

PATRIZIO BARBIERI – LAMBERTO TRONCHIN

L'ACUSTICA TEATRALE
NEL NEOCLASSICISMO ITALIANO

CON UNA RICOSTRUZIONE VIRTUALE DEL 'TEATRO IDEALE'
DI FRANCESCO MILIZIA (1773)

Lo studio si propone di documentare le reazioni che suscitarono in Italia le proposte di rinnovamento dell'architettura teatrale formulate dal neoclassicismo francese. Formalmente basato sul ritorno all'impianto palladiano, detto rinnovamento principalmente si ispirava a motivazioni di egualitarismo sociale, coinvolgenti sia la visuale che l'acustica.

Nei §§ 1-2 vedremo che in Italia tali proposte furono parzialmente accolte solo da teorici dell'architettura quali Enea Arnaldi (1762) e Francesco Milizia (1772-94); furono invece respinte da tutti gli altri, Giordano Riccati compreso (1790). Le loro proposte verranno analizzate e confrontate con le valutazioni che vengono oggi formulate in relazione alla progettazione acustica dei teatri d'opera. A differenza della Francia, nessuna sala fu inoltre realizzata sulla base di tali principi. Con la motivazione di svariate ragioni (principalmente sociali, economiche, e acustiche) non trovarono quindi accoglienza la pianta circolare tronca della platea, le 'democratiche' balconate senza divisori (al posto degli aristocratici palchi), il recinto orchestrale incassato sotto il palcoscenico, i soffitti cupuliformi.

Lo studio verrà inoltre corredato di una sintesi comparativa dei rilevamenti sperimentali effettuati in tempi recenti su teatri italiani del periodo in oggetto (§ 3) e di una ricostruzione digitale del 'teatro ideale' di Milizia, con relative simulazioni acustiche (§ 4).

1. ARNALDI E MILIZIA: LE INNOVAZIONI STRUTTURALI

Il dibattito sul rinnovamento dell'architettura teatrale può considerarsi iniziato in Francia nel 1749, con la *Préface-pamphlet* inserita da Voltaire nella

Semiramis. Ciò stimolò l'Académie d'architecture a inviare in Italia due architetti, al fine di esaminare i teatri ivi esistenti. Charles-Nicolas Cochin, uno dei due inviati, in una relazione di viaggio pubblicata al suo ritorno (1758) lodò il teatro palladiano di Vicenza, criticando – per ragioni di estetica architettonica – la struttura a palchi delle sale all'italiana. Nel 1765 lo stesso autore pubblicò un *Projet d'une salle de spectacles* avente molte affinità col summenzionato teatro Olimpico, tra le quali la platea ellittica avente l'asse maggiore parallelo alla scena.¹

Ciò ebbe immediate ripercussioni anche sulla trattatistica apparsa nella Penisola. Riguardo alla progettazione delle sale da spettacolo il neoclassicismo italiano prende infatti l'avvio nel 1762, quando l'architetto conte Enea Arnaldi pubblica a Vicenza *l'Idea di un teatro nelle principali sue parti simile a' teatri antichi all'uso moderno accomodato*. Fervente classicista e difensore della tradizione palladiana a Vicenza, anche nel testo ribadisce di voler realizzare «quella forma di teatro, che sia al presente uso di recitare accomodata, ma che s'allontani il meno che sia possibile dalle regole de' teatri antichi».² Di fatto egli però lascia praticamente immutata la tradizionale struttura a palchi delle sale italiane, limitandosi a trasformare – unicamente sulla base dell'acustica pseudo-aristotelica e vitruviana – in gradinata semicircolare la platea e in cilindrica la fossa orchestrale (Fig. 1).

La proposta di Arnaldi era ben nota a Francesco Milizia, anch'egli convinto che il «solo Teatro Olimpico, con cui il Vitruviano Palladio abbellì la sua patria Vicenza, può stimarsi un buon teatro».³ Ritenendola però insoddisfacente, dieci anni dopo pubblicò un più radicale progetto.⁴ In esso anch'egli si proponeva di migliorare l'acustica, dato che – a causa della pianta curvilinea allungata e dei palchi, afferma – nelle sale d'opera italiane «da quelle strane figure [= cantanti] si sente talvolta trapelare qualche esilissima voce, non si odono giammai parole».⁵ Milizia operava però a Roma, cioè in un ambiente che gli permetteva di

¹ Cfr. M. SAJOURS D'ORIA, *Una scena per il teatro dei lumi*, in *Francesco Milizia e la cultura del Settecento*, a cura di M. Basile e G. Distaso, Galatina (Lecce), Congedo, 2002, p. 147; C.-N. COCHIN, *Voyage d'Italie...*, III, Paris, Jombert, 1758, pp. 183-186 (in cui, dell'Olimpico, loda esplicitamente la pianta ellittica con l'asse maggiore parallelo alla scena).

² Cfr. E. ARNALDI, *Idea di un teatro nelle principali sue parti simile a' teatri antichi all'uso moderno accomodato*, Vicenza, Veronese, 1762, p. 10. Su tale autore vedi E. POVOLEDO, *Arnaldi, Enea*, in *Dizionario biografico degli italiani*, IV, Roma, Istituto della Enciclopedia Italiana, 1962, pp. 245-247.

³ F. MILIZIA, *Del teatro*, Roma, Casaletti, 1772 (da qui in avanti *Del teatro 1772*), p. 115.

⁴ In una lettera all'architetto Temanza (datata Roma, 30 marzo 1771) egli infatti giudica «l'idea dell'Arnaldi poco soddisfacente»: cfr. F. MILIZIA, *Lettere di Francesco Milizia a Tommaso Temanza pubblicate per la prima volta nelle nozze Muzani-Di Caldogno*, Venezia, Tipografia di Alvisopoli, 1823, p. 32.

⁵ *Del teatro 1772*, p. 53, ove Milizia aggiunge: «Questo silenzio è seguito da un solenne sbattimento di mani, e da qualche urlo della civilissima udienda, inventrice di questo antisonnifero». Detto

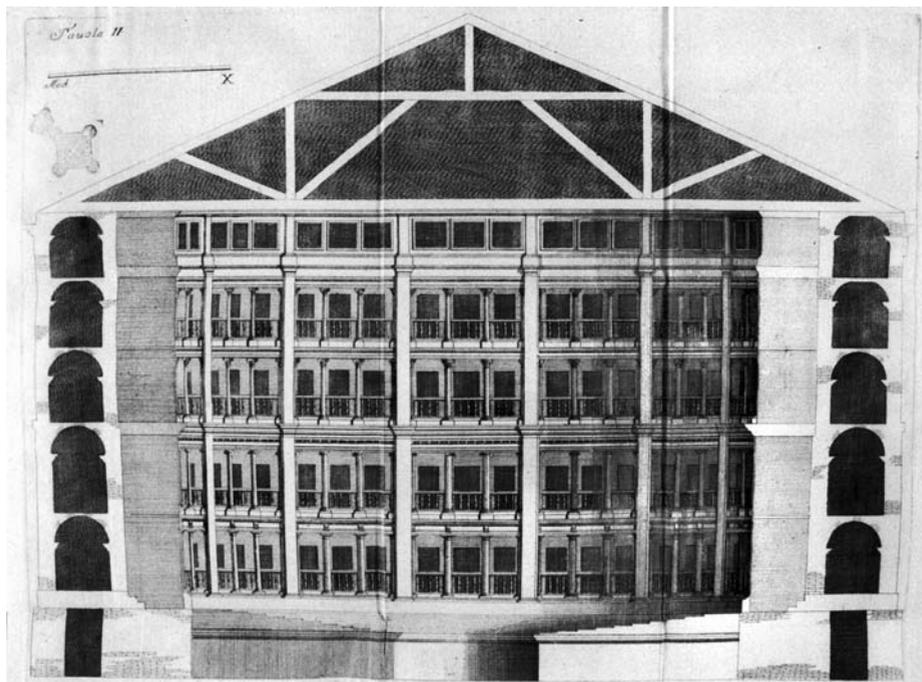


Fig. 1. Da Arnaldi, 1762, Tav. II. Sezione trasversale del teatro da lui proposto.

avere assidui contatti con l'École de France. Grazie a ciò, oltre verosimilmente all'opera di Cochin, venne a conoscenza del *Parallèle de plans des plus belles salles de spectacles d'Italie et de France* (Paris, c. 1764-1766), nel quale l'architetto Gabriel-Pierre-Martin Dumont – che a lungo soggiornò a Roma – aveva inserito un suo progetto di teatro, presentante già tutte le caratteristiche proprie delle sale che verranno realizzate nel neoclassicismo francese (Fig. 2).⁶ Nel-

trattatello – subito posto sotto sequestro dalla censura romana – fu poi ripubblicato due volte, con lievi modifiche, che però non ne alterano l'impostazione acustica: F. MILIZIA, *Del teatro*, Venezia, Pasquali, 1773 (da qui in avanti *Del teatro 1773*); ID., *Trattato completo, formale e materiale del teatro*, Venezia, Pasquali, 1794. Sulla paternità del progetto Milizia fornisce due versioni fra loro discordanti. Nell'edizione del 1773, p. 86, egli scrive: «Al Sig. Vincenzo Ferrarese appartiene l'idea e il disegno di questo teatro», mentre in una lettera del 18 aprile 1772, indirizzata a Temanza, si contraddice: «Quella idea è mia, e la ho fatta eseguire da un giovane, che si chiama Vincenzo Ferrarese, il quale è da molti e molti anni che vive con me»: *Lettere di Francesco Milizia* cit., p. 45. Su Ferrarese, che poi esercitò l'arte anche a Londra, vedi T. MANFREDI, «Del Teatro». *Il Trattato di Francesco Milizia e l'Architettura dei Teatri a Roma nel Settecento*, in *Francesco Milizia e il Neoclassicismo in Europa*, Bari, Laterza, 2000, pp. 81-82, 98-102.

⁶ «L'opera del Dumont» viene menzionata da Milizia già nella citata lettera del 30 marzo 1771:

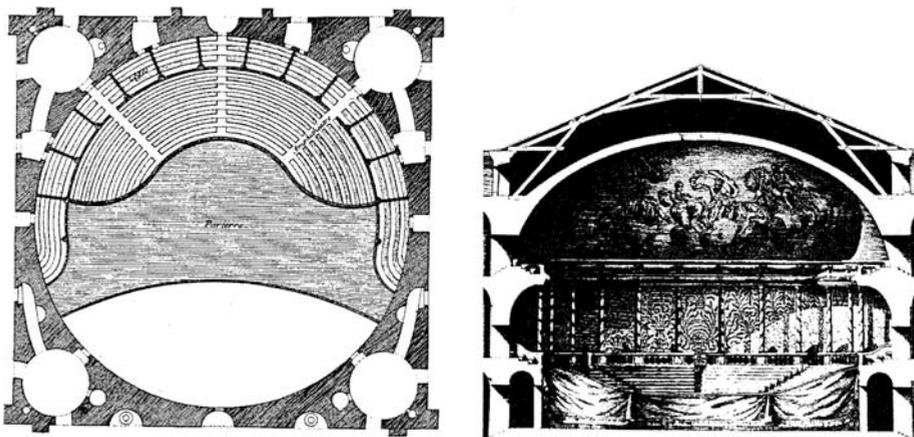


Fig. 2. Da Dumont, c. 1764-1766. Progetto di teatro da lui proposto. La sala è di notevoli dimensioni, risultando la sommità della volta a circa quaranta metri dal piano di calpestio della platea.

la sua opera *Milizia* ha quindi modo di introdurre anche le motivazioni di carattere egualitario e sociale care all'illuminismo d'oltralpe: «Il punto essenziale, che si è stabilito nell'architettura del teatro, è che tutti, tutti quanti gli spettatori soggano comodamente e veggan tutti egualmente tutto quel che si rappresenta nel palco scenario. Per risolvere questo problema, bisogna ricorrer al teatro antico semicircolare e dar un addio ai palchetti». ⁷ L'eliminazione di questi ultimi, aggiungerà, facilita inoltre il contatto tra le persone, con benefiche ripercussioni sul raffinamento della società. ⁸

A causa della staticità dell'assetto economico-sociale, in Italia la proposta di *Milizia-Ferrarese* rimarrà comunque sulla carta. Tutti i maggiori teatri successivamente costruiti continueranno infatti a presentare l'impianto tradizionale, come ad esempio: Milano (*La Scala*, 1778), Venezia (*La Fenice*, 1790), Roma (*Tordinona*, 1794; *Costanzi*, 1880), Napoli (*San Carlo*, 1817),

F. MILIZIA, *Lettere* cit., p. 32. Sulle scarse notizie relative a tale autore vedi J.S. DE SACY, *Dumont (Gabriel-Pierre-Martin)*, in *Dictionnaire de biographie française*, XII, Paris, Letouzey, 1970, p. 215. Il suo innovativo progetto fu anche ripubblicato sulle tavole della *Encyclopédie: Recueil de planches, sur les sciences, les arts libéraux et les arts mécaniques, avec leur explication*, X, Paris, Briasson, 1773, «Théâtres», planche I.

