



Università degli Studi di Bologna
Dipartimento di Ingegneria Energetica, Nucleare e
Controllo Ambientale

Dottorato di Ricerca in Fisica Tecnica XV° Ciclo

Proposta di un Nuovo Metodo d'Indagine per il Restauro
Acustico di un Teatro dell'800.
Lettura in Frequenza della Risposta all'Impulso in Correlazione
con i Parametri del Dominio Temporale

Tesi di Dottorato di:
Marco Cesare Consumi

Coordinatore:
Prof. Ing. Alessandro Cocchi

Tutore:
Prof. Ing. Alessandro Cocchi

INDICE

Introduzione	p. 1
Capitolo 1.0: La formazione del teatro d'opera in Italia	p. 3
1.1 Il Teatro Olimpico e la riscoperta della classicità di Vitruvio	p. 4
1.2 Teatro di Sabbioneta	p. 5
1.3 Teatro Farnese	p. 6
1.4 La trasformazione architettonica e acustica del teatro	p. 8
1.4.1 L'introduzione dei palchi nella sala	p. 8
4.3.1 Acustica Geometrica. Nascita e sviluppi successivi	p. 9
4.3.2 Il disegno di una pianta teatrale secondo i canoni dell'acustica geometrica	p. 11
1.4.4 Della disposizione dell'orchestra	p. 14
1.4.5 Dalla pianta all'organizzazione della sezione: la disposizione dei palchi	p. 14
1.4.6 La curvatura del soffitto	p. 15
1.4.7 L'arco scenico	p. 16
1.4.8 La distribuzione dei raggi sonori nell'ellisse del Patte - Lettura critica	p. 18
1.5 La seconda fase del teatro in Italia	p. 20
1.6 Teatro della Pergola	p. 20
1.7 Teatro di Tor di Nona	p. 21
1.8 Teatro San Carlo	p. 23
1.9 Teatro alla Scala	p. 24
1.10 Alcuni fra i maggiori trattatisti teatrali operanti in Italia	p. 26
1.10.1 La famiglia dei Galli-Bibiena	p. 26
1.10.2 Il Carini-Motta	p. 27
1.10.3 Il razionalismo teatrale del Milizia	p. 29
1.10.4 Poletti e Aleandri: lezioni pratiche per la costruzione di un teatro attraverso un carteggio datato 1823	p. 31
1.11 Note storiche sul Teatro Nuovo a Spoleto	p. 32

Capitolo 2.0:	Misurazioni nel Teatro Nuovo di Spoleto	p. 37
2.1	Introduzione	p. 37
2.2	Breve relazione architettonica del teatro	p. 38
2.2.1	Dimensioni generali della sala (zona palco esclusa)	p. 38
2.2.2	Dimensioni e caratteristiche del soffitto	p. 39
2.2.3	Dimensioni della buca d'orchestra e palco	p. 39
2.2.4	Caratteristiche dimensionali della sezione dei palchetti	p. 40
2.3	Metodologia delle misurazioni	p. 40
2.4	Misurazioni	p. 42
2.5	Analisi	p. 45
2.5.1	Indice di Intensita' G	p. 45
2.5.2	BQI - Indice di qualita' binaurale	p. 46
2.5.3	Δt_l (tempo di ritardo della prima riflessione) o $ITDG$	p. 46
2.5.4	EDT o tempo di primo decadimento	p. 47
2.5.5	T_{sub} o tempo di riverberazione susseguente	p. 47
Capitolo 3.0:	Discussione dei risultati relativi alle misurazioni	p. 48
3.1	Parametri acustici riferiti per file di sorgenti	p. 48
3.2	Studio delle sorgenti presenti nella 1° fila	p. 52
3.3	Bilanciamento energetico basato sull'indice di intensita' G	p. 54
3.4	Considerazioni finali	p. 56
Capitolo 4.0:	Rapporto fra performance musicale e spazio teatrale	
	Secondo i principi della Teoria Modale e dell'Acustica Musicale	p. 58
4.1	Teoria Modale - brevi cenni	p. 58
4.2	Teoria delle proporzioni dimensionali in rapporto ai modi	p. 61
4.2.1	Rapporti di Sepmeyer	p. 62
4.2.2	Rapporti di Louden	p. 64
4.2.3	Rapporti di Volkmann	p. 66
4.2.4	Rapporti di Boner	p. 66
4.2.5	Rapporti di Beranek	p. 67
4.2.6	Analisi e discussione dei rapporti modali	p. 68

4.3	Teoria delle proporzioni dimensionali secondo i principi dell'Acustica Musicale	p. 69
4.3.1	Appunti brevi di Acustica Musicale	p. 69
4.3.2	Il Teorema di Fourier e la formazione degli accordi musicali	p. 71
4.3.3	Rapporti fra note musicali (Armonia musicale)	p. 73
4.3.4	Rapporto fra esecuzioni musicali e spazio: accordi fra lunghezze d'onda e lunghezze spaziali	p. 73
4.3.5	Tabelle rimanenti	p. 77
4.4	Estrapolazione dei migliori rapporti dimensionali in base all'Acustica Musicale	p. 81
4.5	Confronto fra rapporti	p. 82
4.5.1	Rapporto M	p. 83
4.5.2	Rapporto N	p. 83
4.6	Aggiornamento Tab.4.2	p. 84
4.7	Conclusioni	p. 85
 Capitolo 5.0: La lettura della Risposta all'Impulso nel Dominio della Frequenza		p. 87
5.1	Breve introduzione teorica	p. 87
5.2	Analisi della Risposta all'Impulso	p. 87
5.3	Scelta delle frequenze	p. 89
5.4	Livelli di Picco Ambientale (lettura in frequenza della R.I.)	p. 90
5.5	Presentazione delle tavole relative al sistema sorgente-ricevitore: orchestra-platea	p. 91
5.5.1	orchestra-platea 1	p. 92
5.5.2	orchestra-platea 3	p. 92
5.5.3	Spettrogrammi: orchestra-platea 1	p. 93
5.5.4	Spettrogrammi: orchestra-platea 3	p. 94
5.5.5	orchestra-platea 5	p. 95
5.5.6	orchestra-platea 6	p. 95
5.5.7	Spettrogrammi: orchestra-platea 5	p. 96
5.5.8	Spettrogrammi: orchestra-platea 6	p. 97
5.5.9	orchestra-platea 8	p. 98
5.5.10	orchestra-platea 10	p. 98

