masoero, Arianna Astolfi ⁽⁷⁾

Roberto Pompoli, Nicola Prodi ⁽⁸⁾

Valerio Tarabusi, Lamberto Tronchin ⁽⁹⁾

1) Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale, Università degli Studi di Pavia

2) Dipartimento di Fisica Tecnica, Università di Padova

3) Università di Parma

4) Dipartimento di Cultura del Progetto, Seconda Università di Napoli

5) DETEC, Università di Napoli “Federico II”

6) Dipartimento di Architettura e Urbanistica – Politecnico di Bari

7) Politecnico di Torino, Dipartimento di Energetica

8) Università di Ferrara

9) Università di Bologna

1. Introduzione

Il patrimonio architettonico storico Italiano è ricco di edifici destinati alla musica ed in particolare di teatri d’opera. Nel passato questi hanno rappresentato un punto fondamentale di aggregazione contribuendo a diffondere la cultura musicale nei confronti di un ampio pubblico. La rappresentazione dell’opera agli inizi del seicento stimolò la modifica e la costruzione di teatri idonei allo scopo, sia in Italia sia all’estero. La pianta a forma di ferro di cavallo, quella ellittica, quella circolare, con i palchi sulle pareti, rappresentarono forme preferite da molti progettisti dell’epoca. Queste forme divennero una scelta classica per circa tre secoli.

I teatri storici hanno servito la cultura per molti anni ed hanno influenzato l’evoluzione dell’opera, della prosa e di altre forme di spettacolo pubblico. I compositori del passato realizzavano le loro opere in funzione dell’acustica di questi teatri.

Fino ai primi anni ottanta i dati acustici per i teatri d’opera erano limitati sostanzialmente al tempo di riverberazione. I risultati delle ricerche sulla qualità del suono nelle sale da concerto a partire dagli anni settanta dimostrano che molti altri aspetti soggettivi (e parametri oggettivi correlati) contribuiscono al giudizio di qualità.

In tempi più recenti emerge una particolare attenzione per le caratteristiche acustiche di questi ambienti, destinati a soddisfare particolari esigenze musicali, per comprenderne il valore acustico, la tecnica costruttiva, l’uso di materiali appropriati per valorizzare la voce e la musica in ugual modo, ma anche per considerarli eventualmente appropriati

per manifestazioni musicali non necessariamente corrispondenti alla destinazione originale.

All'inizio degli anni novanta cominciano ad apparire studi sistematici sulla "buona acustica" per i teatri d'opera. Uno studio ampio fu poi pubblicato da Hidaka e Beranek [1]. L'analisi dei parametri oggettivi misurati in ventitre teatri d'opera, scelti in tre continenti, e la loro correlazione con le risposte a questionari date da importanti direttori di opera, ha permesso di individuare criteri quantitativi e qualitativi per la buona acustica nei teatri d'opera.

La possibilità di disporre di informazioni sulle caratteristiche acustiche dei teatri è fondamentale sia per il mantenimento delle caratteristiche nel tempo, in relazione a interventi di manutenzione o restauro, sia per la conoscenza delle peculiarità dell'ambiente in relazione agli obiettivi della sua realizzazione in relazione all'epoca storica [2]. La necessità di interventi di manutenzione o restauro non deve comportare l'alterazione delle caratteristiche originali e quindi presuppone la conoscenza di condizioni di riferimento anche per gli aspetti acustici. Come evidenziato in [3], un incendio fece danni irreparabili in uno dei migliori teatri d'opera del mondo, il 29 Gennaio 1996 nel "Gran Teatro La Fenice" di Venezia.

La testimonianza della sua acustica eccellente è rimasta comunque, conservata, in quanto poche settimane prima furono svolte misurazioni acustiche binaurali su 27 posizioni nella platea e nei palchi, preservandone le caratteristiche acustiche monoaurali e binaurali [4]. La disponibilità di queste fu molto importante durante la progettazione della ricostruzione del teatro e dimostrò l'importanza di acquisire e conservare la risposta acustica delle sale da concerto, unitamente a tutte le informazioni approfondite sui dettagli tecnici per poterla eventualmente riprodurre.

L'interesse per la caratterizzazione acustica dei teatri d'opera trova una sua ampia valorizzazione nell'ambito della ricerca svolta da parte di un gruppo di ricerca molto numeroso, costituito da 9 unità, distribuite sul territorio italiano, che hanno effettuato, sotto il coordinamento del Prof. Carmine Ianniello dell'Università di Napoli Federico II, una serie di misure e valutazioni in 18 teatri per la lirica in territorio italiano, sulla base di un finanziamento ministeriale, a partire dal 2003.

Il progetto si è svolto con la raccolta di informazioni di vario genere: storico, architettonico, artistico e, soprattutto, acustico [5].

2. Parametri acustici

Per ciascuna delle sei bande di ottava con frequenza di centro banda 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz e 4 kHz, vengono considerati i seguenti parametri (ISO 3382-1997 [6]):

1. il tempo di primo decadimento EDT ed il tempo di riverberazione, quando è possibile, in termini di T20 (-5, -25) e T30 (-5, -35) [s]
2. gli indici di chiarezza C50 e C80 (x = 50, 80 ms) [dB]

$$C_x = 10 \log \frac{\int_0^{x \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{x \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt}$$

3. l’indice di definizione D [dB]

$$D = \frac{\int_0^{50\text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

4. l’indice di robustezza del suono G [dB]

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10m}^2(t) dt}$$

In aggiunta a questi vengono considerati significativi alcuni parametri acustici utili per la spazializzazione. La valutazione del grado di “avvolgimento dell’ascoltatore” all’interno di un teatro è consentita mediante l’uso di trasduttori microfonic in grado di misurare risposte all’impulso binaurali e B-format. La stessa norma ISO 3382 prevede la misurazione di alcuni parametri in grado di quantificare la frazione di energia laterale percepita, e precisamente:

5. il coefficiente della correlazione mutua interaurale IACC

$$IACC = |IACF(\tau)|_{max} \quad \text{per } -1 \text{ ms} < \tau < +1 \text{ ms}$$

dove la funzione di correlazione mutua interaurale è:

$$IACF(\tau) = \frac{\int_0^{80\text{ ms}} p_{Sx}(t) p_{Dx}(t + \tau) dt}{\left[\int_0^{80\text{ ms}} p_{Sx}^2(t) dt \int_0^{80\text{ ms}} p_{Dx}^2(t) dt \right]^{1/2}}$$

dove $p_{Sx}(t)$ risposta orecchio sinistro e $p_{Dx}(t)$ risposta orecchio destro

6. la frazione di energia laterale LF

$$LF = \frac{\int_0^{80\text{ ms}} p_{\infty}^2(t) dt}{\int_0^{80\text{ ms}} p^2(t) dt}$$

con $p_{\infty}(t)$ = risposta dipolare e $p(t)$ = risposta omnidirezionale

3. Tecniche, strumentazioni di misura e Round Robin Test

Nell'ambito della ricerca svolta, le tecniche di misura utilizzate nelle indagini sono state diversificate, in quanto ogni partecipante ha operato con la strumentazione disponibile nella propria sede o acquisita ad hoc per il progetto. *Per le misure nei diversi teatri si fa riferimento ai contributi specifici contenuti negli atti.*

Per verificare che ogni gruppo di ricerca partecipante al progetto operasse con metodi mutuamente compatibili, in modo da conseguire risultati omogenei per quanto possibile, fu organizzato un Round Robin Test in un teatro "di riferimento".

A questo scopo l'Unità di Ricerca di Bologna organizzò l'accesso al Teatro Bonci di Cesena per i gruppi che avrebbero partecipato con i propri operatori e la propria strumentazione. Data l'esiguità del tempo a disposizione, l'obiettivo condiviso per le misure fu contenuto nella scelta di una stessa posizione della sorgente sul palcoscenico ed una stessa posizione nella fossa orchestrale con un punto di ricezione nella platea ed uno in un palchetto laterale, pur essi comuni. Il riferimento normativo era lo standard ISO 3382-1997 [6]. Nonostante la ristrettezza dei tempi di accesso alla sala, furono raccolti risultati utili per un confronto.