⁷ Dalla lettera del 30 marzo 1771 a Temanza: *Lettere* cit., p. 31.

⁸ *Del teatro 1772*, pp. 122-123; G. DISTASO, *Francesco Milizia e la riforma del teatro nel Settecento*, in *Francesco Milizia e la cultura del Settecento* cit., p. 43.

e Palermo (Massimo, 1867). Il solo 'Teatro Patriottico' (ora 'Filodrammatici'), costruito a Milano per i 'Giovani Repubblicani' durante il governo napoleonico (1800), sarà dotato di balconate al posto dei palchi e di una pianta assai prossima a quella semicircolare al posto di quella ovaleggiante.

In Francia invece già nel 1777-1780 il Grand Théâtre di Bordeaux presentava una pianta circolare tronca e una balconata (anche se sopravvivevano due ordini di palchi con balaustra, aventi però l'apparenza esteriore – come già in quello di Dumont – di una galleria). La completa soppressione dei palchi fu comunque attuata subito dopo nel teatro di Besançon (1778-1784), anch'esso realizzato su pianta semicircolare (architetto Claude-Nicolas Ledoux).⁹

2. L'IMPIANTO ACUSTICO DEI NUOVI PROGETTI

Giuseppe Valadier, affermando che la riuscita acustica di un teatro «non è la cosa più facile ad ottenersi», nel 1833 ricordava: «Il famoso architetto Ferdinando Bibiena, dopo di aver costruito più di quaranta teatri, assicurò un artista mio amico, che non gli era ancora riuscito di trovare ciò che giovava a questa parte principale». ¹⁰ L'intrinseca struttura delle sale italiane, con le sue ampie superfici assorbenti e fra loro non parallele, scongiurava in ogni caso grossolani errori dovuti a una eccessiva riverberazione e alla formazione di indesiderate focalizzazioni. ¹¹ Le proposte di Arnaldi e di Milizia introducevano però delle modifiche in tale assetto: specialmente il secondo dei due si avvaleva della sola acustica 'ondulatoria' vitruviana per un teatro che era ben differente da quello classico romano, il che non gli permetteva di prevederne i possibili inconvenienti. Esaminiamo quindi in dettaglio le idee di tali due autori a riguardo.

2.1. *Platea semicircolare*. Anche allora la sagomatura della platea era ritenuta un elemento importante. Riferendosi al teatro Alibert di Roma, nel 1765-66 l'astronomo Joseph-Jérôme de La Lande affermava che «vi è poca curvatura nella forma di questa sala, per cui la voce scivola quasi sui palchi e vi si

⁹ M. FORSYTH, *Edifici per la musica...*, Bologna, Zanichelli, 1987, pp. 99, 110-111.

¹⁰ G. VALADIER, *Opere di architettura e di ornamento...*, Roma, s.e., 1833, p. 8.

¹¹ Benché la conformazione a 'pozzo', di altezza paragonabile alla sua larghezza media, in certe aree della platea di tali sale provocasse non ottimali effetti dovuti alla disomogeneità della distribuzione dell'energia di prima riflessione: cfr. C. IANNIELLO, *Sale da concerto e teatri d'opera*, in *Acustica musicale e architettonica*, a cura di S. Cingolani e R. Spagnolo, Torino, UTET, 2005, pp. 694-695.

raccoglie debolmente». ¹² Avendo già dall'antichità classica intuito che la propagazione del suono avviene per onde sferiche, si riteneva infatti che la forma della sala dovesse essere la più rotondeggiante possibile. Non conoscendo ancora il fenomeno della diffrazione, si pensava inoltre che anche piccole irregolarità strutturali potessero disturbare, come allora si diceva, tale «circolazione» dell'onda. ¹³ Rifacendosi a Vitruvio e ad Alberti, Arnaldi affermerà quindi «che per la ragione, che la voce per l'aria si muove circolarmente, conviene fare scelta della figura circolare». ¹⁴ Milizia dimostrò poi che ciò giova anche all'uniformità della visuale, ricorrendo a un noto teorema della geometria secondo il quale tutti gli angoli alla circonferenza che hanno per base il diametro sono retti. ¹⁵

Dato che nel cerchio i raggi sonori irradiati dal centro vengono ivi poi riflessi, tale tipo di pianta non era approvata dagli altri teorici del tempo, secondo i quali la nitidezza emissiva del 'bel canto' all'italiana ne avrebbe sofferto. Nel 1787 l'ingegnere napoletano Vincenzo Lamberti affermerà infatti che «la sua figura essere dee concava, e cicloidale, o ellittica, affinché la riflessione non sia concentrica». ¹⁶ E il veneziano Luigi Rizzetti, cinque anni dopo: «io scelgo la figura, per cui s'abbiano le minori riflessioni, sicché il meno possibile resti turbata la voce diretta»; e aggiunge che nella ellissi «si sentirà meno sonora la voce, è vero, perché meno moltiplicata dall'eco, ma si sentirà più chiara, e distinta, lo è quello che si cerca». ¹⁷ Nel § 2.2 torneremo comunque sul problema delle riflessioni.

La pianta circolare tronca non ebbe quindi successo in Italia, anche perché per ragioni economiche si tendeva ad adottare quelle che permettevano una maggiore capienza di pubblico: a tale riguardo vedi ad esempio quanto fatto osservare da Giordano Riccati nel 1790. ¹⁸ Della proposta neoclassica qualcosa comunque rimase: Antonio Niccolini, nel rifacimento del San Carlo

¹² A. DE ANGELIS, *Il teatro Alibert o delle Dame (1717-1863)*, Tivoli, Chicca, 1951, p. 14.

¹³ Sull'argomento vedi P. BARBIERI, *The acoustics of Italian opera houses and auditoriums (ca. 1450-1900)*, «Ricerca», X, 1998, pp. 281-286. Anche on-line: <http://www.patriziobarbieri.it/pdf/italian.pdf>.

¹⁴ E. ARNALDI, *Idea di un teatro* cit., p. 5; L.B. ALBERTI, *L'architettura... tradotta in lingua fiorentina da Cosimo Bartoli...*, Venezia, Franceschi, 1565, p. 299.

¹⁵ *Del teatro 1772*, p. 128.

¹⁶ V. LAMBERTI, *La regolata costruzione de' teatri*, Napoli, Orsini, 1787, p. xxxviii.

¹⁷ L. RIZZETTI, *Risposta... alle accuse fatte al teatro da lui proposto. Anno 1791*, «Raccolta ferrarese di opuscoli scientifici e letterari», XXII, 1792, p. 72.

¹⁸ Vedi la lettera inviata da Giordano Riccati ad Andrea Memmo, Treviso, 30 gennaio 1790; Udine, Biblioteca Civica 'Vincenzo Joppi', ms. 1025/XIX (*Commercio di lettere del Conte Giordano Riccati nell'anno 1790*), pp. 7-14. Gentile comunicazione di Valeria Farinati.

di Napoli (1817), optò per la tradizionale pianta a ferro di cavallo, ma – al fine di migliorare la visuale – dispose i sedili in platea secondo linee concave, e non più rettilinee come in precedenza.¹⁹

Un'ultima osservazione riguardante i teatri del tardo rinascimento, tanto cari ai nostri due autori. Riferendosi al Farnese di Parma, edificato nel 1618 su pianta a 'U' dotata di gradinate, Milizia osserva che in esso gli spettatori non godono di una buona visuale, ma che in compenso «odono a meraviglia, poiché la struttura, sia per artificio o per caso, è tale, che parlando uno sotto voce da una parte, l'altro situato nella parte opposta sente distintamente».²⁰ Allineandosi agli altri teorici del tempo, egli loda quindi il noto e curioso effetto di 'scivolamento' del suono sulle pareti curve, tipico delle cosiddette 'camere parlanti', tanto care ai teorici del suo tempo. Oggi invece sappiamo che tale fenomeno non è utile per l'acustica, in quanto responsabile di sfasamenti temporali ed energetici del suono percepito dagli ascoltatori.

Il pensiero contemporaneo valuta in maniera assai più complessa che nel passato la forma circolare della platea. Infatti ora vedremo che con tale geometria coesistono elementi sia positivi (miglioramento della distribuzione dell'energia sonora) che negativi (concentrazione dell'energia stessa in alcuni punti). Nell'acustica degli ambienti chiusi, la distribuzione dell'energia sonora indica la capacità di ciascun ascoltatore di poter percepire forte e ben definito il segnale musicale o la voce parlata o cantata.²¹ Questa capacità viene descritta con il parametro acustico detto 'robustezza' del suono (*strength*), che rappresenta il valore dell'intensità acustica valutata in corrispondenza del ricevitore, rappresentata dal simbolo *G* ed espressa in decibel. La forma circolare consente di avere distanze tra sorgente musicale e ricevitori ridotte; pertanto in tale circostanza il suono musicale generato nel palcoscenico giunge agli ascoltatori ancora robusto e ben evidente, consentendo quindi una buona percezione dell'energia. In questo senso l'intuizione avuta da Luigi Rizzetti e da Giordano Riccati appare giustificata, dacché la voce diretta consente maggior

¹⁹ E. TADDEI, *Del Real Teatro di San Carlo. Cenni storici*, Napoli, s.e., 1817, p. 19.

²⁰ *Del teatro 1773*, p. 74. Detto fenomeno era comunque già stato segnalato da altri autori, come ad esempio Francesco Bianchini, in un rapporto del 15 ottobre 1726, pubblicato in F. BIANCHINI, *Relazione delle cose più erudite e rare de' Principi di Firenze e di Parma e nell'Istituto di Bologna...*, Verona, Civelli, 1882, p. 22.