5.5.11	Spettrogrammi: orchestra-platea 8	p. 99
5.5.12	Spettrogrammi: orchestra-platea 10	p. 100
5.6	Punti di coerenza nelle frequenze di picco (orchestra-platea)	p. 101
5.7	Presentazione delle tavole relative al sistema sorgente-ricevitore: orchestra-galleria	p. 102
5.7.1	orchestra-galleria 1	p. 103
5.7.2	orchestra-galleria 3	p. 103
5.7.3	Spettrogrammi: orchestra-galleria 1	p. 104
5.7.4	Spettrogrammi: orchestra-galleria 3	p. 105
5.7.5	orchestra-galleria 5	p. 106
5.7.6	orchestra-galleria 6	p. 106
5.7.7	Spettrogrammi: orchestra-galleria 5	p. 107
5.7.8	Spettrogrammi: orchestra-galleria 6	p. 108
5.7.9	orchestra-galleria 8	p. 109
5.7.10	orchestra-galleria 10	p. 109
5.7.11	Spettrogrammi: orchestra-galleria 8	p. 110
5.7.12	Spettrogrammi: orchestra-galleria 10	p. 111
5.8	Punti di coerenza nelle frequenze di picco (orchestra-galleria)	p. 112
5.9	Analisi e discussione dei dati finora riportati	p. 113
Capitolo 6.0: Asimmetria di assorbimento e teoria modale		p. 115
6.1	Distribuzione asimmetrica dell'assorbimento all'interno di un ambiente	p. 115
6.2	Ulteriori approfondimenti	p. 118
6.2.1	Campo perfettamente diffuso e/o campo con asimmetria di assorbimento	p. 119
6.3	Forma e volume di uno spazio	p. 121
6.4	Conclusioni	p. 123
Capitolo 7.0: Correlazione del parametro <i>EDT</i> con l'analisi in frequenza		p. 124
7.1	Due differenti interpretazioni del parametro <i>EDT</i>	p. 124
7.2	Il decadimento temporale piu' lungo associato ad una frequenza	p. 124
7.3	<i>EDT</i> per singole frequenze (<i>EDT_f</i>)	p. 125

7.4	Analisi e discussione dei grafici <i>EDTf</i>	p. 127
7.5	Conclusioni	p. 133
Capitolo 8.0: Conclusioni finali		p. 134
Appendice I: Il comportamento delle prime riflessioni uscenti dalla copertura, attraverso un'analisi geometrica del loro percorso		p. 137
Appendice II: Determinazione della zona d'eco all'interno del Teatro Nuovo. Costruzione dell'iperbole limite		p. 144
Appendice III: Differenza di bilanciamento fra il canale destro e il canale sinistro del ricevente (testa artificiale), in base alla sua posizione		p. 148
Bibliografia:		p. 156
Ringraziamenti:		p. 159

Introduzione

Attraverso una campagna di misurazioni eseguita nel Teatro di Nuovo, importante edificio dell'800 presente a Spoleto e dove si svolge il noto Festival dei Due Mondi, si sono sperimentati nuovi metodi di analisi acustica di un teatro. Con l'applicazione multidisciplinare di materie come l'analisi geometrico-architettonica, la teoria musicale applicate alla fisica acustica degli ambienti, si sono condotti degli studi che hanno prodotto incoraggianti risultati fino alla proposizione di un nuovo metodo di lettura e sua successiva interpretazione, della risposta all'impulso.

Lo studio di questa tesi è così suddiviso: il primo capitolo traccia il periodo di formazione del teatro d'opera in Italia, dall'epoca moderna fino alla fine dell'800, passando in rassegna importanti trattati sulle tecniche di progettazione dei teatri in ambito acustico. Nel secondo e terzo capitolo invece, ho esaminato le misurazioni fatte nel Teatro Nuovo, analizzando i parametri oggettivi del dominio temporale; mentre nel quarto capitolo ho cercato di tracciare il rapporto fra l'esecuzione musicale e l'ambiente teatrale, attraverso la Teoria Modale e l'Acustica Musicale, ricercando i migliori rapporti proporzionali degli spazi attraverso un confronto con altri autori.

Nel quinto capitolo ho analizzato la risposta all'impulso (R.I.) attraverso il dominio della frequenza, trovando importanti correlazioni e riferimenti oggettivi con lo spazio teatrale, fino ad arrivare al sesto capitolo in cui si analizzano alcune teorie proposte da interessanti autori, relative all'asimmetria di assorbimento relazionata alla Teoria Modale, nonché l'importanza oggettiva della forma di uno spazio.

Infine, nel settimo capitolo ho cercato di proporre attraverso un parametro temporale (EDT), una lettura dello stesso da un punto di vista della frequenza (EDT_f), riscontrando dei buoni risultati, confrontati successivamente con la lettura nel dominio della frequenza della risposta all'impulso, nonché con la Teoria Modale, verificando le relazioni geometriche spaziali.

Le tre appendici finali presentano dei metodi grafici attraverso i quali ho potuto verificare le ipotesi di correzione acustica, teorizzate attraverso lo studio iniziale, dimostrando la loro validità sia in campo progettuale che in campo di restauro acustico per ciò che concerne i teatri d'opera.

1.0 La formazione del teatro d'opera in Italia

Secondo molti studiosi la formazione del teatro d'opera in epoca moderna, si può dividere in due fasi principali: la prima segna il passaggio dal teatro provvisorio, al teatro stabile, ovvero dal teatro che veniva allestito solo in occasione di feste od altri eventi, al teatro come edificio specifico nella sua funzione architettonica. Va precisato che i teatri provvisori generalmente, venivano adibiti in sale esistenti all'interno dei palazzi; le dimensioni di queste erano abitualmente molto allungate e di scarsa larghezza, dato che le coperture a capriate rendevano impossibile la copertura di luci maggiori; perciò la sistemazione ad 'U' allungata risultava funzionale, di contro la sistemazione della cavea a semicerchio era piuttosto complicata da applicare.