La Tabella 1 riporta per ogni parametro acustico misurato il numero di valori che ciascuna Unità ha messo a disposizione a seguito delle misure. Qualche Unità ha utilizzato anche quattro software diversi per l'elaborazione delle risposte all'impulso.

Tabella 1 – Dati prodotti per il Round Robin Test

Descrittore	Numero di dati forniti da ciascuna unità che ha effettuato le misure nel teatro Bonci di Cesena				
RT30		8	6	4	4
EDT		8	6	4	4
C80	8	8	6	4	4
D50	8	8	6	4	4
LF	6	8	4		4
IACC		8	4		4
G	12	8	4		8

Alcuni confronti tra valori di ciascun parametro descrittore sono riportati in Figura.1 L'esame dei grafici permette le considerazioni seguenti.

- 1) I valori dei descrittori della riverberazione T30 ed EDT sono all'interno di un intervallo modesto tra i valori massimi e minimi riscontrati nel punto di ricezione R1 in platea, sia per la posizione della sorgente sul palcoscenico sia nella fossa.
- 2) Il descrittore C80 presenta delle differenze apprezzabili, tuttavia gli ordini di grandezza sono coerenti.
- 3) Un commento analogo è valido per D50.
- 4) Le differenze riscontrate per LF alle frequenze basse sono notevoli.
- 5) Viceversa le differenze tra i valori di IACC alle frequenze basse sono contenute, mentre crescono all'aumentare della frequenza.
- 6) I valori di G presentano le differenze più elevate.

“Teatri d’opera dell’Unità d’Italia”

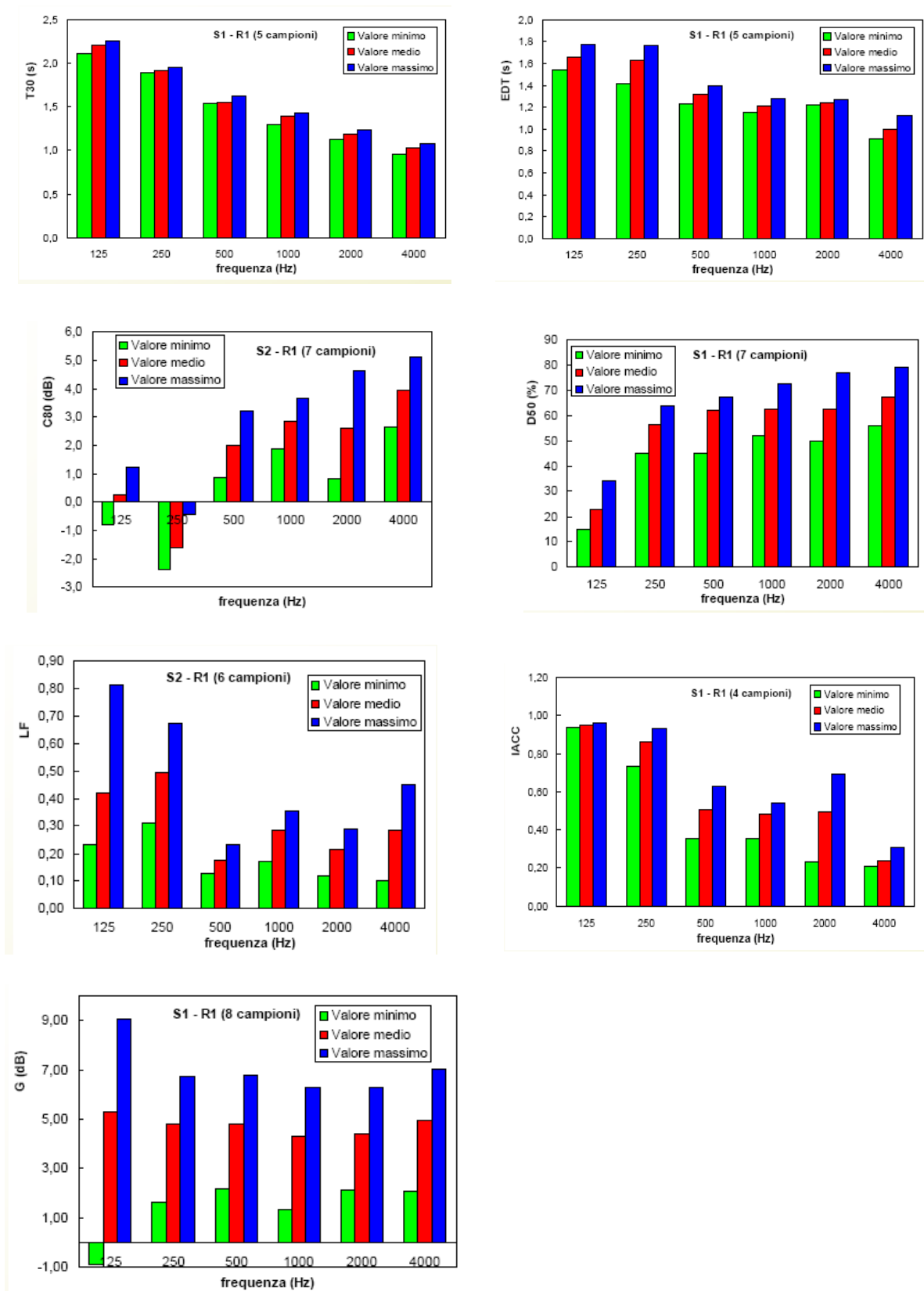


Figura 1 – Rappresentazione dei valori misurati di alcuni dei parametri acustici (massimo, minimo, medio) in frequenza nel teatro Bonci di Cesena

I fattori che possono essere individuati per spiegare le differenze trovate sono molteplici: Differenti operatori, differenti hardware e software, piccole differenze nella collocazione della sorgente e del ricevitore nei punti concordati sulla carta, difficoltà di verificare una ripetibilità delle misure per ciascun gruppo. sensibilità diverse dei diversi descrittori.

I risultati, anche se non sempre confrontabili, hanno però permesso una presa di coscienza del problema in modo che ogni unità operasse successivamente nel modo più appropriato.

4. Caratteristiche geometriche

I teatri analizzati sono riassunti in Tabella 2, in riferimento alle attività svolte da ciascuna Unità. Le peculiarità di ogni teatro sono descritte nelle singole memorie inserite negli atti, elaborate da parte di ciascun gruppo di ricerca.

Si riporta in Figura 2 una panoramica globale della forma (in termini di pianta e sezione) dei teatri analizzati e la posizione dei punti di misura.

Tabella 2. Elenco dei teatri d'opera analizzati nella ricerca

Unità	Teatri analizzati		
Bari	Piccinni Bari	Paisiello Lecce	
Parma	La Scala Milano	Valli Reggio Emilia	Regio Parma
Napoli	San Carlo di Napoli	Opera di Roma	
Napoli2	Mercadante - Napoli	Verdi – Salerno	
Pavia	Teatro Fraschini - Pavia	Teatro Sociale di Como	
Torino	Alfieri Asti	Teatro Grande Brescia	
Bologna	Comunale Bologna	Bonci Cesena	
Ferrara	Comunale Ferrara	Comunale Modena	
Padova	La Fenice, Venezia	G. Verdi, Trieste	