²¹ Per maggiori informazioni sui parametri acustici vedi: L. TRONCHIN, *Qualità acustica dei teatri: analisi sperimentale e confronto con valutazioni soggettive in alcuni esempi italiani*, «Rivista italiana di acustica», XVIII, 1994, pp. 51-64; C. IANNIELLO, *Sale da concerto e teatri d'opera* cit., pp. 670-680; L. TRONCHIN, *Elementi di fisica tecnica e controllo ambientale*, Bologna, Esculapio, 2010, pp. 273-280, cap. 'Propagazione del suono in ambienti chiusi'.

energia al ricevitore.²² Tuttavia la forma circolare della pianta – seppure più ‘democratica’, in quanto non preclude ad alcun ricevitore una buona percezione del suono – produce altre conseguenze acustiche, di importanza assai rilevante. La principale di esse è la concentrazione dell’energia entro punti e direzioni ben precise. A questo riguardo, ancora peggiore appare la forma ellittica, poiché, come è noto, se per sfortuna la sorgente sonora dovesse collocarsi nei pressi di un fuoco, il suono che essa emette verrebbe conseguentemente concentrato nell’altro fuoco, che presumibilmente si troverebbe nell’area occupata dal pubblico. Questa incresciosa situazione acustica, che può essere riscontrata in alcuni luoghi storici realizzati nell’epoca del Milizia, come a Possagno,²³ contraddice una fondamentale condizione per l’ottenimento di una soddisfacente qualità di ascolto, ossia la diffusione uniforme dell’energia all’interno dell’area destinata al pubblico. Al contrario, la creazione di aree di intensa concentrazione del suono, che in continuazione si riflette nelle pareti della sala, porta alla creazione di echi ripetuti ed intensi, con scadimento completo della qualità acustica, e perdita assoluta dell’intelligibilità della voce. Allo scopo di correggere questi gravi difetti, si rende necessario ovviare alla forma semicircolare mediante un rivestimento opportuno delle pareti laterali o delle gradonate, ad esempio con una serie di pannellature in legno, preferibilmente aventi superficie non liscia. È questo il caso del Teatro Olimpico di Vicenza, inaugurato nel 1585 sulla base delle forme ispirate all’antichità classica tanto care ad Andrea Palladio, certamente ben noto al Milizia. In seguito a recenti rilevamenti sperimentali, in esso è stata riscontrata l’assenza di focalizzazioni sonore, con elevato valore di robustezza del suono e della riverberazione.²⁴

2.2. *Pareti e soffitto.* Dall’analisi del progetto di Arnaldi seri problemi di eccessiva focalizzazione del suono non se ne scorgono, dato che il suo è sostanzialmente un teatro all’italiana, avente la gradinata in platea ricoperta di sedili di legno, le pareti rivestite da quattro ordini di palchi e il soffitto piano (Fig. 1).²⁵

²² Per Riccati vedi la sua lettera del 1790, citata in nota 18.

²³ Il Tempio progettato da Antonio Canova a Possagno, suo paese natale, fu realizzato su disegno di Pietro Bosio con la collaborazione dell’architetto veneziano Giannantonio Selva, già progettista nel 1792 del primo Teatro La Fenice di Venezia.

²⁴ Il Teatro Olimpico di Vicenza, oggetto di misurazioni acustiche assieme al Teatro Farnese di Parma da parte di uno degli Autori nel 2003, è risultato essere immune da concentrazioni tipiche della forma semicircolare, seppure al suo interno sia stato misurato un tempo di riverberazione piuttosto elevato, superiore ai due secondi.

²⁵ Un progetto che acusticamente risulta ricalcare quello di Arnaldi fu proposto un trentennio

A causa della differente impostazione del suo teatro e della sua maggiore ampiezza, Milizia deve invece essersi posto il problema delle riflessioni dannose, dato che raccomanda – artificio già segnalato nel Cinquecento – di rivestire tutti i paramenti murari con una «impellicciatura di tavole poco distante dal muro, per impedire il rimbalzo della voce, e l'eco».²⁶ Questo è un chiaro riferimento ai pannelli acustici anche oggi usati per controllare soprattutto l'intensità dei suoni gravi, ove la banda di frequenze di lavoro dipende dalla profondità dell'intercapedine d'aria e da altri parametri progettuali, mentre il comportamento risonante o assorbente del pannello dipende dalla presenza o meno di materiale assorbente inserito all'interno dell'intercapedine. Come in molti altri autori del tempo, anche in Milizia si nota l'assimilazione di tale intercapedine alla cassa di risonanza di uno strumento musicale: egli infatti aggiunge che in tal modo «si renderà il tutto sonoro, senza cagionarsi eco».²⁷ A conferma di ciò, loda il soffitto costituito da una serie di cassette lignee munite di foro (supposto 'di risonanza'), fatto installare da Francesco Galli Bibiena nel Teatro Filarmonico di Verona (1724-1729): dichiaratamente concepito con l'intento di simulare la cassa di uno strumento musicale,²⁸ esso in realtà non faceva altro che anticipare i pannelli acustici oggi impiegati per il controllo delle basse frequenze.²⁹

Un altro esempio particolarmente rilevante di soffitti a forma di cassa armonica è rappresentato dalla famosa 'sala della chitarra' presente all'interno della villa Contarini di Piazzola sul Brenta (che qualcuno riferisce fosse stata realizzata da un allievo di Andrea Palladio, se non dal Palladio stesso). In tale sala (Fig. 4) l'insieme dei solai e ballatoi che costituiscono parte integrante del tetto, in aggiunta al soffitto costituito da una serie di pannelli in arellatura sospesi alla struttura portante della copertura, consentiva di poter collocare gli

dopo dall'architetto inglese G. SAUNDERS, *A treatise on theatres*, Londra, s.e., 1790; le relative tavole sono state riprodotte in M. FORSYTH, *Edifici per la musica* cit., pp. 116-117.

²⁶ *Del teatro 1772*, tav. II, didascalia 11. Il riferimento a tale rivestimento acustico si trova già chiaramente esposto nelle note a VITRUVIO, *De architectura*, tradotto e annotato da Cesare Cesariano, Como, Gottardo da Ponte, 1521, c. LXXIVv. Cesariano, che si dichiara allievo del Bramante, in esse afferma infatti: «[...] a ciò che la voce non concipia lo echo. Et perhò per vetare questo in li loci dove si soleno fare li comici, vel altre publice audientie, aut si ornano seu vesteno di asse ordinariamente epsi parietali muri, aut de tapecerie si vesteno [...]».

²⁷ *Del teatro 1772*, p. 125.

²⁸ *Del teatro 1773*, p. 75. Una simile analogia nel 1787 si troverà anche in V. LAMBERTI, *La regolata costruzion de' teatri* cit., p. XXXVIII.

²⁹ Con riferimento ai pannelli acustici con annessa cavità, va ricordato come l'effetto acustico da essi indotto sulle frequenze di risonanza del sistema possa essere risonante o assorbente, a seconda del materiale, riflettente o assorbente, con cui è rivestito l'interno della cavità stessa.

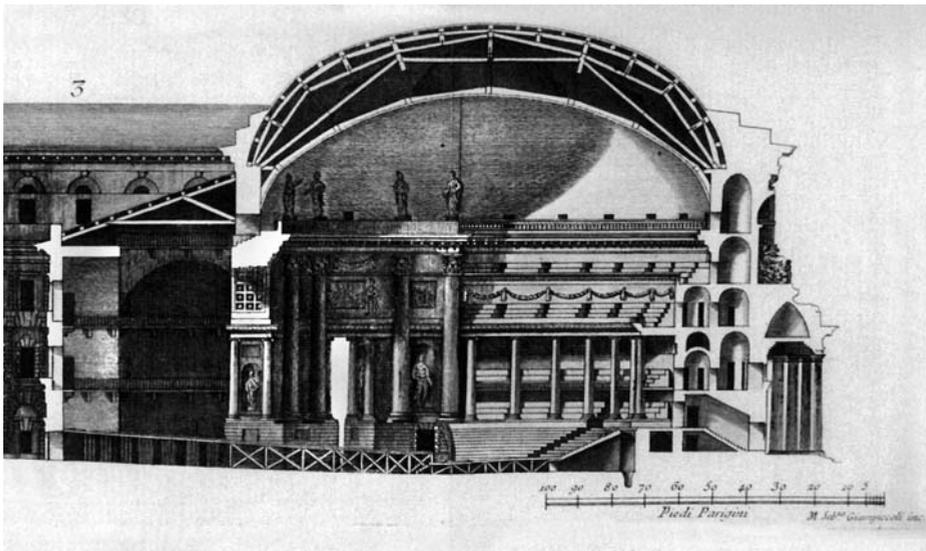
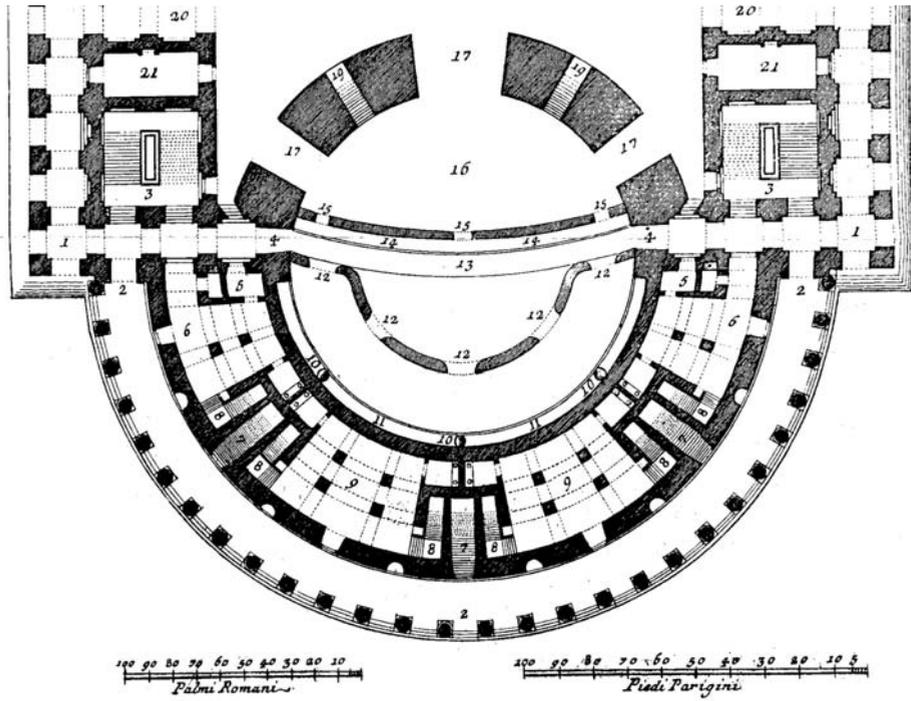


Fig. 3. Da F. MILIZIA, *Del teatro*, ed. 1773. Progetto di teatro dell'architetto Vincenzo Ferrarese, ispirato alle idee dello stesso Milizia: particolari dalle Tavv. II (pianta del piano terreno) e V (sezione longitudinale). Nella Tav. II la soletta su cui è posta la gradinata di platea è tessuta tra i muri 12-12 e 11-11; i tre pozzi «per far risuonare la voce» (10), ubicati sotto la gradinata, sono posti in comunicazione con la sala tramite tre aperture in 12; uno di detti pozzi è anche visibile nella sezione di Tav. V. Sempre nella Tav. II: recinto orchestrale (14-14), palcoscenico (16).

strumentisti ed i cantanti in numerose posizioni, riprendendo le disposizioni a coro battente anticipate dai Gabrieli a Venezia.

Passiamo ora al soffitto del progetto di Milizia-Ferrarese, il cui punto debole si rivela essere quello della sua sagoma accentuatamente concava (Fig. 3), associata alle grandi dimensioni della sala (capace di ben 5000 posti): avendo il centro di curvatura quasi esattamente in corrispondenza del piano di calpestio della platea ed essendo l'orchestra disposta lungo il diametro che separa quest'ultima dal palcoscenico, eventuali riflessioni avrebbero sicuramente generato fastidiosi effetti d'eco, anche multipli (*flutter echoes*, tuttora riscontrabili in numerosi teatri d'opera italiani). Essendo infatti il raggio della volta pari a circa 30 metri, lo sfasamento temporale tra il suono diretto e quello di prima riflessione sull'emiciclo si sarebbe mediamente aggirato intorno ai 100 millesimi di secondo, ritardo che avrebbe provocato un ben evidente eco (i moderni progettisti consigliano ad esempio di non superare i 30-40 millisecondi). Dalla simulazione acustica descritta nel § 4 tale eco comunque non si riscontra, essendo il soffitto costituito – come nella maggioranza dei teatri italiani – da una membrana intonacata in incanniccato sospesa alle capriate del tetto di copertura. Dal punto di vista acustico, già almeno dal tardo Settecento si era consapevole che tale leggero controsoffitto elastico evitava il «rimbombo», potendo essere anch'esso – come già il summenzionato rivestimento delle pareti – un discreto assorbitore delle frequenze medio-basse.³⁰

Se non realizzato tramite una incanniccata, fenomeni d'eco avrebbero dovuto essere prodotti, date le sue ancora maggiori dimensioni, anche dal soffitto previsto da Dumont nel summenzionato *Parallèle*, al quale assai probabilmente Milizia si ispirò (Fig. 2).³¹ Nonostante gli avvertimenti di Pierre Patte, inconvenienti dovuti a fenomeni d'eco si presenteranno nel secolo successivo, col proliferare di rigide coperture a cupola.³² Il problema, che già nel tardo rinascimento era stato oggetto di un'accesa *querelle*, verrà tecnicamente risolto solo

³⁰ In una relazione relativa al teatro dei Risvegliati di Pistoia, risalente al 1794-1795, si legge infatti: «Per soffitta in tutti i teatri suol praticarsi un'incanniccata che non rimbomba quanto una volta» di muratura. Cfr. A. CHIAPPELLI, *Storia del teatro in Pistoia dalle origini alla fine del secolo XVIII*, Pistoia, Officina Tipografica Cooperativa, 1913, pp. 267-268.