Il secondo periodo invece, prevede una maturazione architettonica più completa, sia in funzione dell'esigenza di un numero maggiore di spettatori che in questa fase aumentano notevolmente, sia per i progressi tecnici e il sapiente uso dei materiali; si tenga presente anche il cambio di committenza che non è più ad opera di un principe, o comunque di un unico finanziatore, ma bensì saranno associazioni di cittadini e similari a promuovere tali iniziative. Per di più un'altra causa molto importante in questa seconda fase, riguarda il fiorire dei trattati teatrali che oltre a prendere spunto dalla saggistica più antica, per la prima volta pubblicata a mezzo stampa, teorizzavano importanti nuove tesi. Di questo periodo sono le prime sale a palchi in realtà non molto ben viste dai progettisti, ma amate dagli impresari perché costituivano la fonte principale di un maggior reddito attraverso la vendita dei biglietti, incuranti delle condizioni di sicurezza e tanto meno per le condizioni di ascolto, ma sarà attraverso questi e altri contrasti che si formerà il luogo teatrale.

1.1 Il Teatro Olimpico e la riscoperta della classicita' di Vitruvio

Il Palladio e' stato un grande studioso della classicita' architettonica, naturalmente filtrata dagli avanzamenti tecnologici della seconda meta' del '500 e soprattutto dalle riedizioni dei saggi architettonici del passato; trascritti in poche copie durante la classicita' ma nel post-rinascimento riprodotti per la prima volta a stampa. Infatti il *De Architettura* di Vitruvio venne stampato per la prima volta nel 1486 da Sulpizio da Veroli, ma si dovra' aspettare l'edizione di Daniele Barbaro nel 1556 per avere il testo tradotto in italiano dal latino e le illustrazioni del Palladio. Percio' da ottimo conoscitore della classicita' il Palladio, progetta il Teatro Olimpico a Vicenza che rappresenta il primo teatro stabile dell'era moderna, e soprattutto per la prima volta si assiste ad un cambiamento per quanto riguarda la committenza; infatti il finanziamento dell'edificio non e' dovuto ad un signore locale che, per aumentare il proprio prestigio e' in grado di promuovere tale iniziativa (come sovente avveniva in periodi di poco precedenti), ma rappresenta il volere di una associazione di cittadini (Accademia degli Olimpici).

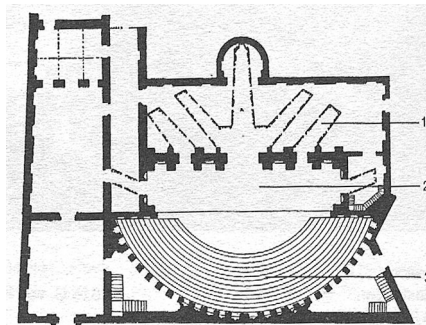


Fig. 1.1. Pianta del Teatro Olimpico di Vicenza (1580-1585), di A. Palladio e V. Scamozzi; 1 scene prospettiche, 2 palcoscenico, 3 gradinata. Da notare anche il peristilio sopra la gradinata, con funzione essenzialmente acustica onde prevenire gli effetti di eco.

La costruzione del teatro inizia nel 1580, anno in cui muore lo stesso Palladio; il compimento del teatro quindi viene assicurato da Vincenzo Scamozzi.

Le indicazioni lasciate dal Palladio seguivano perfettamente i dettami di Vitruvio, il quale suggeriva di inscrivere quattro triangoli nel cerchio della cavea per determinare le partizioni principali dell'edificio; poi, però l'impianto palladiano risulterà a forma semiellittica a causa delle preesistenze murarie a cui si dovrà adattare.

Come per il teatro vitruviano anche il Palladio segue l'indicazione riguardo l'inserimento di un portico al di sopra della cavea, e ciò per limitare acusticamente il propagarsi del fenomeno dell'eco, infatti una superficie completamente riflettente posta oltre una certa distanza, poteva costituire un problema per le riflessioni acustiche. Come ci fa notare l'Alberti nell'ottavo libro del *De re edificatoria* (1447-52), quando afferma: *"..i gonfiati cerchi delle voci, le quali ricevute dolcissimamente in esse logge dall'aria assai quivi condensata, non fussino percotendovi in piena ribattute da quella intere, ma piu' presto rattenutevi, e raffermate"* [1]. Attraverso l'inserimento del portico, sempre per mezzo dell'interpretazione che dà l'Alberti di Vitruvio, la parete non è più *resonantes* ma *consonantes*¹; probabilmente sia Vitruvio che l'Alberti si riferivano all'intelleggibilità del parlato in contrasto con il fenomeno dell'eco.

1.2 Teatro di Sabbioneta

Ad opera di Vincenzo Scamozzi è il piccolo edificio di Sabbioneta (1588-1590) costruito per il duca Gonzaga; questa costruzione può probabilmente considerarsi la prima in Italia ad essere edificata con la sola funzione teatrale. Si notano ancora i dettami architettonici di Vitruvio, anche se qualche variante come la pianta che richiama vagamente la forma a campana, può considerarsi uno dei primi esempi di questo tipo di

¹ "The acoustics of Italian opera houses and auditoriums"; Barbieri, P. (1998) in "Recercare" X.

disegno, attraverso il raccordo dei gradoni con le pareti laterali. La cosa che però richiama di più lo stile vitruviano è senz'altro il peristilio al di sopra dei gradoni, dove generalmente assistevano i regnanti e le donne.