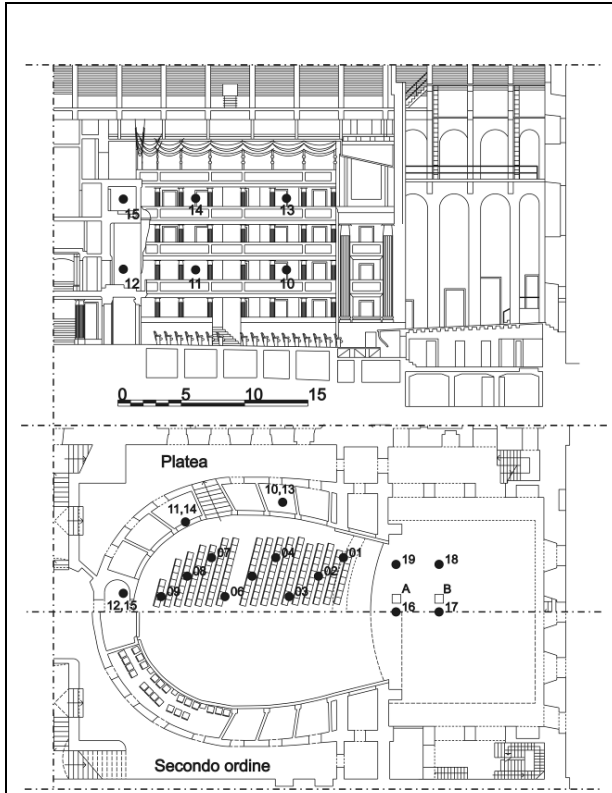
5. Misure acustiche – Alcune analisi globali

Le misure effettuate nei teatri hanno riguardato i diversi parametri considerati significativi per la caratterizzazione delle sale da musica: C50 [dB], C80 [dB], D50 [%], EDT [s], RT20 [s], RT30 [s], IACC, LF.

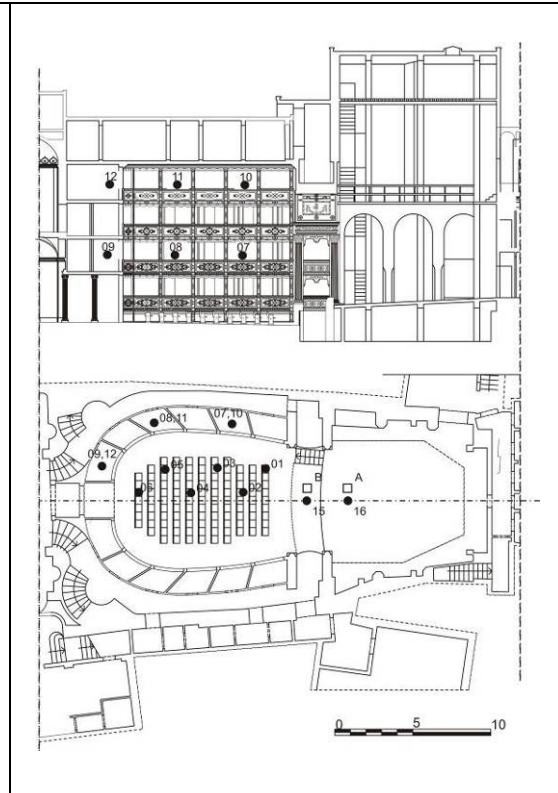
Si riporta il confronto tra i valori medi del tempo di riverberazione rilevati nei teatri con quelli di numerose sale analizzate in campo internazionale, rappresentate da teatri d'opera e più in generale da sale per la musica, in riferimento al volume della sala (Figura 3) e il confronto tra dati misurati in relazione alla superficie della platea (Figura 4).

Inoltre si presentano alcuni aspetti relativi alla distribuzione del tempo di riverberazione (Figura 5) e della Chiarezza C80 (Figura 6) lungo l'asse longitudinale di ciascuna sala, in funzione della distanza sorgente-ricevitore.

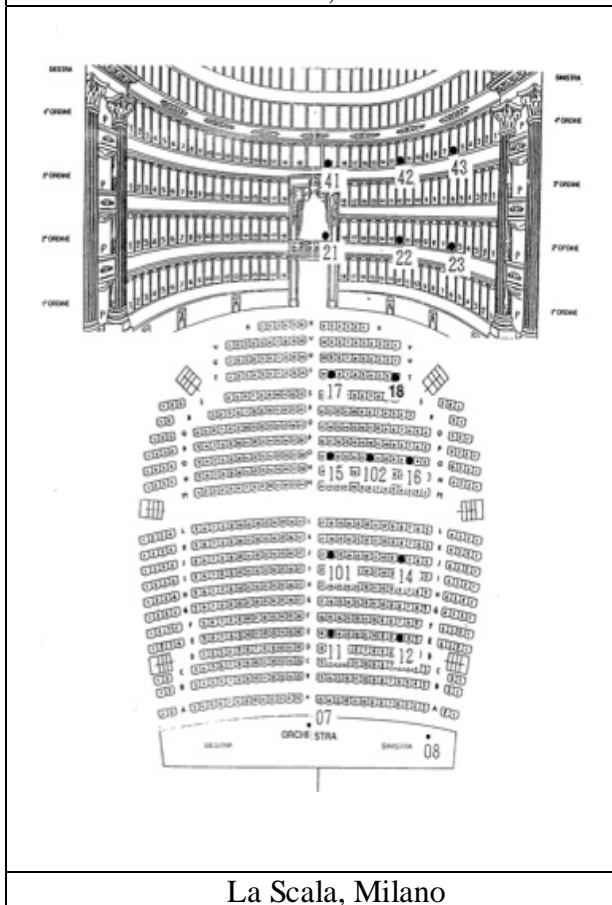
“Teatri d’opera dell’Unità d’Italia”