³¹ La tendenza di Milizia a saccheggiare la trattatistica straniera, specie quella francese, senza pressoché nessuna esplicita citazione era già stata rilevata ai suoi tempi, cfr. T. MANFREDI, «*Del Teatro*» cit., pp. 86-87, e – per Dumont – p. 91; F. FANIZZA, *Privato e pubblico nella concezione architettonica di Francesco Milizia*, in *Francesco Milizia e la cultura del Settecento* cit., p. 137.

³² P. PATTE, *Essai sur l'architecture théâtrale*, Paris, Moutard, 1782, p. 179: con un soffitto «trop concave il pourroit en resuler des redondances».



Fig. 4. La Sala della Chitarra della Villa Contarini di Piazzola sul Brenta. In questa sala i cantanti e gli strumentisti venivano collocati in diverse posizioni dei ballatoi, ed il loro suono, mitigato dall'effetto acustico delle varie cavità presenti nel soffitto, veniva percepito in platea con particolari effetti sonori. Recenti rilevamenti acustici e vibrazionali, ancora non del tutto analizzati, hanno comunque evidenziato una certa correlazione tra le frequenze di risonanza del soffitto e le frequenze tipiche presenti in platea.

verso la metà dell'Ottocento,³³ ci si dovette però rifare alle costruzioni grafiche della cosiddetta acustica geometrica, la vitruviana acustica 'ondulatoria' non permettendo di fornire sicure indicazioni a riguardo. Dell'acustica geometrica si servì comunque il summenzionato Vincenzo Lamberti già nel 1787, che calcolò in 67 millisecondi il massimo divario ammissibile tra raggio diretto e riflesso, superato il quale sarebbero sorti problemi di eccessiva riverberazione o di eco.³⁴

Anche trascurando tali fastidiose riflessioni, il limite sostanziale della sala di Milizia-Ferrarese è comunque insito nella sua stessa enorme capienza, prevista sulle 5000 persone, numero eccessivo per un ambiente che per di più non era neanche dotato di riflettori acustici. Basti pensare che il maggiore teatro d'opera oggi esistente, il Metropolitan Opera House di New York, è capace di 'soli' 3816 spettatori, e che esso mette già a dura prova i cantanti, che devono riempire con la loro voce un volume così grande.³⁵

2.3. *Risonatori*. Per accrescere la cosiddetta 'risonanza' della sala Arnaldi e Milizia si rifanno ancora all'autorità di Vitruvio. Tale autore aveva infatti menzionato sia i 'vasi' (anfore aperte di opportuno volume, da lui consigliate per i teatri di pietra) sia i pannelli di legno.³⁶ Per quanto riguarda quest'ultimo materiale, abbiamo visto che esso fu più che generosamente prescritto nei due summenzionati progetti. Ad esso entrambi gli autori aggiungono i risonatori a cavità, sotto forma di pozzi cilindrici. Dice ad esempio Arnaldi, riferendosi anche allo pseudo-Aristotele e ad Alberti:³⁷

Se adunque, perché la voce risuoni giovane molto li pozzi, questo certamente nasce dall'esser eglino scavati sotto terra, e circolari. Siccome però la nostra orchestra, ed i gradini si ritrovano profondati nella terra, e ritengono la forma circolare, ci lusinghiamo, che di molto giovamento siano per essere all'armonia del teatro.

Si nota qui l'ingenuità di ritenere che solo le cavità cilindriche, e per di più scavate sotto il livello del piano stradale su cui si trova il teatro, possano agire da risonatori. Da notare che in Arnaldi, contrariamente all'uso comune, la fossa orchestrale ha la foggia di un largo pozzo cilindrico scavato in verticale nel centro dell'emiciclo (Fig. 1).

³³ Sull'argomento vedi P. BARBIERI, *The state of architectural acoustics in the late Renaissance*, in *Architettura e musica nella Venezia del Rinascimento*, a cura di D. Howard e L. Moretti, Milano, Bruno Mondadori, 2006, pp. 53-75. Anche on-line: <http://www.patriziobarbieri.it/pdf/venezia.pdf>.

³⁴ V. LAMBERTI, *La regolata costruzione de' teatri* cit., pp. 37-38.

³⁵ Sul 'Metropolitan' vedi C. IANNIELLO, *Sale da concerto e teatri d'opera* cit., pp. 699-701.

³⁶ VITRUVIO, *I dieci libri dell'architettura...*, Venezia, Marcolini, 1556, pp. 148-150.

³⁷ E. ARNALDI, *Idea di un teatro* cit., p. 23.

Abbiamo detto che anche Milizia si servì di tali dispositivi. I gradini della sua platea poggiano infatti su di una volta rampante comunicante col vano teatrale attraverso tre aperture, in corrispondenza delle quali – sempre sotto detta volta – sono ubicati tre pozzi cilindrici che «servono per far risuonare le voci» (Fig. 3).³⁸ È bene subito far osservare che da un punto di vista teorico tali risonatori avrebbero potuto prolungare il tempo di riverberazione principalmente alle proprie frequenze naturali di oscillazione, e contemporaneamente aumentare la robustezza del suono soprattutto a vantaggio delle posizioni più lontane dal palcoscenico.³⁹

Le presunte virtù amplificatrici di tali cavità, di pseudo-aristotelica derivazione, erano comunque già in precedenza ben note agli architetti. Ad esempio, «una cisterna che amplifica fortemente le voci» fu rinvenuta in mezzo alla platea del teatro Vendramin di Venezia, come Nicodemus Tessin riporta nel 1688.⁴⁰ L'analogo espediente di scavare pozzi per migliorare l'acustica del San Carlo di Napoli fu proposto nel 1742 da Giovanni Maria Galli Bibiena, e tracce di tale operazione sono emerse nel corso di recenti restauri; tali buche tra l'altro furono anche causa di un tragico incidente, quando un giovane orchestrale del Conservatorio dei Poveri di Gesù Cristo perse la vita per essere caduto in una di esse.⁴¹

Tali apparati risonanti, per lo più costituiti da cavità a forma di carena di nave, si ritrovano non frequentemente tutt'oggi integri in alcuni teatri d'opera italiani ed esteri, essendo essi rimasti raramente superstiti degli interventi di restauro che normalmente hanno cancellato traccia di queste cavità. Gli esempi forse più conosciuti sono rappresentati dai teatri Alighieri di Ravenna (realizzato su progetto di Tomaso e Giovan Battista Meduna nel 1840)⁴² e forse ancora di più dal teatro São Carlos di Lisbona, realizzato nel biennio 1792-93 su progetto di José da Costa e Silva.⁴³

³⁸ *Del teatro 1772*, tavola II, didascalia 10.

³⁹ Su 'vasi' e pannelli di legno vedi: P. BARBIERI, *Acustica architettonica nella storia*, in *Acustica musicale e architettonica* cit., pp. 592-594; L. CREMER – H.A. MÜLLER, *Principles and applications of room acoustics*, II, London e New York, Applied Science Publishers, 1982, pp. 219-220; V.L. JORDAN, *The application of Helmholtz resonators to sound-absorbing structures*, «The Journal of the Acoustical Society of America», vol. XIX, 1947, pp. 972-981.

⁴⁰ F. MANCINI – M.T. MURARO – E. POVOLEDO, *I teatri del Veneto: Venezia e il suo territorio...*, vol. I, t. I, Venezia, Regione del Veneto - Corbo e Fiore, 1995, p. 287.

⁴¹ F. MANCINI, *Il Teatro di San Carlo, 1737-1987. La storia, la struttura*, Napoli, Electa, 1987, p. 34.

⁴² A. COCCHI et alii, *Influenza di cavità risonanti poste sotto la fossa orchestrale: il caso del teatro Alighieri di Ravenna*, in *Teatri storici – dal restauro allo spettacolo*, Fiesole (Firenze), Nardini, 1997, pp. 135-150.

⁴³ L. TRONCHIN – V. TARABUSI, *Acoustical properties of stage and orchestra pit of the S. Carlos*

Il loro funzionamento acustico è stato recentemente indagato mediante una serie di rilevamenti sperimentali, che hanno consentito di quantificare l'influenza della presenza della cavità sui parametri acustici. A titolo di esempio, si riporta come nel teatro Alighieri di Ravenna la cavità produca un aumento medio del tempo di riverberazione (EDT, T_{15} e T_{20})⁴⁴ pari al 15-20% rispetto al caso in cui la cavità sia riempita di polistirolo, con un aumento considerevole in corrispondenza della banda di ottava centrata a 63 Hz, comprendente quindi la frequenza di risonanza del sistema, dove tali aumenti arrivano per il T_{15} addirittura al 35%.

In molti teatri – vedi ad esempio il Fraschini di Pavia (1771) – si usava inoltre lasciare una intercapedine tra l'assito della platea e il vespaio sottostante, sempre al fine di simulare la cassa armonica di uno strumento a corda.⁴⁵ Ma anche tale accorgimento, analogamente a quello visto nel § 2.2, probabilmente avrà contribuito a modificare le sole basse frequenze. Qualche esempio superstite si ritrova in alcuni teatri italiani, come nel teatro Comunale di Treviso, nel quale recenti restauri hanno ripristinato tale cavità. Considerate, infatti, le dimensioni di quest'ultima, l'azione svolta, seppur blanda, interessa valori molto bassi delle frequenze, che difficilmente possono essere controllate con normali materiali acustici.

2.4. *Palchi e balconate*. Arnaldi mantenne i palchi per pura consuetudine, mentre invece i francesi – specialmente durante la rivoluzione – li soppressero per ragioni di eguaglianza sociale. Da Milizia vennero aboliti perché «fanno poco sentire, meno vedere», infatti quella «molteplicità di fori e di tramezzi, tagliano in mille guise l'aria sonora, la riverberano in infiniti varissimi sensi, e la debbono per necessità confondere; onde nasce l'indispensabile effetto di sentir poco e male».⁴⁶ Queste stesse ragioni venivano avanzate dagli altri autori del tempo, anch'essi rifacendosi alla supposta «circolazione» dell'onda sonora cui si è accennato nel § 2.1.⁴⁷

theatre in Lisbon, in *Proceedings of 12th International Congress on Sound and Vibration*, Lisbona, International Institute of Acoustics and Vibration, 2005, su CD-ROM.

⁴⁴ Il Tempo di Riverberazione rappresenta il tempo affinché il livello sonoro decada di 60 decibel. Normalmente questo valore è estrapolato partendo da intervalli minori, e si escludono i primi 5 decibel. Ad esempio, il T_{15} rappresenta il tempo di decadimento di 60 decibel a partire da un intervallo di soli 15 decibel, ossia da -5 a -20 decibel. L'*Early Decay Time*, chiamato EDT, estrapola questo valore direttamente dall'inizio del decadimento fino a -10 decibel.

⁴⁵ M.P. FERRARIS, *L'architettura dei teatri d'opera lombardi*, in *Vita teatrale in Lombardia. L'opera e il balletto*, Cinisello Balsamo, Cassa di Risparmio delle Province Lombarde, 1982, p. 35.

⁴⁶ *Del teatro 1772*, pp. 118, 120.