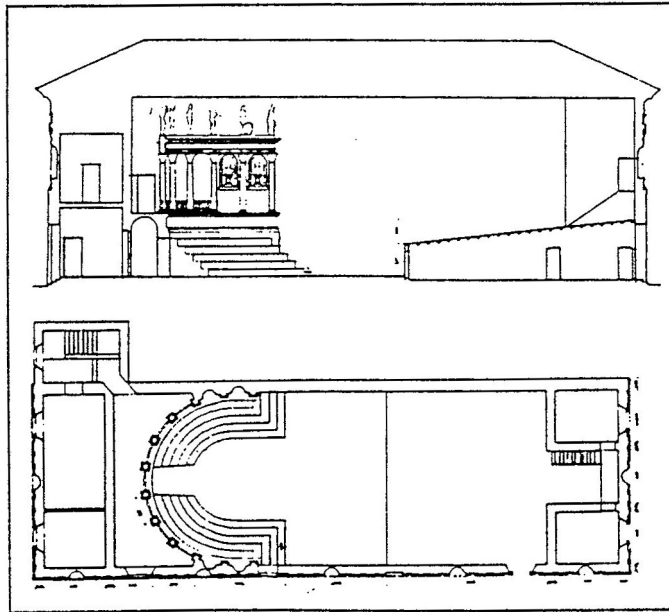


Fig.1.2. Teatro di Sabbioneta: sezione e pianta.

1.3 Teatro Farnese

Progettato dall'Aleotti (1618-28), questo teatro riveste un notevole interesse soprattutto per la nuova concezione della scena, e quindi da un punto di vista ottico, che come vedremo si arricchirà di due elementi, il primo è la maggiore lunghezza della scena per permettere agli attori di muoversi non solo trasversalmente ma anche in profondità, e il secondo, più importante da un punto di vista acustico, la formazione dell'arco scenico; pensato inizialmente come un diaframma fra l'illusione della scena e gli spettatori, assumerà poi una notevole importanza da un punto di vista acustico per il rinforzo che offriva alla voce dei cantanti.

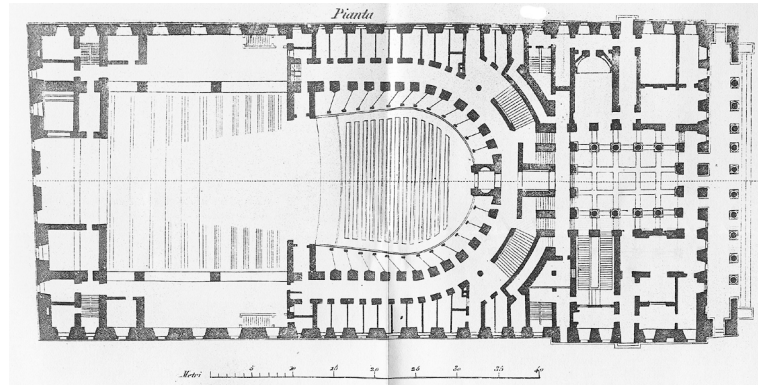


Fig. 1.3. Pianta originale del Teatro Farnese di Parma

Pur non essendo il primo esempio di arco scenico, si ricorda infatti che i primi modelli sono quelli di Bartolomeo Neroni che introduce in un suo disegno il suddetto arco nel 1560 per il Teatro degli Intronati a Siena, nonché il Buontalenti nel Teatro degli Uffizi a Firenze; nell'esempio del Teatro di Parma è riscontrabile la testimonianza.

La pianta è a "U" (Fig. 1.3) con i due bracci allungati per permettere la possibilità della scena avanzata, al di sopra delle gradinate vi è un alto loggiato in perfetto stile vitruviano, formato da due ordini di arcate più la galleria; da notare anche le due entrate ai lati della scena. Un altro elemento importante di questo teatro è rappresentato dall'orchestra che viene posizionata fra l'arco scenico e la cavea; questo esempio pur non rappresentando un primato², conserva in sé lo stile della buca orchestrale, dove i musicisti sono nascosti da un'alta balaustra circondata da scalini colleganti la scena con la cavea.

² Il primo esempio infatti risulta essere datato 1622 nell'opera di Jacopo Cicognini, "Il martirio di Sant'Agata", in un oratorio fiorentino come viene riportato in "The acoustics of Italian opera houses and auditoriums"; Barbieri, P. (1998) in "Ricerca" X.

1.4 La trasformazione architettonica e acustica del teatro

La rapida diffusione a livello sociale del teatro, favorisce la nascita di numerosi impianti e quindi una trasformazione da un punto di vista architettonico e di conseguenza anche da un punto di vista acustico. La necessita' di aumentare i posti a disposizione implica una maggiorazione dell'involucro sia in altezza che in profondita' e per tale motivo nascono due problematiche importanti quella ottica (assicurare una buona visione da ogni postazione) e quella acustica (poter udire da ogni punto e senza problemi di eco, ad esempio).

1.4.1 L'introduzione dei palchi nella sala

Come gia' introdotto nel paragrafo (1.1) a proposito della committenza per la costruzione del teatro, nella seconda meta' del seicento fiorisce l'idea della produzione teatrale da parte dei cittadini piu' abbienti. Conseguentemente comprando e/o affittando i posti, si giunge come ovvia conclusione, ad un moltiplicarsi gli ordini dei palchi indipendentemente dai fattori di sicurezza, di buona visione e di buon ascolto; fattori questi di interesse solo per i progettisti dato che i cittadini vivevano l'idea del teatro solamente come un momento di svago che spesso sfociava in vera e propria indisciplinazione; per questo motivo, il progettista Francesco Milizia era contrario alla sala a palchi ed era per un ritorno alla sala con cavea³. Il palco costituiva un'appendice remota del salotto familiare e poteva essere arredato a piacimento, come esempio si ricorda il caso della Scala di Milano, quando in occasione della ricostruzione dopo i danni della guerra si trovarono decorazioni di palchi diversissime tra loro.

³ "Sviluppo storico-tipologico delle architetture per lo spettacolo"; Degl'Innocenti P. (1995); Alfani; Firenze.