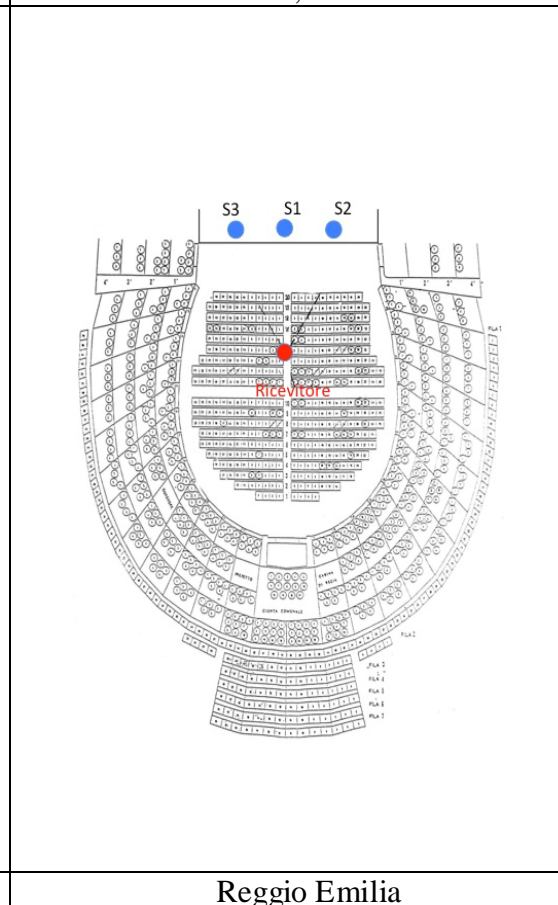
Piccinni, Bari



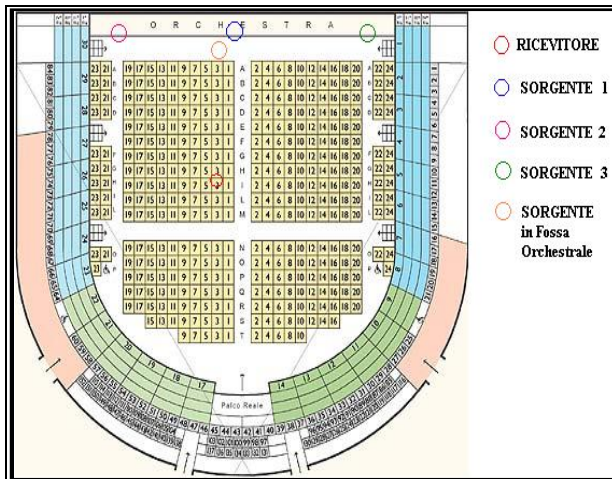
Paisiello, Lecce



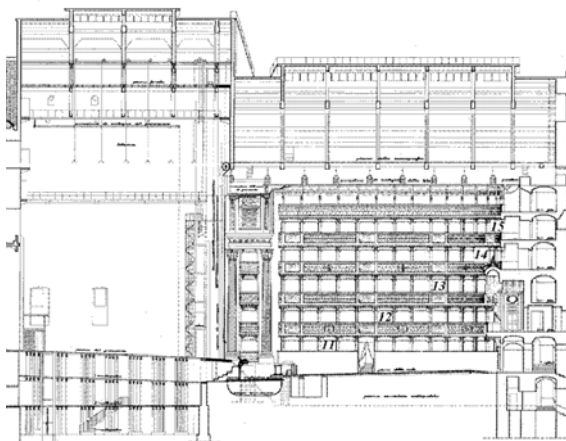
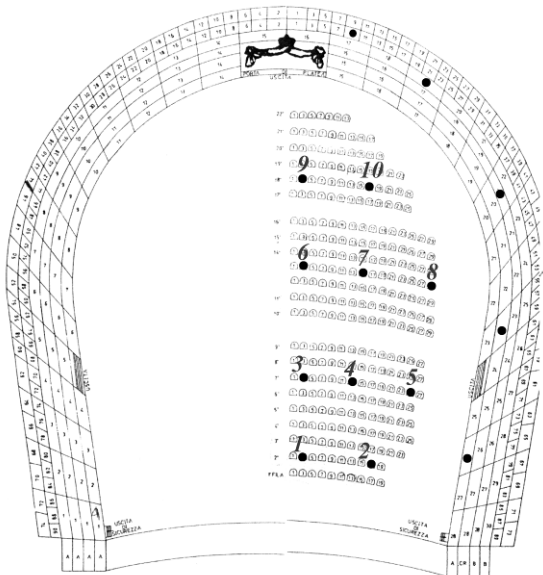
La Scala, Milano



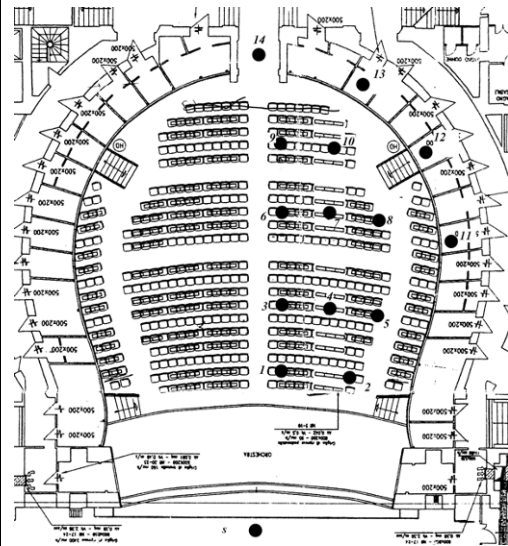
Reggio Emilia



Parma

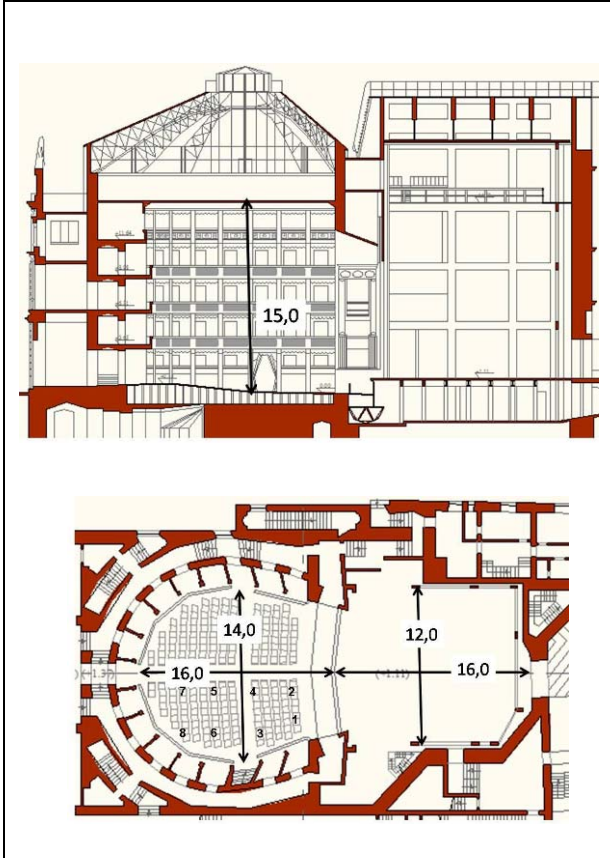


Napoli

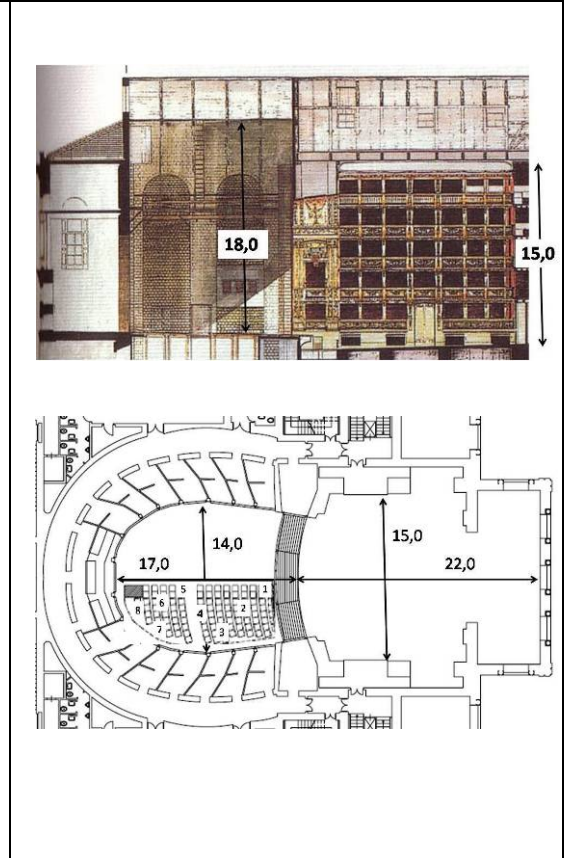


Roma

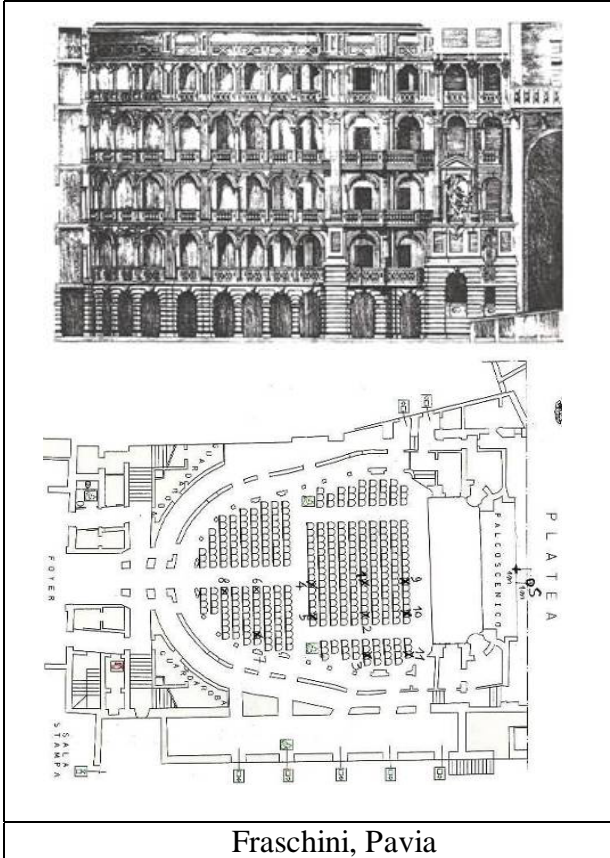
“Teatri d’opera dell’Unità d’Italia”