⁴⁷ Si rincarava inoltre la dose affermando che gli angoli acuti all'interno di essi «estingono e

Rimedi a riguardo ne erano già stati in precedenza tentati. Al teatro Marsigli di Bologna nel 1710 i palchi erano fra loro stati separati inserendo leggeri reticolati lignei al posto dei soliti tramezzi pieni: si era a riguardo affermato che in tal modo il suono «scorre più facilmente non trovando li singoli palchi tutti separati e rinchiusi uno per uno». ⁴⁸ Giustificazioni fisiche a parte, detta struttura e quella a balconate del teatro francese presentavano indubbiamente minore assorbimento. Nel 1781 il teorico francese Pierre Patte calcolò che l'assorbimento del pubblico sistemato in queste ultime non superava il 25% dell'energia incidente. ⁴⁹ Nei teatri all'italiana tale percentuale era invece assai maggiore. Alla Scala di Milano si avviò tenendo i parapetti dei palchi piuttosto alti: con ciò l'assorbimento fu contenuto entro un 40%, anche se tale accorgimento andava a scapito della visibilità degli spettatori che si trovavano in posizione arretrata al loro interno. ⁵⁰

Un abbassamento dei parapetti dei palchi era invece stato proposto da Francesco Algarotti già nel 1762, non solo per ragioni di estetica architettonica e di migliore visibilità, ma anche perché «gli spettatori debbono far parte anch'essi dello spettacolo, ed essere in vista essi medesimi, come i libri negli scaffali di una biblioteca, come le gemme ne' castoni del gioiello». ⁵¹ Con ciò però la brillantezza sonora (*liveness*) all'interno della sala ne soffriva. Questa tendenza prese comunque piede, a partire dal secolo successivo, in molti teatri inglesi e italiani (vedi ad esempio la Royal Opera House di Londra e il Valle di Roma). Con tale modifica il pubblico dei palchi perdeva indubbiamente un po' della sua aristocratica privacy, non certo però per le ragioni auspicate dell'illuminismo francese, ma in realtà per permettere alle signore dell'emergente ceto borghese una migliore opportunità di sfoggiare le loro toilettes. ⁵²

In effetti il comportamento acustico dei palchi nei teatri d'opera all'italiana rappresenta tuttora un argomento di dibattito all'interno della comunità scientifica internazionale. L'effetto indotto dalle cavità nelle quali essi sono ricavati, infatti, provoca una singolare combinazione di concentrazione del-

divorano il suono»: A. PLANELLI, *Dell'opera in musica*, Napoli, Campo, 1782, sez. V, cap. IV ("Della costruzione del teatro"). Concetto naïf del resto già precedentemente espresso anche da Milizia: *Del teatro 1772*, p. 121.

⁴⁸ G. COSENTINO, *Il Teatro Marsigli-Rossi*, Bologna, Garagnani, 1900, p. 43.

⁴⁹ P. PATTE, *Essai sur l'architecture théâtrale* cit., p. 201.

⁵⁰ G. SAUNDERS, *A treatise on theatres*, p. 72; L.L. BERANEK, *Music, acoustics and architecture*, New York, Wiley & Sons, 1962, p. 362.

⁵¹ F. ALGAROTTI, *Saggio sopra l'opera in musica*, Livorno, Coltellini, 1763, p. 82.

⁵² L.L. BERANEK, *Music, acoustics and architecture* cit., p. 467; P. BARBIERI, *The acoustics of Italian opera houses* cit., p. 290.

l'energia che si somma all'effetto diffondente della balaustra dei palchi: tutto ciò crea una serie di fenomeni percettivi assai particolari, che conducono alla creazione di un campo acustico non uniforme, spesso esaltato dalla presenza delle pareti interne, lisce e pressoché parallele. Questi fenomeni talvolta portano ancora una volta alla formazione di *flutter echo* come in platea, e devono essere controllati mediante la progettazione di pannelli diffondenti opportuni.⁵³

2.5. *Porte*. Riguardo agli ingressi in platea, Milizia loda il posizionamento delle porte ai lati di quest'ultima, non solo perché così «usavano gli antichi», ma anche «non dovendo mai la porta essere rimpetto alla scena, perché toglie il miglior luogo per l'udienza, e indebolisce la voce».⁵⁴ Quest'ultima osservazione conferma la sua attenzione alle ultime prescrizioni dell'illuminismo francese: nel 1766 de Chaumont aveva infatti consigliato di sistemare le porte ai lati della platea, sopprimendo quella usuale sotto il palco reale, al fine – si legge – di impedire che la corrente d'aria da essa entrante respingesse la voce dell'attore verso il palcoscenico.⁵⁵ Ancora nel 1820 un opuscolo stampato a Roma biasimerà melodrammaticamente «l'aria pernicioso di questa porta crudele [che] respinge il suono nel palco-scenico».⁵⁶ Tale credenza verrà successivamente sfatata, e già lo stesso Milizia (*alias* Ferrari) nei fatti dimostra di non crederci, dato che nelle tavole del suo progetto (Fig. 3) figurano tre porte di accesso alla sala, delle quali una risulta essere posta – contrariamente alle sue prescrizioni verbali – proprio «rimpetto alla scena».⁵⁷

Ovviamente la presenza delle porte di accesso alla platea, come anche ai palchi, rappresenta un punto assai delicato per la fruibilità del teatro stesso. Non tanto per l'effetto di qualità acustica, ma soprattutto in considerazione

⁵³ Tra gli esempi di progettazione acustica mediante pannelli diffondenti collocati anche nei palchi, si veda: L. TRONCHIN, *Acoustical design of diffusing panels in the Theatre Vittorio Emanuele, Messina, Italy*, in *Proceedings of RADS, Room Acoustics: Design and Science*, Awaji (Japan), 2004, su CD-ROM; Id., *The design of acoustical enhancements and diffusion in the opera house of Treviso, Italy*, in *Proceedings of the 6th International Conference on Auditorium Acoustics*, Copenhagen, Institute of Acoustics, 2006, XXVIII, pt. 2, pp. 239-246.

⁵⁴ *Del teatro 1773*, p. 75.

⁵⁵ [CHAUMONT (CHEVALIER DE),] *Véritable construction d'un théâtre d'opéra à l'usage de France suivant les principes des constructeurs italiens* [...], Paris, de Lormel, 1766, pp. 9-10. Poi citato anche da PATTE, *Essai sur l'architecture théâtrale*, p. 128: «empêcher la colonne d'air de repousser la voix de l'acteur vers le théâtre».

⁵⁶ S. CASELLA, *Falsa costruzione dei moderni teatri*, Roma, Contedini, 1820, p. 10.

⁵⁷ Su altre incongruenze del nostro autore dice E. KAUFMANN, *L'architettura dell'Illuminismo*, Torino, Einaudi, 1966, p. 124: «Poiché le idee nuove che il Milizia propugnava non erano propriamente sue, non vi è da stupirsi che egli si contraddicesse con tanta frequenza».

dell'isolamento acustico che è necessario garantire all'interno della sala, evitando il propagarsi di rumore proveniente dal foyer o dai corridoi all'interno della sala.

3. ALCUNE CONSIDERAZIONI SPERIMENTALI SUI TEATRI ITALIANI COEVI

A partire dall'ultimo lustro del millennio scorso, l'interesse nei confronti dell'acustica dei teatri d'opera italiani è andato sviluppandosi notevolmente, soprattutto dopo la tremenda esperienza del teatro la Fenice di Venezia. Fu in quell'occasione, infatti, che la presenza di una campagna di misurazioni acustiche svolte pochissime settimane prima dell'incendio ha conferito una grande importanza al rilevamento della qualità del suono.⁵⁸ L'evoluzione delle teorie e delle tecnologie per lo svolgimento delle relative misurazioni ha altresì consentito di sviluppare una metodologia basata sulla determinazione sperimentale della 'risposta all'impulso' del teatro, in grado di poter salvare ed eventualmente riprodurre successivamente in maniera esaustiva il campo acustico tridimensionale.⁵⁹ Tale metodologia è stata pertanto impiegata per lo studio delle caratteristiche acustiche di numerosi teatri italiani e stranieri, allo scopo di studiare le specifiche caratteristiche di ciascun teatro.

Come appena accennato, i rilievi sperimentali si basano sull'acquisizione della risposta all'impulso del teatro, che viene pertanto ipotizzato come 'sistema lineare tempo invariante' ossia immobile nel tempo e sollecitato da una energia (quella acustica) che è molto inferiore come intensità rispetto alle altre forme di energia o forze presenti (ad esempio la forza gravitazionale, la pressione atmosferica, ecc.). A partire dalla determinazione sperimentale della risposta all'impulso, oltre ai già citati tempi di riverberazione, vengono elaborati numerosi altri parametri fisici in grado di definire altre caratteristiche della sala, come gli indici di 'chiarezza' e di 'definizione', il 'tempo baricentrico', ed altri parametri *spaziali* quali la 'cross-correlazione interaurale' (IACC) e la 'frazione laterale' (LF), in grado di valutare l'effetto avvolgente del suono presen-

⁵⁸ L. TRONCHIN – A. FARINA, *Acoustics of the former Teatro "La Fenice" in Venice*, «Journal of the Audio Engineering Society», XLV, 1997, pp. 1051-1062.

⁵⁹ Sulla metodologia per la misurazione tridimensionale del campo acustico all'interno dei teatri ed auditori vedi: A. FARINA – L. TRONCHIN, *Misure acustiche nei teatri e nelle sale*, in *Acustica musicale e architettonica* cit., pp. 783-825; Id., *Measurements and reproduction of spatial sound characteristics of auditoria*, «Acoustical Science and Technology», XXVI, 2005, pp. 193-199; D. BONSI, *Characterization of the acoustic ambience of the church of San Giorgio Maggiore by measurement of quadruphonic impulse responses*, in *Architettura e musica nella Venezia del rinascimento* cit., pp. 201-219.

te nella sala.⁶⁰ Un ulteriore parametro fisico, oggetto di studio, è il già citato livello di 'robustezza' del suono (*strength*, *G*), che può indicare quanta energia sonora, emessa dalla sorgente, arriva ai vari ricevitori. A partire da questi parametri, possono anche essere calcolate alcune 'mappe di preferenza' che forniscono i valori complessivi della qualità acustica, sulla base di studi soggettivi ed analisi statistiche svolte dal prof. Yoichi Ando presso l'Università di Kobe in Giappone.⁶¹ L'insieme dei parametri descritti consente di esprimere le valutazioni che seguono sulle caratteristiche acustiche dei teatri.

La forma della platea nei teatri d'opera è strettamente correlata alla forma del soffitto. La scelta di curve analitiche geometriche che possiedono dei fuochi, come le ellisse, provoca conseguentemente l'accumularsi dell'energia acustica riflessa nei punti focali, con conseguente instaurarsi di echi multipli (i *flutter echoes* citati). Essi possono essere notati con evidenza nelle risposte all'impulso misurate in particolare nella platea (Fig. 5). Pressoché tutti i teatri d'opera italiani soffrono di *flutter echoes* in platea, tanto più marcati quando alla forma della sala e del soffitto si aggiunge la presenza di superfici laterali lisce e ben levigate sottostanti al primo ordine dei palchi, come ad esempio nel teatro 'dell'Aquila' di Fermo. L'effetto acustico dei palchi viene quindi sovrachiato dalla focalizzazione indotta dalle pareti. Questo fenomeno causa un peggioramento della percezione sonora nella sala ed è difficilmente quantificabile con altri parametri acustici convenzionali.

L'effetto della cavità presente al di sotto della fossa d'orchestra è stato studiato nel teatro São Carlos di Lisbona (Fig. 6)⁶² e soprattutto nel teatro Alighieri di Ravenna,⁶³ considerando le caratteristiche acustiche della sala e dei palchi dapprima con la cavità riempita di polistirolo ben pressato, e successivamente svuotata. Per poter confrontare le due situazioni sono state acquisite le risposte all'impulso in circa trenta posizioni nella sala, comprendendo anche alcune posizioni nei palchi. In anni molto recenti, la qualità acustica è stata analizzata in altrettante posizioni nella sola configurazione a cavità vuota, e i dati sono stati comparati con le misurazioni sperimentali svolte in precedenza. Già si è accennato al notevole risultato ottenuto sul tempo di riverberazione, soprattutto nella banda di frequenza comprendente la frequenza di risonanza. Tuttavia non va sottovalutato anche l'effetto sulla

⁶⁰ A riguardo vedi nota 21.