Inoltre, nasceva l'esigenza soprattutto in ambito acustico di trovare un metodo progettuale per garantire la corretta distribuzione dell'energia acustica, visto che lo spazio stava mutando per venire incontro alle esigenze del periodo; per questo fra la seconda meta' del seicento e per tutto l'ottocento si assiste ad un prosperare della saggistica sui teatri.

1.4.2 Acustica Geometrica. Nascita e sviluppi successivi.

La propagazione del suono associata alla legge della riflessione dei raggi luminosi prese campo alla fine del '600, soprattutto con la riscoperta delle sezioni coniche e con gli studi su Archimede come asserisce il Barbieri⁴. Cio' costitui' una vera rivoluzione concettuale, dato che fino ad allora la teoria principale si fondava sui presupposti vitruviani che a loro volta nascevano dall'acustica intuitiva di Aristotele, della quale si puo' trovar traccia nei *Problemi di fonazione e di acustica*⁵ [2], attraverso la quale si giunse forse per la prima volta, al concetto della propagazione del suono attraverso onde circolari; concezione questa, confermata da Vitruvio e poi portata avanti attraverso il criterio delle onde sferiche. I modelli tardo-rinascimentali dei teatri del Serlio (1539), Palladio (1588) e Aleotti (1618) prendevano spunto proprio da questa teoria inerente la propagazione delle onde sferiche.

L'acustica geometrica, permise di considerare per la prima volta il concetto della forma migliore da associare ad uno spazio teatrale; i sensi della vista e dell'udito partecipavano attivamente al disegno del teatro, sino ad arrivare alla sperimentazione della planimetria ovoidale adottata forse per la prima volta da Carlo Fontana nel rinnovamento del teatro di Tordinona a Roma (1671). Tale salto di qualita' oltre a rispondere ad una scelta

⁴ "Recercare" X, Barbieri, P.;1998

funzionale di buon ascolto e buona visione da ogni punto del teatro, innesta il criterio del continuum architettonico fra scena e spettatori, criterio questo che verra' ulteriormente sviluppato negli anni a venire; non senza pero', aver creato una tendenza seguita dai piu' illustri progettisti teatrali come il Theodoli nel Teatro Argentina a Roma (1732), il Medrano per il primo San Carlo a Napoli (1737), il Vanvitelli per il teatro nella Reggia di Caserta (1758), il Selva per la Fenice di Venezia (1792), nonche' il Piermarini per la ben nota Scala di Milano⁶. Ma come ci orienta il Tafuri, di cui alla nota precedente, la perfezione si avra' nella sala ellittica del Teatro Regio di Torino (1738) sviluppato da Benedetto Alfieri su un'idea dello Juvarra.

Inoltre anche nel *Saggio sull'Architettura Teatrale* scritto nel 1782 da Pierre Patte⁷, si troveranno i riferimenti per un prototipo ideale dal punto di vista ottico e acustico, dove l'ispirazione al Teatro Regio viene palesata chiaramente; dove per la prima volta si cerchera' di dare un riscontro misurato e quindi scientifico, alle scelte inerenti l'uso della pianta ellittica.

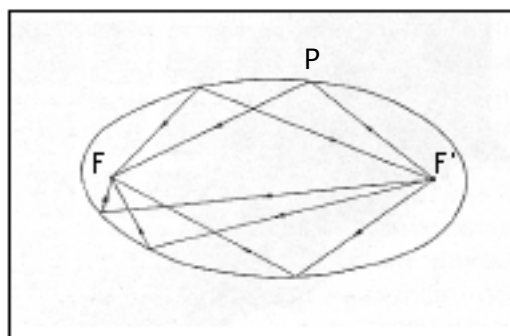


Fig. 1.4. nella figura dell'ellisse i raggi uscenti da un fuoco F si concentrano nell'altro fuoco F'.

⁵ *Problema n°8*; in *Problemi di fonazione e di acustica*; vedi bibliografia.

⁶ "Teatri e scenografie"; Tafuri, M. 1976.

⁷ In "Storia e Descrizione de' Principali Teatri Antichi e Moderni"; Ferrario, G. 1830.

Come fa notare il Barbieri [3], il diagramma del percorso dei raggi dell'ellisse relativo alla Fig 1.4 e' valido solamente quando:

$$\lambda \ll l \quad (1.1)$$

dove λ = lunghezza d'onda, l = misura della superficie a contatto. Infatti il concetto della diffrazione del fronte d'onda venne proposto da Huygens nel 1690 ma per essere spiegato e recepito si dovro' aspettare fino agli inizi del diciannovesimo secolo.

1.4.3 Il disegno di una pianta teatrale secondo i canoni dell'acustica geometrica

Attraverso il "Saggio sull'Architettura Teatrale" di Pierre Patte [4], si riportano i fondamenti per il buon disegno delle piante teatrali a pianta ellittica, dato che in quel periodo era considerata la forma geometrica migliore da usare per la pianta di un teatro; il Patte enunciandone i pregi, affermera' che dovendo mettere insieme due esigenze funzionali come quella ottica per una buona visione e quella acustica per un buon ascolto, qualsiasi altra soluzione non riuscirà a risolvere tanti problemi come la forma ellittica. Il saggio spiega meticolosamente i passaggi piu' importanti senza tralasciare d'importanza il posizionamento di ogni elemento architettonico (come il palco, il proscenio, la forma del soffitto e la sua altezza, i palchi ecc.) rispetto all'altro; vediamo come con l'aiuto della seguente figura.