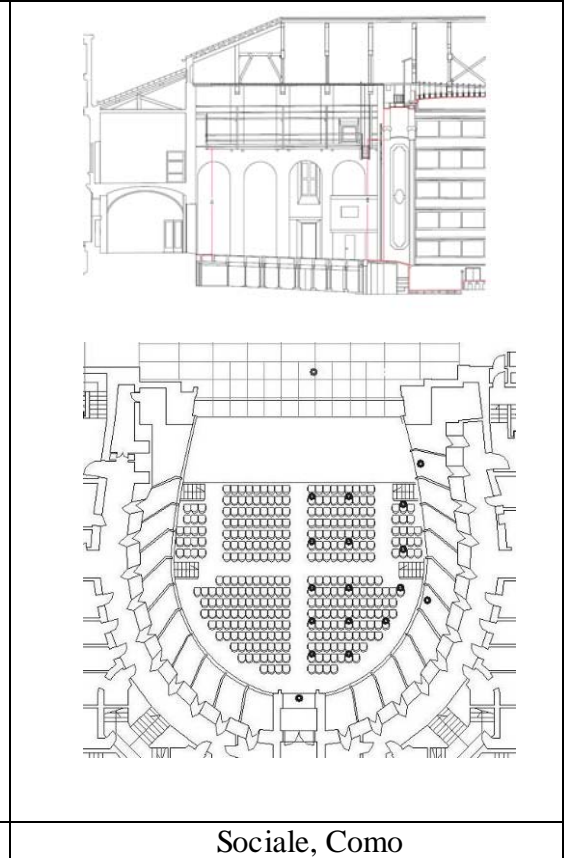
Mercadante, Napoli



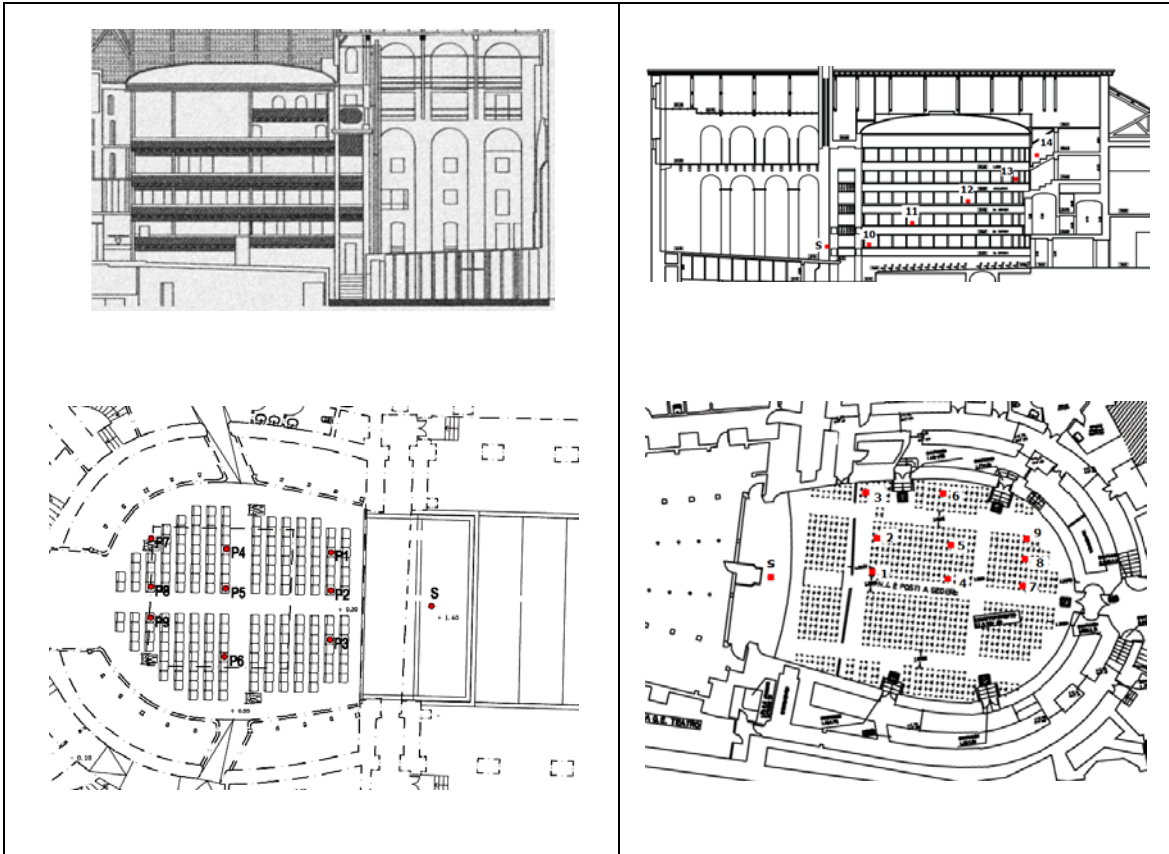
Verdi, Salerno



Fraschini, Pavia

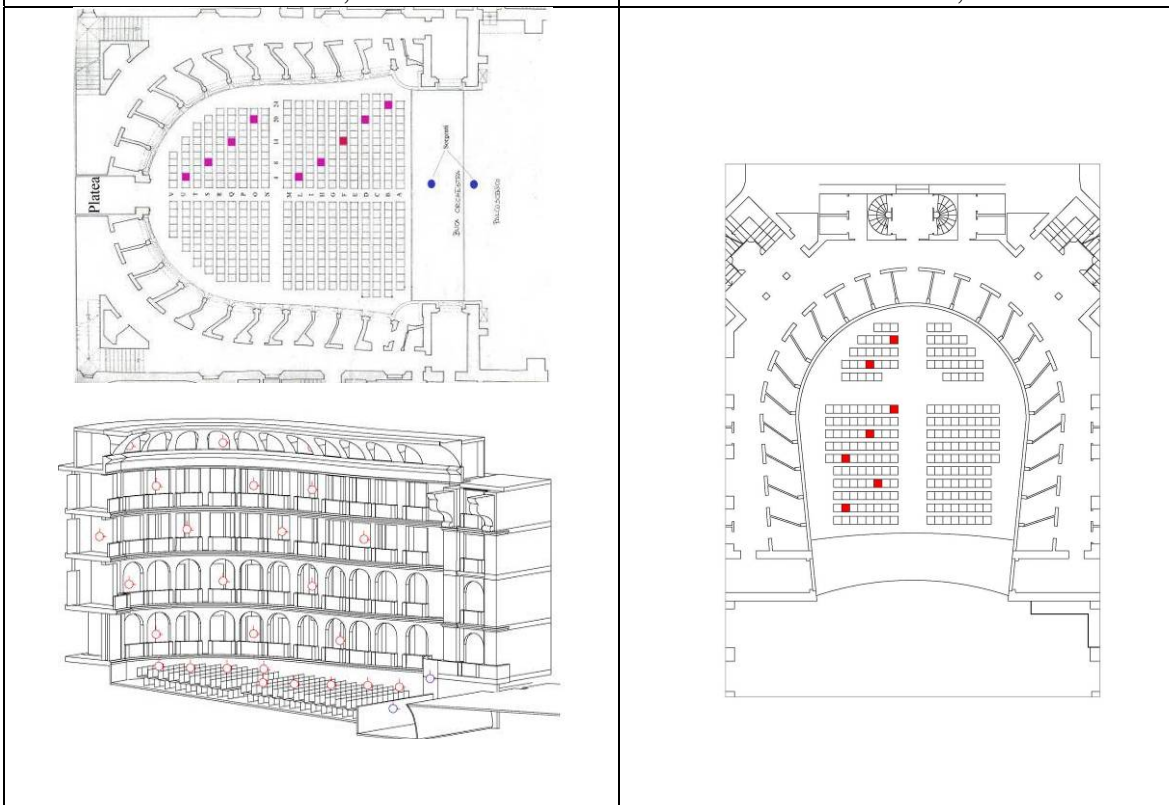


Sociale, Como



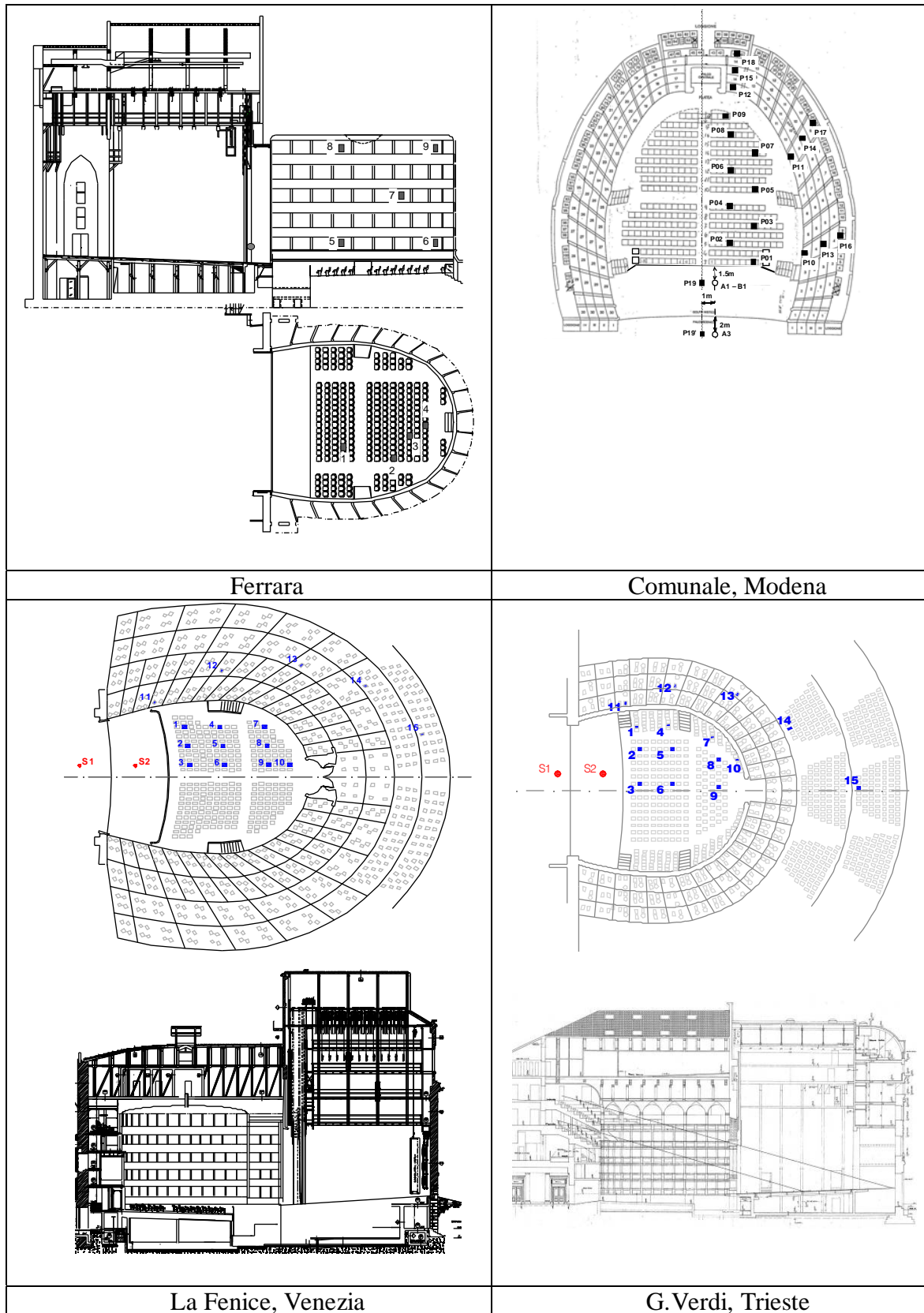
Alfieri, Asti

Teatro Grande, Brescia



Bologna

Bonci, Cesena



Ferrara

Comunale, Modena

La Fenice, Venezia

G. Verdi, Trieste

Figura 2 Forma dei teatri e posizione dei punti di misura

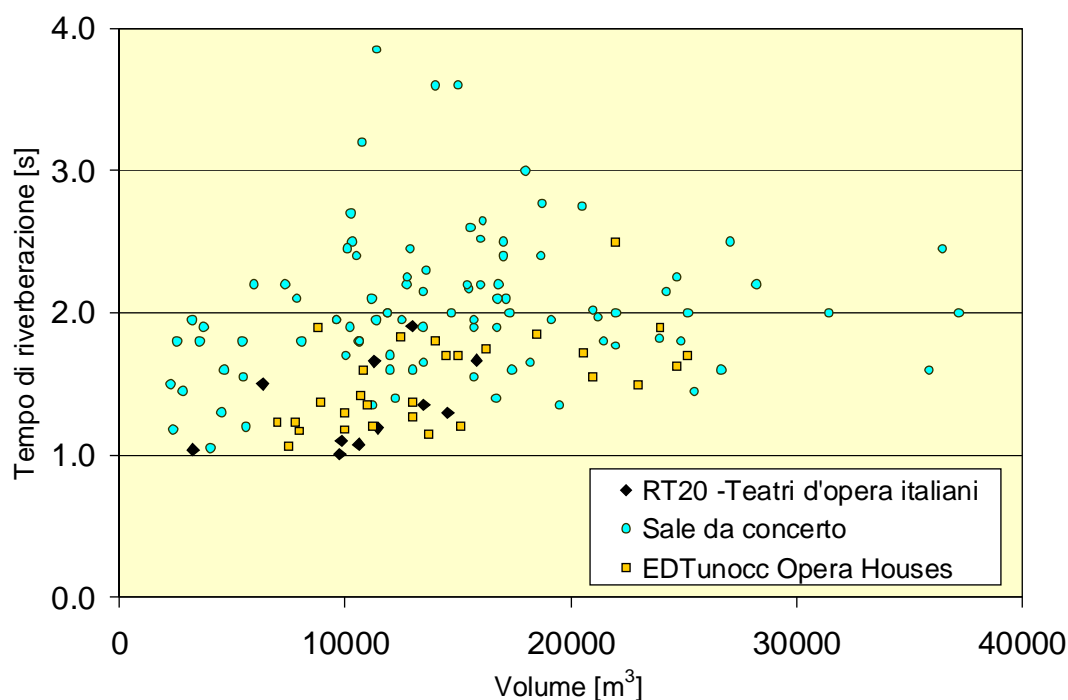


Figura 3 – Tempo di riverberazione medio (125Hz – 4 kHz) delle sale in confronto con valori misurati in sale per la musica di diversi paesi in funzione del volume della sala

Dalla figura 3 si osserva che mediamente i valori del tempo di riverberazione dei teatri italiani si attestano tra 1 e 1.5 s, tranne i teatri di Ferrara, Modena Bologna e Cesena che presentano valori medi tra 1.5 e 2 s, mentre quelli delle altre sale [7,8] si distribuiscono in generale in intervallo più ampio tra 1.0 e 2.5 s. I valori di EDT misurati da Beranek in Teatri d’Opera a sala non occupata [9] sono più vicini a quelli del tempo di riverberazione TR20 delle sale italiane.