⁶¹ Per informazioni relative alla teoria di Ando sulla qualità acustica delle sale per la musica, vedi: Y. ANDO, *Concert hall acoustics*, New York, Springer, 1995; Id., *Architectural acoustics, blending sound sources, sound fields, and listeners*, New York, Springer, 1998.

⁶² Cfr. nota 43.

⁶³ Cfr. nota 42.

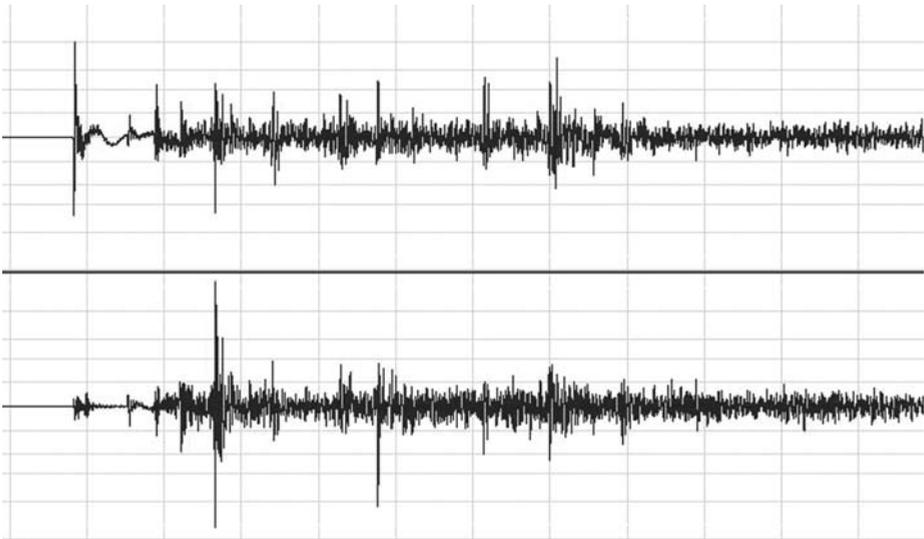


Fig. 5. Risposta all'impulso misurata in posizione quasi centrale della platea nel Teatro dell'Aquila di Fermo. Microfono Soundfield MKV, tracce B-format W (sopra) e Y (sotto). Si notano numerose riflessioni concentrate nei primi cento millisecondi della risposta all'impulso, come conseguenza del fenomeno di *flutter echo* presente nel teatro e causato dall'azione combinata del soffitto e delle pareti laterali curve, particolarmente lisce e riflettenti.

'robustezza', che grazie alla presenza della cavità vuota aumenta notevolmente la sua energia. In alcune posizioni nella platea, il valore della robustezza del suono risulta quadruplicato.⁶⁴ Un altro aspetto particolarmente rilevante consiste nell'effetto apportato alle prime riflessioni presenti nella sala. Il parametro che maggiormente risente di tali riflessioni è l'indice di chiarezza C_{50} , ossia calcolato sulla base dei primi cinquanta millisecondi della risposta all'impulso, quindi correlato all'intelligibilità della voce piuttosto che alla qualità della musica. Su questo parametro l'effetto della cavità risulta molto marcato, poiché in alcune bande di frequenza essa provoca un aumento dell'energia oltre i cinquanta millisecondi. Come conseguenza, il valore di C_{50} ne risente considerevolmente, con effetti questa volta negativi, attestandosi a valori molto bassi qualora la cavità sia vuota (anche oltre due decibel inferiori rispetto alla cavità riempita di materiale, caso quest'ultimo in cui i valori rientrano nell'intervallo ottimale, ritenuto normalmente compreso tra -2 e $+2$ decibel).

⁶⁴ Cfr. nota 21.



Fig. 6. La cavità collocata al di sotto della fossa d'orchestra nel teatro São Carlos di Lisbona. Attualmente la cavità viene utilizzata come cavedio per il passaggio di condotti tecnici. I rilievi acustici effettuati nell'area del palcoscenico e soprattutto nella fossa d'orchestra hanno evidenziato una variazione considerevole dei parametri acustici percepiti nella cavea teatrale a seconda della collocazione della sorgente sonora.

L'effetto acustico indotto dalla presenza dei palchi può invece causare diversi fenomeni fisici, ancora tutti da chiarire definitivamente. Un primo fenomeno importante è causato dalla diffrazione prodotta dal bordo della balaustra, quello rivolto verso la platea. Il parapetto, infatti, agisce acusticamente come una sorta di barriera acustica, e il suo bordo superiore, soprattutto se costituito in legno con degli spigoli abbastanza evidenti, diventa sorgente di onde di diffrazione sonora. In sostanza esso agisce alla stessa stregua dello spigolo di una muratura investita da un raggio di luce: diventa sorgente di onde aventi diversa lunghezza d'onda, e quindi diversa frequenza. Ma i palchi producono un ulteriore effetto a causa della loro particolare conformazione geometrica. Essi infatti – presentando normalmente forma parallelepipedica, con pareti laterali lisce, parallele, e oggi non più rivestite con tessuti assorbenti – possono divenire a loro volta dei risonatori acustici le cui frequenze sono normalmente attestate sui 150-200 Hz.⁶⁵ L'effetto delle riflessioni multiple consiste quasi sempre in un vero e proprio *flutter echo*, che per essere evitato richiede di interrompere la continuità delle superfici lisce, mediante l'inseri-

⁶⁵ Sebbene esistano numerosi teatri aventi limitazioni acustiche nei palchi causate dalle pareti laterali lisce e parallele, solo in rarissimi casi sono state realizzate soluzioni al problema mediante calcolo e applicazione di pannelli diffondenti: vedi nota 53.

mento di pannelli o rivestimenti. Purtroppo tale intervento non viene ritenuto normalmente meritevole di considerazione da parte di progettisti o soprintendenti, salvo in alcuni rarissimi casi.

4. SIMULAZIONE DIGITALE DEL 'TEATRO IDEALE' DI FRANCESCO MILIZIA (1773)

4.1. *La modellazione acustica nei teatri.* Per svolgere lo studio previsionale della qualità acustica all'interno degli ambienti chiusi è possibile avvalersi di due metodologie complementari: la modellazione mediante modelli fisici in scala e la modellazione numerica.

L'utilizzo della prima metodologia richiede la realizzazione di un modello in scala, di dimensioni opportune, dell'ambiente oggetto di studio. Affinché i risultati ottenuti siano comprensivi del maggior intervallo di frequenze di interesse, il modello deve possedere dimensioni non eccessivamente ridotte. La riduzione in scala del modello comporta infatti un conseguente abbassamento delle frequenze attendibili provenienti dallo studio, nello stesso rapporto di scala del modello rispetto all'ambiente reale. Ad esempio, in un modello in scala 1:10 la frequenza misurata nel modello pari a 10 kHz corrisponde nella realtà ad una frequenza di 1 kHz.

Tramite la modellazione numerica, l'interno della sala è ricostruito sulla base di un disegno tridimensionale dell'ambiente, ponendo attenzione a modellare le superfici interne con entità opportune, che devono altresì essere rappresentate con un adeguato grado di dettaglio, spesso non eccessivo, allo scopo di riprodurre al meglio le caratteristiche acustiche presenti all'interno.⁶⁶

In generale si considerano due tipi di modelli numerici: quelli che simulano la natura ondulatoria del campo acustico e quelli che considerano la propagazione sonora per raggi rettilinei.⁶⁷ Tra le implementazioni in modelli di calcolo, talvolta commerciali, vanno ricordate le opere di Vorländer,⁶⁸ Nay-

⁶⁶ Tra i primi lavori scientifici che descrivono il metodo di calcolo, va ricordato A. KROKSTADT et alii, *Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique*, «Journal of Sound and Vibration», VIII, 1968, pp. 118-125.

⁶⁷ Come esempi di pubblicazioni a riguardo del funzionamento e uso di modelli in acustica, si veda: A. COCCHI et alii, *Effectiveness of computer codes to assist the acoustic correction of a large multipurpose hall*, in *Proceedings of Euronoise 1995*, Lione, Cetim, 1995, o anche A. COCCHI et alii, *Computer assisted methods and acoustic quality: recent application cases*, in *Music and Concert Hall Acoustics: Conference Proceedings from Mcha 1995*, a cura di Y. Ando e D. Noson, London, Academic Press, 1996, pp. 67-84.

⁶⁸ M. VORLÄNDER, *Simulation of the transient and steady state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm*, «The Journal of the Acoustical Society of America», LXXXVI, 1989, pp. 172-178.

lor,⁶⁹ Lewers,⁷⁰ e Tenenbaum *et alii*.⁷¹ Al variare delle formulazioni della propagazione dell'energia sonora per mezzo di raggi rettilinei, vengono definiti diversi tipi di modelli numerici: i principali sono rappresentati dal metodo delle 'sorgenti virtuali', dal metodo del *ray-tracing* e dal metodo dei 'fasci divergenti'. Quest'ultimo, elaborato da Van Maercke e Martin,⁷² è il risultato di una naturale evoluzione del *ray-tracing* e riunisce i vantaggi di questo metodo con quelli del metodo a sorgenti virtuali. Il modello è ottenuto sostituendo ai raggi sonori, tipici del *ray-tracing*, dei fasci divergenti i cui assi coincidono con i raggi originari. Il metodo dei fasci divergenti è realizzato in tre diversi modi: il metodo dei coni circolari (*cone-tracing*); il metodo dei fasci (*beam-tracing*) ed il metodo delle piramidi (*pyramid-tracing*). Il software di previsione acustica *Ramsete*,⁷³ utilizzato nelle simulazioni acustiche, si basa su quest'ultimo metodo; in esso vengono generate delle piramidi tramite una progressiva bisezione degli otto ottanti di superficie sferica di partenza, corretto in fase di simulazione tramite una compensazione che è richiesta dall'algoritmo stesso e necessita di una certa accortezza da parte del tecnico acustico.^{74,75} All'interno del software *Ramsete* sono stati sviluppati i moduli di generazione delle risposte all'impulso binaurali e tridimensionali.⁷⁶

⁶⁹ G. NAYLOR, *ODEON - Another hybrid room acoustical model*, «Applied Acoustics», XXXVIII, 1993, pp. 131-143.

⁷⁰ T. LEWERS, *A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustics*, «Applied Acoustics», XXXVIII, 1993, pp. 161-178.

⁷¹ R.A. TENENBAUM *et alii*, *Numerical simulation of room acoustics: a new approach for source modeling*, in *Proceedings of the 14th International Congress on Acoustics*, Beijing, Acoustical Society of China, 1992.

⁷² D. VAN MAERCKE - J. MARTIN, *The prediction of echograms and impulse responses within the Epidaurae software*, «Applied Acoustics», XXXVIII, 1993, pp. 93-114.

⁷³ A. FARINA, *RAMSETE - A new Pyramid Tracer for medium and large scale acoustic problems*, in *Proceedings of Euronoise 1995*, Lione, Cetim, 1995, pp. 55-60.

⁷⁴ Si veda ad esempio L. TRONCHIN - G. FAROLFI, *Progetto acustico mediante rilievi sperimentali e simulazioni al computer: Il Teatro Comunale di Gradisca d'Isonzo*, «Rivista italiana di acustica», XX, 1996, pp. 17-27.

⁷⁵ Alcuni esempi di progettazione e valutazione della qualità acustica di teatri si possono trovare nelle pubblicazioni seguenti: A. COCCHI - L. TRONCHIN, *Computer assisted methods and acoustic quality: a theatre's restoration case history*, in *Proceedings of the 15th International Congress on Acoustics*, Trondheim, Acoustical Society of Norway, 1995, pp. 417-420; L. TRONCHIN - M.L. VACCARI, *Acoustic quality in the theatre "PalaFenice", Venice*, in *Proceedings of Forum Acusticum 1999*, Berlin, Acoustical Society of America, 1999, su CD-ROM.