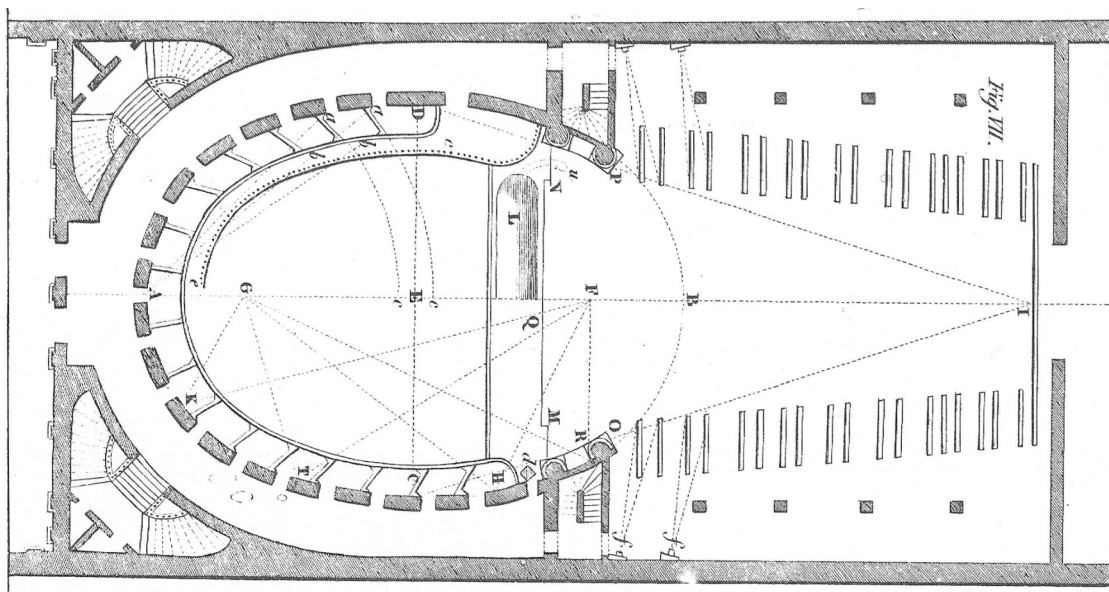


Fig. 1.5. L'acustica geometrica applicata al calcolo della distribuzione dei raggi sonori nella pianta a forma di ellisse, secondo di principi del teorico francese Pierre Patte.

Siano AB e CD , i due diametri di un ellisse nel rapporto⁸ di 4 a 3, considerando la lunghezza di 72 piedi ("portata comune della vista e della voce"), sarà di conseguenza di 54 piedi la larghezza. Le due dimensioni devono incrociarsi ad angolo retto nel punto mediano di ogni retta; per determinare i fuochi si procederà come segue: prendendo con un compasso la lunghezza AE , metà di AB , questa si porterà in C e D , estremità del piccolo diametro, da una parte e dall'altra verso AB , e il loro intersecarsi in F e G darà sul grande diametro il punto dei due fuochi. Fatto questo, per trovare la parte anteriore del palcoscenico e del proscenio basterà troncare l'ellisse ai $3/4$ del suo diametro maggiore e dividere il segmento EB a metà con la linea MN . Con questa operazione la sponda del palcoscenico MN sarà a 18 piedi dall'estremità B , e AQ si troverà uguale a CD , vale a dire avrà anch'esso 54 piedi, ne segue che la sala avrà la stessa lunghezza e la stessa larghezza; ma da un punto di vista acustico, la dimensione della sala prendendo

⁸ Tale rapporto che in musica viene chiamato "rapporto di quarta perfetto" che, come vedremo in seguito attraverso il capitolo dedicato ai rapporti musicali interagenti con i rapporti dimensionali del teatro, rappresenta il "rivolto" del rapporto di quinta, anche questo chiamato "perfetto" nell'armonia musicale e largamente usato; come affermato dal Patte e' anche il rapporto della pianta del Teatro di Torino e quello del Teatro dell'Opera di Parigi.

in considerazione la sorgente sonora ovvero la distanza dal fuoco F , mantiene inalterato il rapporto iniziale lunghezza/larghezza, ovvero il rapporto di $4/3$. Infatti, a ben guardare, il rapporto si mantiene quasi costante dato che il Patte e' partito da un'ellisse esterna, inserendo la pianta internamente. Egli ha inserito nella larghezza del teatro, forse erroneamente, anche la profondita' dei palchetti, cosa che da un punto di vista acustico, circa lo spazio di percorrenza dei raggi, non ha molta rispondenza dato che le riflessioni principali, ovvero le piu' importanti per ampiezza, avvengono all'altezza dei parapetti dei palchetti e non dagli interni degli stessi⁹.

Circa l'apertura del palcoscenico e l'estensione del proscenio, devono l'una e l'altra essere regolate dalla maggiore o minore profondita' del palcoscenico stesso, in modo tale che da tutti i posti sia facile scorgere la tela del fondo delle decorazioni. Supponendo il mezzo di questa tela in I , nella distanza di circa 60 piedi dalla linea MN , si traccino le linee CI e DI ; il loro punto di intersecazione O e P con la curva ellittica, non solamente dara' l'apertura del palcoscenico, ovvero la sua larghezza e la sua altezza che sara' di circa 36 piedi, o la meta' del gran diametro, ma anche la profondita' del proscenio MO e NP , che avra' quasi 8 piedi o la nona parte del gran diametro.

Si abbia cura, raccomanda il Patte, che il fuoco F si trovi tutto naturalmente situato nel mezzo del proscenio, e che per conseguenza tutti i raggi d'aria FR , FH , FT , FK messi in movimento dalla voce debbano essere necessariamente rimandati verso l'altro fuoco G , o alla meta' della platea.

⁹ Tale punto e' di cruciale importanza dato che come si dimostrera' nei capitoli successivi, il rapporto perfetto, sia esso pari a $4/3$ che a $3/2$, andrebbe mantenuto per tutto lo spazio utile al cammino dei raggi sonori.