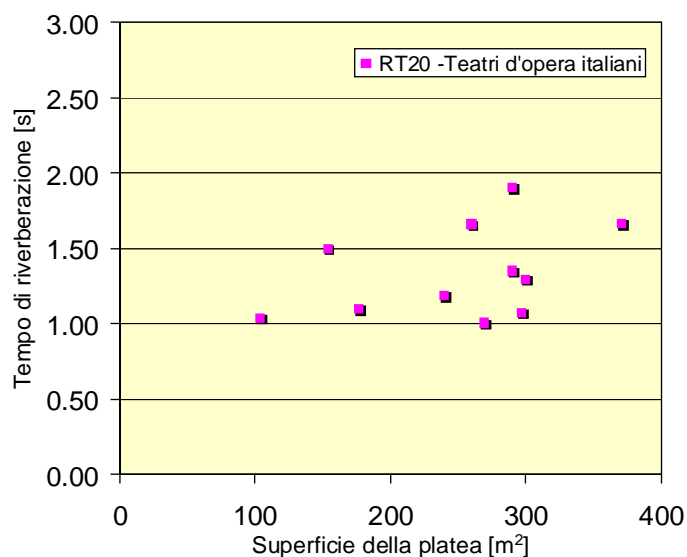


Figura 4 –Tempo di riverberazione medio (125Hz – 4 kHz) delle sale in funzione della superficie della platea della sala

Dalla figura 4 emerge che si ha una leggera tendenza all’aumento del tempo di riverberazione con l’aumento della superficie della platea.

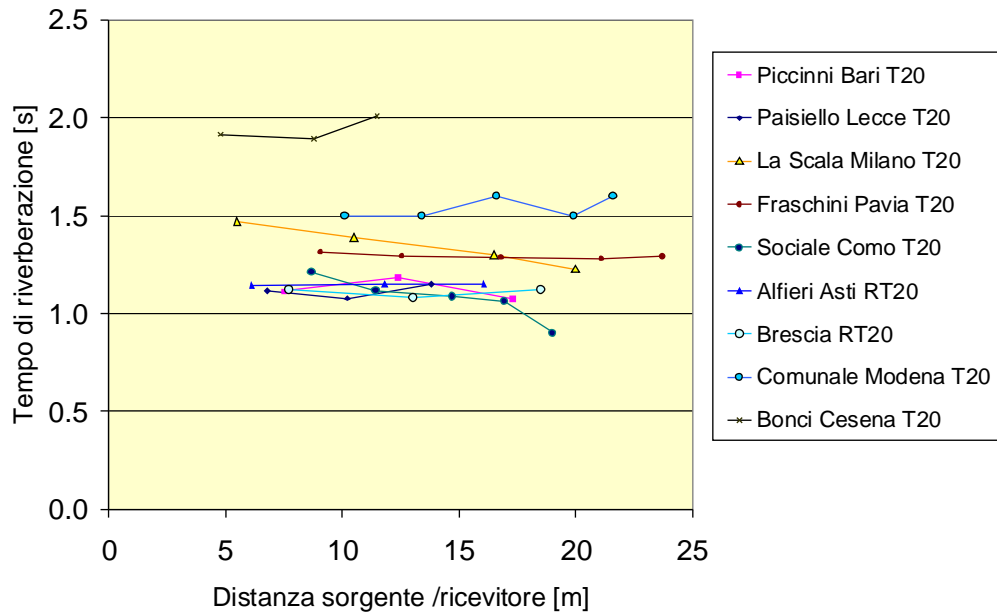


Figura 5 – Rappresentazione del tempo di riverberazione medio (125Hz – 4 kHz) in punti distribuiti lungo un asse longitudinale dal palcoscenico al fondo della sala

Un aspetto interessante è rappresentato dalla distribuzione della riverberazione nella sala (figura 5) che si mantiene molto uniforme, con una leggera tendenza a decrescere, ma sempre con differenze molto contenute.

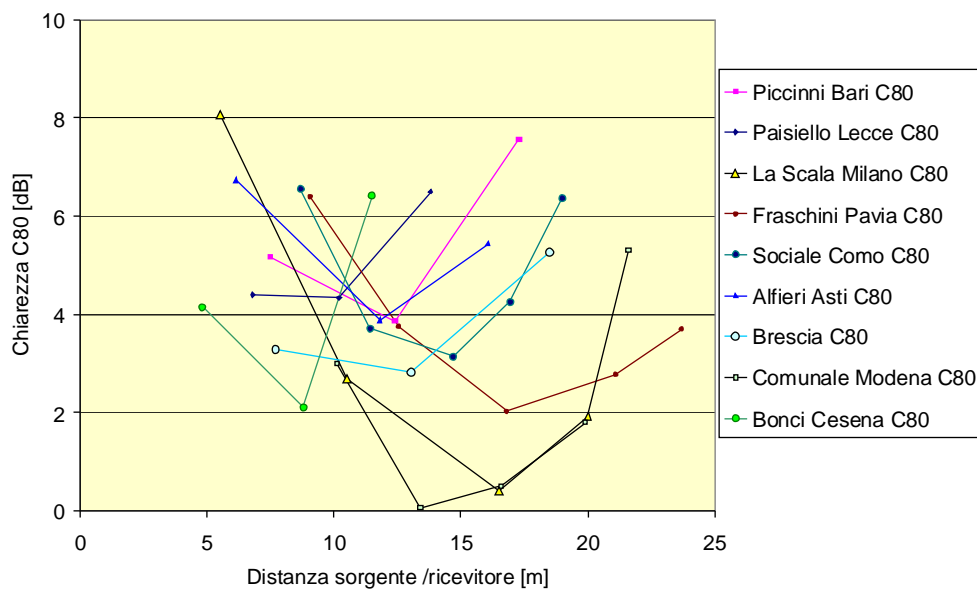


Figura 6 – Rappresentazione della Chiarezza C80 media (125Hz – 4 kHz) in punti distribuiti lungo un asse longitudinale dal palcoscenico al fondo della sala

Valutando la Chiarezza (C80) in riferimento ai valori medi, non si trovano indicazioni particolarmente significative nella maggior parte dei casi: i valori si attestano su livelli spesso molto distanti da quelli riconosciuti ottimali per i teatri. Tuttavia un aspetto particolare deve essere evidenziato (figura 6), in relazione alla variazione di questa grandezza in punti via via più distanti dalla sorgente sonora.

Si può osservare infatti un punto in cui si ha un minimo del valore della chiarezza, per ciascun teatro.

Una spiegazione plausibile della diminuzione di chiarezza nella parte centrale della platea è legata alle curvature delle pareti verticali, prive di aggettazioni, dal pavimento della sala al primo ordine di palchi. Di fatto, come riportato in [10] il campo delle prime riflessioni produce un addensamento dell'energia di prima riflessione verso il fondo della platea. Questo spiega, almeno parzialmente, della risalita della chiarezza con la distanza.

Nel caso che la pianta del teatro sia rettilinea convergente verso il boccascena, un ulteriore contributo è causato dall'effetto "pianta a ventaglio"

In figura 7 è riportata la rappresentazione della chiarezza in funzione del rapporto tra la distanza sorgente-ricevitore e la distanza sorgente-posizione centrale della platea. La variazione di chiarezza all'aumentare della distanza dalla sorgente è importante in quanto rappresenta un effetto uditivamente percepibile delle maggiori riflessioni dovute alle caratteristiche architettoniche del teatro. L'effetto che si rileva al centro della sala è comune a tutti i teatri analizzati e pur tenendo conto dell'incertezza di misura della Chiarezza, che non ne consente una valutazione accurata, se non attraverso indagini molto estese, si può notare come tutti i punti di minimo ricadano con buona approssimazione in corrispondenza del centro della platea, che può risentire in modo significativo della forma del soffitto.