⁷⁶ Per l'implementazione delle tecniche di valutazione di diffusione e diffrazione sonora: L. TRONCHIN - A. FARINA, *Comparison between measurements of the scattering and diffusion coefficients*, in *Proceedings of the 17th International Congress on Acoustics*, Roma, Associazione Italiana di Acustica, 2001, su CD-ROM; per la formulazione della metodologia di calcolo delle risposte all'impulso binaurali: A. FARINA - L. TRONCHIN, *Computer simulation of Binaural, Stereo-Dipole, B-format and Ambiophonics impulse responses*, *ivi*; ID., *Measurements and numerical simulation of binaural and B-format impulses responses in concert halls*, in *Proceedings of the 1st International Symposium on*

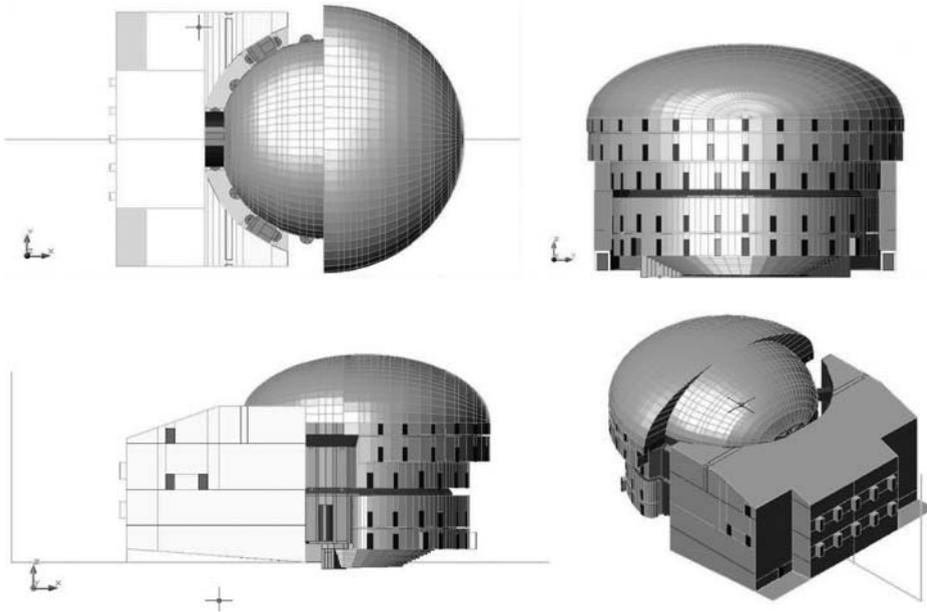


Fig. 7. Pianta, prospetti ed assonometria del modello 3D del teatro ideale di Milizia, come realizzato nel programma Autocad release 2010.

Per effettuare il calcolo dei parametri acustici all'interno del teatro di Milizia è stata utilizzata una sorgente acustica omnidirezionale. Per effettuare il calcolo delle risposte all'impulso per gli esperimenti di auralizzazione, sono state invece utilizzate sorgenti sonore aventi caratteristiche di potenza e direttività riferibili agli strumenti musicali considerati, nonché alla voce maschile e femminile.⁷⁷ Al termine delle simulazioni sono stati ottenuti per ogni ricevitore il valore di numerosi parametri acustici, monoaurali, energetici e relativi alla spazializzazione sonora.⁷⁸

Temporal Design in Architecture and the Environment, Kobe University, 2003, su CD-ROM; ID., *Measurements and reproduction* cit., e in particolare, L. TRONCHIN et alii, *The calculation of the impulse response in the binaural technique*, in *Proceedings of 7th International Congress on Sound and Vibration*, Garmisch-Partenkirchen, International Institute of Acoustics and Vibration, 2000, su CD-ROM.

⁷⁷ In relazione all'utilizzo della sorgente omnidirezionale e sorgenti aventi direttività della voce umana cfr. nota 74 e L. TRONCHIN, *La progettazione acustica e le applicazioni virtuali e multimediali: l'auditorium del Conservatorio di Parma*, in *Atti del XXVIII Congresso Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica*, Trani (Bari), Associazione Italiana di Acustica, 2000, pp. 175-178.

⁷⁸ Cfr. nota 21.

4.2. *Risultati delle simulazioni e valutazione complessiva.* Per ottenere una valutazione acusticamente corretta degli scenari progettuali, è necessario disporre di un modello numerico molto accurato, che normalmente viene tarato sulla base di misurazioni sperimentali fino ad essere in grado di riprodurre, in partenza, le medesime caratteristiche acustiche misurate. La determinazione delle caratteristiche acustiche dei materiali costituenti il teatro ideale di Milizia è stata effettuata considerando i risultati ottenuti al termine della modellazione numerica di teatri coevi per i quali è stata effettuata una precedente opera di taratura del modello per mezzo di misurazioni sperimentali preliminari. In particolare il Teatro Comunale di Bologna e soprattutto il Teatro Comunale di Treviso,⁷⁹ che può essere ritenuto simile per quanto riguarda il soffitto. Il comportamento acustico del soffitto incannicciato, tra l'altro riscontrato anche in altri ambienti come la citata 'sala della chitarra', diventa importante alle frequenze medio-basse, soprattutto in corrispondenza di cavità di considerevole volume, come nel caso del teatro di Milizia. Per le superfici restanti, quali le colonne, le gradonate, i pavimenti della platea e del palcoscenico, sono stati assunti con i valori dei coefficienti di assorbimento provenienti dalle indagini già citate.

Le simulazioni sono state condotte con una risoluzione della risposta all'impulso pari a un millesimo di secondo ed una durata di 4 secondi, allo scopo di poter ottenere informazioni accurate anche sulle singole prime riflessioni percepite in corrispondenza di alcune posizioni notevoli, nella platea e nei palchetti. Sono stati posizionati 134 microfoni distribuiti equamente tra la platea e le scalinate all'interno del teatro. Alcuni microfoni sono stati anche collocati nel palcoscenico, sebbene non siano state oggetto dell'analisi riportata di seguito, mentre è stata considerata la diffusione acustica delle pareti.⁸⁰

4.2.1. *La risposta all'impulso.* La risposta all'impulso rappresenta il parametro esaustivo per descrivere il comportamento di un ambiente chiuso.⁸¹ L'analisi energetica compiuta su di esse, consente di effettuare una valutazio-

⁷⁹ Per le misurazioni svolte nei due teatri citati, vedi: L. TRONCHIN, *Acoustical enhancements in the restoration of the Teatro Comunale in Treviso, Italy*, in *Proceedings of International Symposium on Room Acoustics: Design and Science 2004* cit.; L. TRONCHIN et alii, *Spatial sound characteristics in the theatre Comunale in Bologna, Italy*, in *Proceedings of 9th Western Pacific Acoustics Conference*, Seoul, Acoustical Society of Korea, 2006, su CD-ROM.

⁸⁰ L'effetto della diffusione acustica all'interno degli ambienti chiusi, la sua importanza e determinazione, può essere approfondito in A. FARINA – L. TRONCHIN, *Comparison between measurements of the scattering and diffusion coefficients*, in *Proceedings of the 17th International Congress on Acoustics* cit.

⁸¹ Sull'importanza della risposta all'impulso nella determinazione della qualità acustica dei teatri ed auditoria vedi: A. FARINA – L. TRONCHIN, *Misure acustiche nei teatri e nelle sale*, in *Acustica musicale e architettonica* cit., pp. 783-825; ID., *Measurements and reproduction* cit.

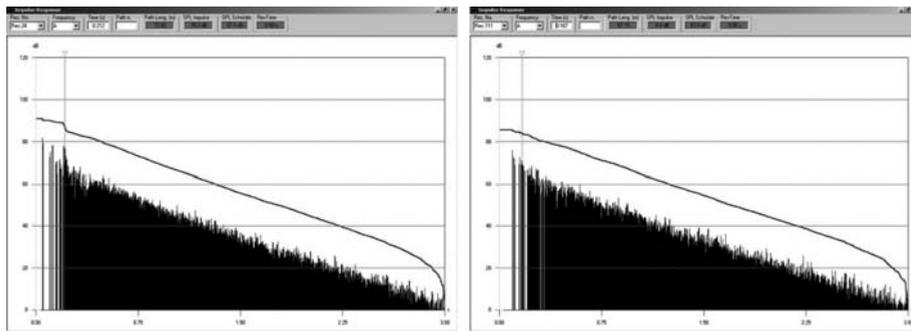


Fig. 8. Risposta all'impulso con curva di Schroeder per il ricevitore n. 24 in platea a metà scalinata, in prossimità dell'asse centrale (sx) e per il ricevitore n. 111, terzo livello dei palchetti, zona centrale (dx).

ne sulle riflessioni presenti negli ambienti chiusi. Nel caso delle simulazioni condotte nel teatro di Milizia, esse sono apparse particolarmente dipendenti dalle varie posizioni dei ricevitori (Fig. 8).

Considerando la posizione del ricevitore collocato in platea, a metà scalinata, nei pressi dell'asse di simmetria del teatro, si evince come le prime riflessioni percepite da quella posizione siano caratterizzate inizialmente da poche componenti distanziate tra di loro, per concentrarsi ad un tempo corrispondente a circa 20 millisecondi. La focalizzazione a tale valore è dovuta all'effetto di concavità del soffitto, che si colloca ad un tempo considerato comunque 'positivo', in quanto inferiore al tempo di integrazione necessario all'orecchio umano per interpretare il segnale musicale, considerato pari a 50 millisecondi. La concentrazione è invece assente qualora si consideri la posizione del ricevitore in un palchetto del terzo ordine, a distanza considerevole dalla sorgente sonora, dove al contrario sono presenti più numerose riflessioni iniziali, indotte dalla vicinanza a varie superfici, tra cui il soffitto stesso.

4.2.2. *I tempi di riverberazione.* I parametri acustici storicamente più importanti sono rappresentati dai tempi di riverberazione. Essi normalmente vengono valutati su diversi tempi di decadimento.

Nel caso del teatro di Milizia, l'analisi qui riportata (Figg. 9, 10) è relativa ai tempi di riverberazione EDT e T_{30} . La distribuzione nello spazio dei tempi di riverberazione evidenzia innanzi tutto l'area in cui può essere riconosciuto il 'campo acustico diretto', nel quale essenzialmente il suono giunge al ricevitore direttamente dalla sorgente acustica, a differenza del 'campo acustico ri-

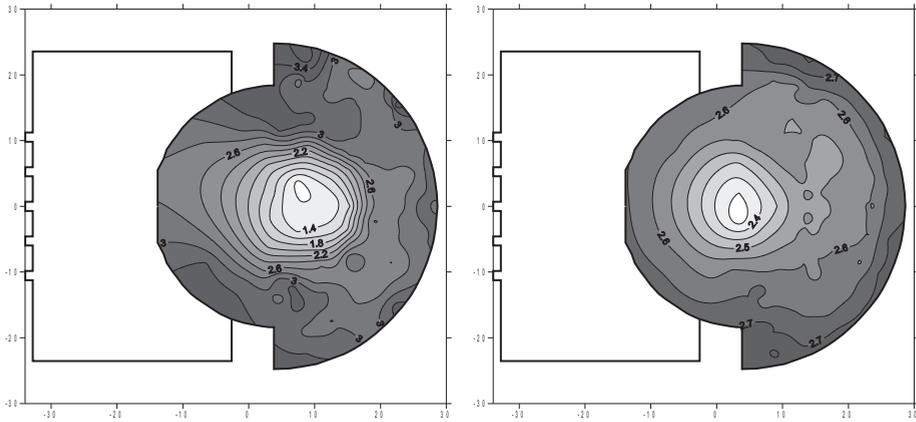


Fig. 9. Mappa della distribuzione spaziale di EDT (sx) e T_{30} (dx).

verberato', nel quale la componente di energia riflessa dall'ambiente diventa fondamentale.⁸²

A valori superiori alla 'distanza critica', il tempo di riverberazione si attesta a valori medi nella scala di ponderazione 'A' ovunque superiori a 2,5 secondi.