1.4.4 Della disposizione dell'orchestra

Per quanto riguarda tale sistemazione, il Patte dichiara che la miglior soluzione e' quella di disporre lo spazio orchestrale tra il palcoscenico e la platea e cio' anche per una esigenza visiva, dato che una certa lontananza per gli spettatori delle prime file deve essere mantenuta perche' *"contribuisce ad aumentare l'illusione, la qual ha ognor bisogno di una certa distanza per produrre il suo effetto"*. Ma piu' di un secolo prima delle teorie del Patte, agli inizi del '600, in Italia si preferiva posizionare l'orchestra dietro il palcoscenico e quindi, il suo ascolto poteva pervenire solamente a chi stava sul palcoscenico e molto poco in sala e cio' probabilmente per una preferenza nella intelleggibilita' delle parole rispetto alla musica. Successivamente la tendenza ad infossare l'orchestra prevalse principalmente per un motivo visivo, dato che nei grandi teatri, i violini e le viole soprattutto, erano costretti a montare corde piu' grosse del normale per aumentare la loro ampiezza sonora e cio' anche a discapito dell'esecuzione stessa dato che quasi tutti i musicisti con strumenti a corda hanno un personale set-up per quanto riguarda il diametro delle corde, inoltre una tale maggiorazione impedisce i glissando micro-tonali tipici di questi strumenti. Concludendo, si puo' affermare che dall'infossamento orchestrale, pur guadagnando in amalgama, gli strumenti ad arco (ad esclusione forse dei contrabbassi), perdono in dinamica d'esecuzione, dovendo suonare quasi sempre in *sforzando*; mentre per gli strumenti a fiato e a percussione si riscontra un vantaggio.

1.4.5 Dalla pianta all'organizzazione della sezione: la disposizione dei palchi

La miglior condizione secondo il Patte, per il disegno dei palchi, dopo aver scartato numerose ipotesi, sia quella d'innalzare le differenti file di palchi a piombo l'una sull'altra, senza pilastri appariscenti sul davanti e di ordinarle all'intorno d'una sala

secondo il modo dei ballatoi continuati come nell'Opera di Parigi; continuando, qualsiasi altra disposizione si voglia addurre contro tale proposta, gli inconvenienti saranno sempre minori rispetto a quelli che nasceranno da qualsiasi altra ipotesi progettuale: *"..Ma ad ottenere da questi recinti tutto il desiderato effetto bisognerebbe farli sempre uniti e a piombo, vale a dire senza convessita' e senza ammettervi ne balaustri, ne stoffe, ne ornati in rilievo, non servendo tutto cio' che a ricettare la polvere, a sminuzzare il suono, e a far torto al concerto de' suoi rimandi"*.

1.4.6 La curvatura del soffitto

Sia dal saggio del Patte, che dal trattato del Carini¹⁰, si deduce che il soffitto assume una notevole importanza per il rimando della voce (*"Destinato questo a compier l'ufficio di rimbalza-voce.."*). Nei due saggi sopra citati vi e' un accordo sia sulla forma concava che sulle proporzioni; prendendo spunto dal Carini [5] si legge che l'altezza a cui deve essere posto il soffitto non deve superare la larghezza della pianta e *"..ne' si fara' meno alta delli due terzi di detta larghezza.."*, e quindi ci troviamo di fronte ad una duplice raccomandazione, infatti oltre al limite da lui imposto di non superare mai la larghezza della platea ci dice anche che non deve essere meno alta di due terzi della larghezza e quindi quest'ultima e' in rapporto di 3/2 con l'altezza, rapporto questo chiamato perfetto in musica, conosciuto come rapporto di 5°; non solo ma anche il Patte usa il rapporto perfetto come il rapporto di 4°, per la pianta dei teatri¹¹ come gia' accennato nel paragrafo 1.4.3.

¹⁰ "Trattato sopra la struttura de' teatri e scene"; Carini Motta.

¹¹ In musica e' il rapporto di 5° ad essere chiamato perfetto, ma anche quello di 4° e' considerato perfetto in quanto quest'ultimo costituisce il cosiddetto *rivolto* che per facilita' lo potremmo definire il suo reciproco. Questa teoria verra' ampiamente analizzata nei capitoli successivi.

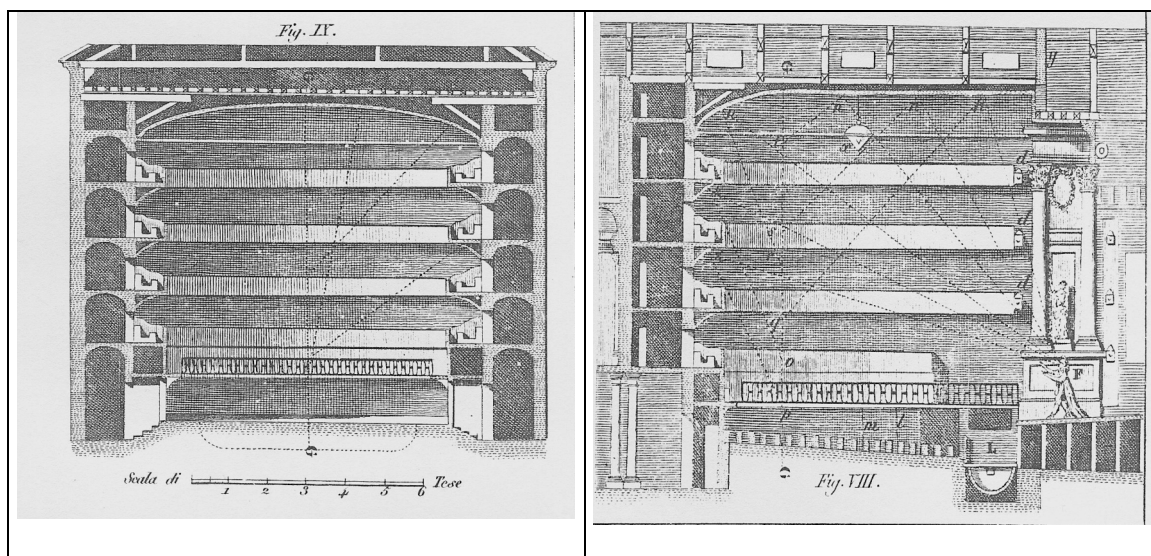


Fig. 1.6. La formazione della sezione e l'inclinazione del soffitto secondo i disegni di Pierre Patte. La prima figura a sinistra rappresenta una sezione trasversale, quella a destra una sezione longitudinale.