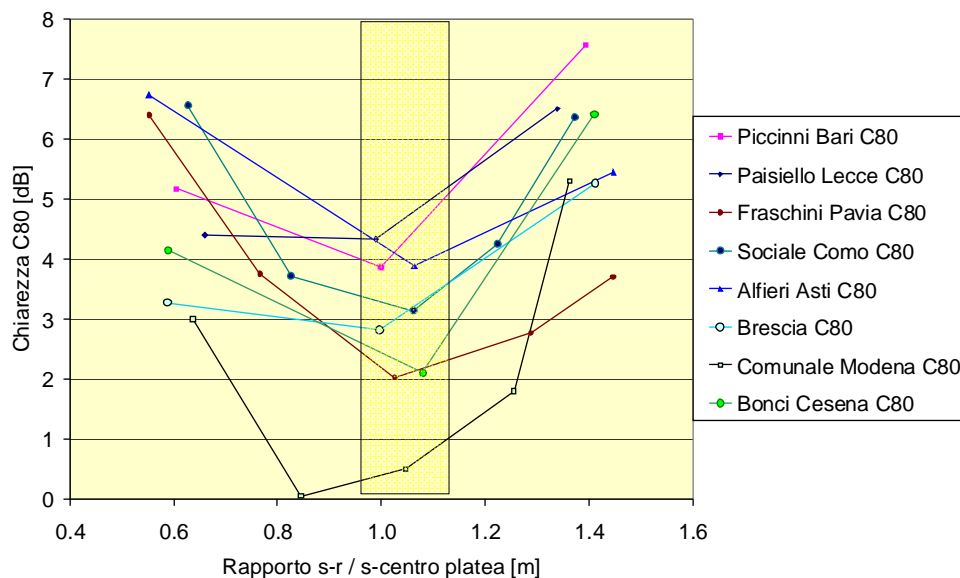


Figura 7 – Rappresentazione della Chiarezza – C80 media (125Hz – 4 kHz) in punti distribuiti in funzione di una distanza normalizzata.

6. Conclusioni

Questo progetto ha inteso fornire un contributo significativo alla conoscenza oggettiva dell’acustica dei teatri storici in Italia. Il conseguimento dell’obiettivo è stato possibile grazie all’impegno delle Università, che hanno fornito un importante contributo allo studio acustico oggettivo di teatri storici. Questa attività era finalizzata alla realizzazione di un vero e proprio “catalogo acustico” che, in forma multimediale, potesse conservare dati molto particolari per un campionario significativo di teatri storici di stile italiano. La sua realizzazione si è dimostrata molto più complessa di quanto preventivato: il progetto, per la sua vastità e complessità, si è dimostrato spesso difficile da sviluppare ma ha in ogni caso portato a realizzare un compendio di informazioni molto vasto e molto importante.

Infatti, la caratterizzazione acustica in termini di descrittori moderni, comprendente le risposte impulsive originali in forma numerica ed altre informazioni, rappresentano un riferimento importante per la conoscenza e conservazione dei grandi ambienti per la musica.

7. Bibliografia

- [1] T.Hidaka, L.L.Beranek, Objective and Subjective evaluations of twenty-three opera houses in Europe, Japan and the Americas, *J.Acoust.Soc.Am.* Vol.107, n.1, January 2000
- [2] N. Prodi, R. Pompoli, Guidelines for acoustical measurements inside historical opera houses: procedures and validation, *J. Sound Vib.*, Vol. 232-1, 2000, April.
- [3] A. Farina, R. Ayalon, Recording Concert Hall Acoustics for Posterity, 24th AES Conference on Surround Sound. Techniques. Technology and Perception – Banff. Canada (2003)
- [4] L. Tronchin, A. Farina: Acoustics of the former Teatro “La Fenice” in Venice, *Journal of the Audio Engineering Society*, New York, 45(12), 1051-1062, 1997
- [5] Ianniello, C., *An acoustic catalogue of historical Italian theatres for opera* in Proceedings Forum Acusticum, 2005, Budapest
- [6] ISO 3382:1997, Acoustics -- Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.
- [7] L. L. Beranek “Music, acoustics & architecture” Wiley, 1962
- [8] M. Barron “Auditorium acoustics and architectural design”, Taylor & Francis, 1993
- [9] L. L. Beranek Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture, Springer, November 2003

Altri riferimenti bibliografici riferiti ad analisi acustiche svolte in teatri italiani

- [A] Cirillo E., Martellotta F., “The Acoustics of the “Teatro Piccinni” in Bari (Italy)”, Proc. Forum Acusticum 2005, Budapest 29 aug-2 sep 2005. Session RBA-OH. Paper 283-0
- [B] Zecchin R., Di Bella A., Boniotto E., Boscolo S., Bovo M.E., Granzotto N., Rinaldi C. (2006). Risultati di una indagine sui teatri d’opera nel triveneto: analisi dei principali parametri acustici. In: XXXIII Convegno Nazionale Associazione Italiana di Acustica. Ischia (NA), 10-12 maggio 2006, p. 527-532, ISBN/ISSN:

- 88-88942-13-0.
- [C] Tronchin L., “Acoustical design of diffusing panels in the Theatre Vittorio Emanuele, Messina, Italy”, Proc. of RADS, Room Acoustics: Design and Science, Awaji, Japan, 2004
 - [D] Farina, L. Tronchin, 3D Impulse Response measurements on S. Maria del Fiore Church. Florence. Italy, Proc. of 16th International Congress on Acoustics, Seattle, USA (1998)
 - [E] L. Tronchin: The reconstruction of the Teatro Galli in Rimini: the acoustic design. Proc. of ISRA2010, International Symposium on room Acoustics, Melbourne, Australia, 2010
 - [F] L. Tronchin, R. Shimokura: Effectiveness of 3D auralisation to evaluate room acoustic enhancement in theatre restoration. Proc of 6th International Conference on Auditorium Acoustics, IOA, Copenhagen, Denmark, 2006
 - [G] Sato S. and Prodi N., Subjective evaluation of the perceived balance between a singer and a piano inside different theatres, Acta-Acustica united with Acustica, 95(3), 2009, pp. 532-539.
 - [H] Parati L., Prodi N., Pompoli R., Computer model investigations on the balance between stage and pit sources in opera houses, Applied Acoustics, 68(10), 2007, pp. 1156-1176.
 - [I] Prodi N. and S. Velecka, A scale value for the balance inside an historical opera house, J. Acoust. Soc. Am., 117 (2), 2005, pp. 771 – 779.
 - [J] S. Sato, H. Sakai, Prodi N., Subjective preference judgements for sound sources located on stage and in the orchestra pit of an opera house, J. Sound Vib., (2002), 258 (3), pp. 549 – 561.
 - [K] Fausti P. and Prodi N., On the testing of renovations inside historical opera houses, J. Sound Vib., (2002), 258 (3), pp. 563 – 575.
 - [L] Prodi N. (2008), Correzione della forma in una sala teatrale, 35° Congresso AIA. Milano, 13 - 15 Giugno 2008. ISBN:978-88-88942-23-8.
 - [M] Prodi N., Pompoli R., L’acustica nel restauro dei teatri storici: il caso del Teatro Zandonai di Rovereto, ATTI 32° Convegno AIA, Ancona 15-17 Giugno 2005. ISBN 8888942092.
 - [N] D. Commins, A. Farina, Pompoli R., Fausti P., Prodi N., Acoustics of Teatro degli Arcimboldi in Milan: design, computer and scale model, details, results, Proc. of Auditorium Acoustics – IOA Congress, 19 – 21 July 2002 in Institute of Acoustics, Vol. 24, Part 4, 2002. ISBN 1901656470 / ISSN 0309-8117
 - [O] Pompoli R., Prodi N., A study on balance inside an historical opera house, Proc. of ICA2001, Roma, 3 – 7 Settember 2001. ISBN 8888387021
 - [P] Prodi N., Pompoli R., The acoustics of three Italian historical theatres: the early days of modern performance spaces, Proc. of Tecniacustica2000, Madrid, 16 – 20 Ottobre 2000 in Revista de Acustica, Vol. XXXI, 2000. ISBN 8487985033
 - [Q] Fausti P., Pompoli R., Prodi N., Acoustics of opera houses: a cultural heritage, J. Acoust. Soc. Am. 105, 929 (1999)
 - [R] Pompoli R., Prodi N., Una proposta per il rilievo del patrimonio acustico dei teatri storici d’opera, Atti del Convegno - L’acustica dei teatri storici: un bene culturale, Ferrara, 4 Novembre 1998.
 - [S] Astolfi, M. Masoero, R. Pisani, A. Bortolotto, M. Filippi, Acoustical characterisation of small italian opera houses, Forum Acusticum 2005, Budapest, 29 agosto – 2 settembre 2005.