4.2.3. *I parametri energetici.* I parametri energetici sono ottenuti a partire dalle risposte all'impulso degli ambienti chiusi, effettuando degli opportuni rapporti tra una componente di energia ritenuta 'utile' e l'energia considerata dannosa per la qualità del suono.

Nel caso il rapporto venga effettuato tra le energie, in decibel, contenute nella parte iniziale con la parte restante della risposta all'impulso, si ottiene la 'chiarezza'. Nel caso tale rapporto venga ottenuto in valori percentuali tra la parte iniziale di energia e l'intera risposta all'impulso si ottiene la 'definizione'. Dal calcolo del baricentro della figura che rappresenta la risposta all'impulso nell'asse del tempo, si ottiene il 'tempo baricentrico'. Infine, riferendo il livello

⁸² Il campo acustico diretto normalmente indica l'area dell'ambiente chiuso nel quale il decadimento dell'energia sonora avviene con una diminuzione pari a 6 dB per ogni raddoppio di distanza; il campo acustico riverberante o 'campo acustico diffuso' indica l'area dell'ambiente chiuso nel quale il livello di densità sonora rimane costante per ogni punto. La distanza del ricevitore dalla sorgente per cui vi è il passaggio dall'uno all'altro viene denominata 'distanza critica'. Si veda L. TRONCHIN, *Elementi di fisica tecnica del controllo ambientale* cit.

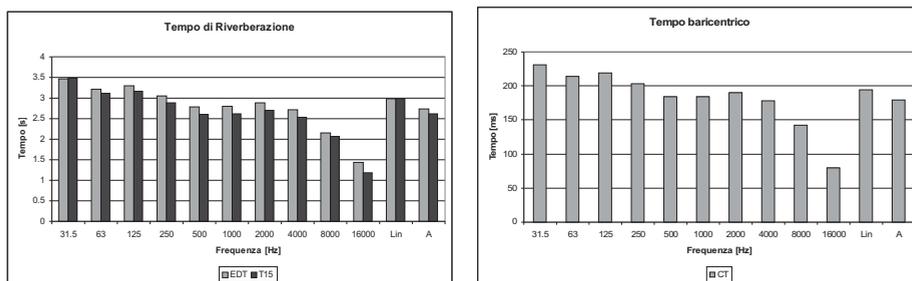


Fig. 10. Andamento in frequenza dei tempi di riverberazioni EDT e T_{30} (sx) e del tempo baricentrico CT (dx).

sonoro ad una sorgente sonora standard in campo libero, si ottiene la già citata ‘robustezza’ del suono (G).

L’analisi della distribuzione nello spazio dei parametri energetici citati (Figg. 11, 12), evidenzia una probabile distribuzione dell’energia sonora relativamente uniforme in gran parte della platea. Tuttavia, nelle aree occupate dai palchetti, soprattutto negli ordini superiori, i valori assunti dai parametri energetici talvolta si discostano considerevolmente dai valori normalmente considerati ottimali nella letteratura. Si nota come in tali aree il tempo baricentrico risulti spesso superiore a 200 millisecondi, e l’indice di definizione in alcune aree raggiunge a malapena valori superiori al 10%.⁸³ Gli indici di chiarezza C_{50} e C_{80} , normalmente utilizzati per esprimere la ‘chiarezza’ rispettivamente della parola e del brano musicale, risultano essere maggiormente dipendenti dalla posizione dei ricevitori. In particolare, se i valori assunti dalla chiarezza C_{50} risultano in alcuni casi notevolmente al di fuori dell’intervallo ritenuto ottimale, soprattutto nelle posizioni più lontane dalla sorgente sonora, la chiarezza C_{80} risulta distribuita su valori migliori, e quasi vicini all’intervallo considerato adatto per una buona percezione della musica. Il teatro, pertanto, appare maggiormente adatto per esecuzioni musicali. La distribuzione della *strength* conferma come l’elevata riverberazione limiti l’eccessiva diminuzione del livello sonoro all’interno del teatro, cosicché la voce dei cantanti possa essere comunque percepita anche in posizioni più arretrate.

⁸³ Il valore ottimale del tempo baricentrico dovrebbe attestarsi su 140 millisecondi, mentre l’indice di definizione dovrebbe assumere valori prossimi al 60%. L’indice di chiarezza, infine, secondo alcuni dovrebbe essere compreso tra -2 dB e $+2$ dB, secondo altri tra -4 dB e $+4$ dB. Per maggiori informazioni si veda L. TRONCHIN, *Qualità acustica dei teatri: analisi sperimentale e confronto cit.*

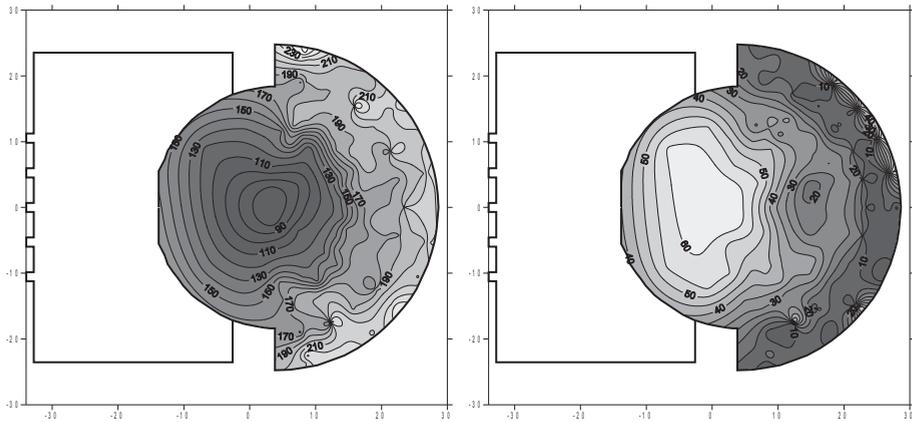


Fig. 11. Mappa della distribuzione spaziale del tempo baricentrico CT (sx) e dell'indice di definizione D (dx).

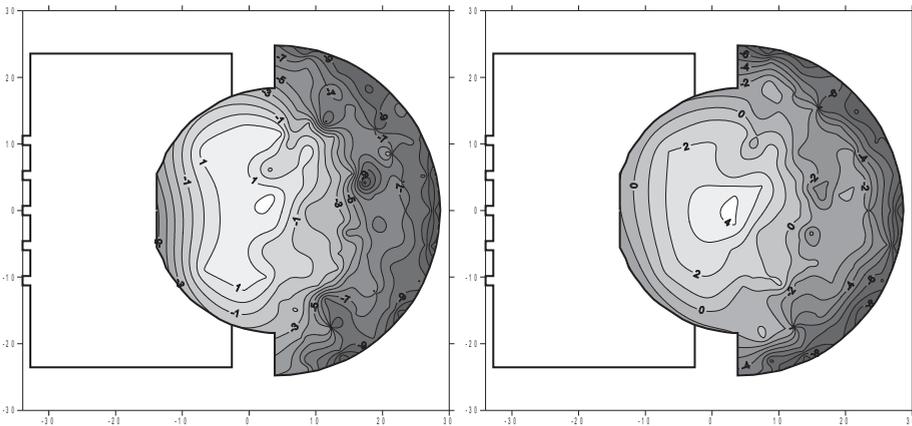


Fig. 12. Mappa della distribuzione spaziale della Chiarezza calcolata sui primi 50 millisecondi C_{50} (sx) e sui primi 80 millisecondi C_{80} (dx).

In sostanza, il teatro ideale del Milizia, pur nelle sue diversità architettoniche, ricorda per le caratteristiche acustiche il teatro Colon di Buenos Aires, che pur disponendo di circa 2500 posti a sedere (che diventano circa 4000 con la possibilità di comprendere spettatori in piedi), risulta avere una acustica considerata eccellente, seppure il tempo di riverberazione sia superiore a 2 secondi.

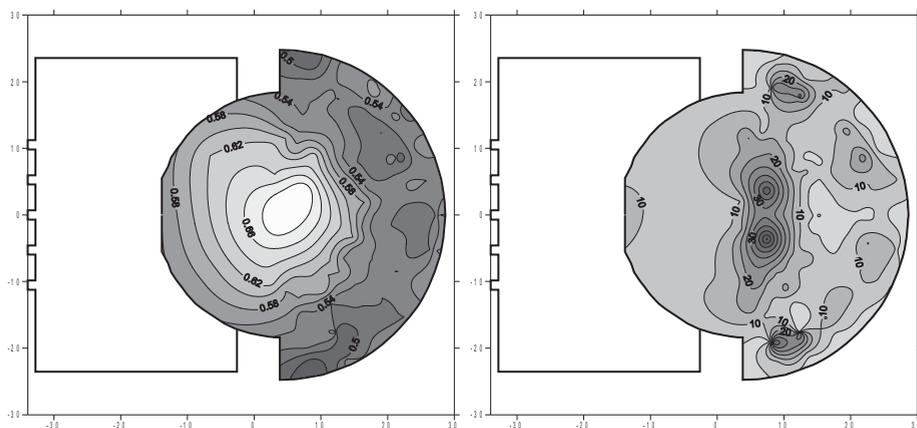


Fig. 13. Mappa della distribuzione spaziale dello Speech Transmission Index STI (sx) e della Lateral Fraction LF (dx).

4.2.4. *L'intelligibilità e la spazializzazione.* A partire dalla risposta all'impulso, considerando anche il rapporto segnale/rumore presente all'interno dell'ambiente chiuso, è possibile ottenere il valore dell'“indice di trasmissibilità del parlato” (STI), in funzione anche del tempo di riverberazione. Esso esprime, in termini percentuali, la capacità di comprendere la parola nella posizione considerata. I valori ottenuti (Fig. 13) evidenziano un andamento buono dello STI , che anche nelle posizioni più sfavorite assume valori prossimi a 0.5. Nella platea, a distanze quindi contenute dalla sorgente sonora, l'intelligibilità risulta soddisfacente, anche in considerazione del limitato rumore di fondo ipotizzato per il teatro. La componente di energia laterale percepita nelle varie posizioni dei ricevitori, ed espressa dalla ‘frazione laterale’, risulta più elevata nell'area del ‘campo diretto’, dove il suono proveniente direttamente dalla sorgente sonora è preponderante rispetto all'energia proveniente lateralmente, mentre in quasi tutte le altre posizioni l'energia sonora risulta essere diffusa. Solo in alcune aree emergono alcune focalizzazioni, dovute certamente alla geometria della sala, ma comunque contenute sia nelle localizzazioni che nei valori numerici.

4.3. *Valutazioni complessive.* L'analisi complessiva della distribuzione sonora nel teatro di Milizia può essere riassunta evidenziando la maggiore riverberazione del teatro rispetto ai teatri d'opera contemporanei. La geometria stessa del teatro consiglia un'analisi comparata con volumi simili, piuttosto che con teatri all'italiana a ferro di cavallo. I valori del tempo di riverberazio-

ne, in gran parte superiori a 2,5 secondi, pur apparendo superiori ai valori che normalmente sono misurati nei teatri d'opera tuttora esistenti, risultano incredibilmente simili ai valori misurati in un teatro non molto dissimile dal teatro del Milizia: il Teatro Olimpico di Vicenza. Le misurazioni svolte all'interno del teatro palladiano hanno infatti evidenziato caratteristiche paragonabili a quelle simulate nel teatro del Milizia, non solo per quanto già osservato per il tempo di riverberazione, ma anche per gran parte dei parametri energetici, che sono risultati sempre superiori ai valori normalmente ritenuti ideali, ma assai vicini ai valori risultanti dalle simulazioni.

L'effetto della concavità del soffitto, pur evidenziando una certa focalizzazione in numerose sedute nella platea, non è apparso compromettere la risposta all'impulso, avendo ipotizzato un comportamento 'a pannello vibrante' della struttura in arellatura sospesa alla struttura della copertura, e quindi in grado di assorbire con una certa efficacia la propagazione a frequenze medio basse.