Il Patte avverte però che *"il farla troppo concava potrebbe esser cagione di ridondanze"* e propone cinque suggerimenti per la buona costruzione del soffitto di un teatro; il primo espone dei principi tecnologici quali la buona unione fra il tavolato nonché la distanza di un "piede" da lasciare fra il tavolato e il soffitto in muratura soprastante e questo per renderlo più sonoro. Il secondo suggerimento raccomanda di non inserire decorazioni in rilievo ma solo dipinte perché altrimenti si incorrerebbe nel rischio di ostacolare il normale fluire della voce; infine attraverso le altre raccomandazioni dichiara che nel soffitto non devono essere praticati fori o quant'altro (per l'alloggiamento dei lucernari ad esempio) che risulterebbero pregiudizievoli per la circolazione del suono ed inoltre anche le decorazioni, dovrebbero esser fatte tutte sul legno direttamente, senza annettere quindi, stucchi o altri materiali.

1.4.7 L'arco scenico

Questo elemento architettonico, è stato introdotto probabilmente per la prima volta nel Teatro Farnese a Parma da parte dell'Aleotti; agli inizi del '600 la sua funzione era

prevalentemente scenica, ma subito dopo si e' capita l'importanza anche da un punto di vista acustico dato che aiutava la naturale amplificazione della voce nel suo percorso sonoro verso la sala d'ascolto. Il Carini Motta nel suo trattato, ne spiega l'efficacia attraverso una analisi costruttiva e come possiamo notare nella Fig.1.7, interpreta l'arco scenico come un diaframma fra le ali della forma della pianta con la prospettiva scenica; si nota infatti, una svasatura evidenziabile in figura come la differenza fra le dimensioni di A e B , non solo ma afferma anche l'importanza della rotondita' degli angoli dell'elemento stesso. Inoltre, anche in questo caso vi e' un acceso dibattito fra progettisti e impresari teatrali, dove i primi asseriscono la necessita' di non introdurre i palchi all'interno dell'arco scenico proprio perche' queste aperture diminuirebbero la capacita' di riflessione del suono; gli impresari invece, probabilmente consci del fatto che tali postazioni, costituirebbero un ambito premio per gli spettatori piu' importanti, non si preoccupano del lato tecnico-funzionale e introducono, contrariamente al volere dei progettisti, i palchetti; provando che spesso erano addirittura i signori locali a promuovere tale iniziativa e che talvolta gli stessi abbandonavano i palchi centrali, a loro destinati, per andare ad assistere dai palchetti posti nell'arco scenico.

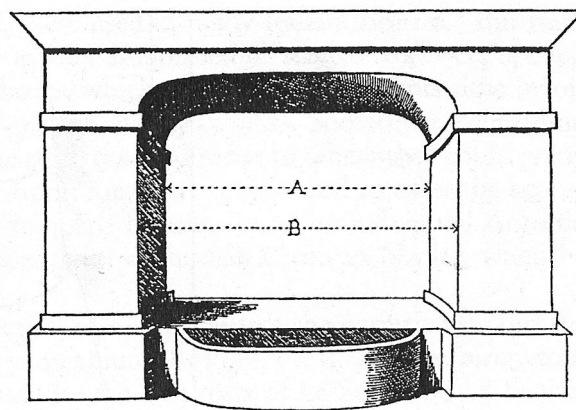


Fig.1.7. Rappresentazione di un arco scenico da parte del Carini Motta, privo di palchi e con una leggera svasatura funzionale al rimando della voce in direzione della sala d'ascolto.

1.4.8 La distribuzione dei raggi sonori nell'ellisse del Patte - lettura critica

Attraverso i disegni del Patte e' facile osservare che dell'ellisse iniziale si e' mantenuta la distanza fra i due fuochi ma non le dimensioni relative alla larghezza e alla lunghezza. I rapporti sono stati mantenuti piu' o meno costanti ma la distanza dai fuochi non e' piu' la stessa in quanto le dimensioni iniziali dei raggi minore e maggiore, non sono state mantenute (l'ellisse iniziale e' esterno) in conseguenza alla formazione dei palchetti, quindi la larghezza diminuisce, con la formazione del palco, diminuisce pure la lunghezza; mentre il posizionamento dei fuochi rimane sostanzialmente lo stesso in base ai disegni. Quindi, si prospettano due interpretazioni per cio' che riguarda la raccomandazione del Patte e quindi per cio' che riguarda la teoria dell'ellisse:

$$PF + PF' = K \quad (1.2)$$

Dove P rappresenta un punto qualsiasi nel perimetro dell'ellisse; F rappresenta il primo fuoco; F' rappresenta l'altro fuoco e K e' la costante (vedi Fig. 1.4).

La prima interpretazione: se si considera l'ellisse iniziale, quello esterno, nel quale sono stati iscritti i palchetti, i raggi sonori di collegamento tra i fuochi e il perimetro dell'ellisse, non possono piu' seguire lo stesso percorso in quanto la riflessione utile, quella necessaria per arrivare sino al fondo della sala oppure quella necessaria per arrivare al fuoco del fondo della sala, non sara' sufficiente in quanto i raggi, disegnati dal Patte, che partono dal fuoco posto sul proscenio (sorgente) "entrano" nei palchetti e di conseguenza non giungeranno al fuoco del fondo della sala (in ogni caso cambieranno il loro percorso dato che le pareti interne dei palchetti, una volta colpite dal raggio proveniente dal fuoco-sorgente, non permettono al raggio riflesso di dirigersi verso il fuoco opposto come si nota dai disegni).

La seconda interpretazione: se considerassimo una nuova ellisse, inscritta all'interno di quella iniziale, con larghezza o raggio minore pari alla distanza dei parapetti dei palchetti e non dal loro interno; troveremmo una nuova ellisse piu' piccola e di rapporti costanti rispetto agli iniziali $4/3$, ma il posizionamento dei fuochi sul raggio maggiore, sara' di conseguenza differente, infatti la distanza fra i fuochi diminuira' in proporzione alla riduzione delle dimensioni generali dell'ellisse; di conseguenza i nuovi fuochi si troveranno, il primo (sorgente) all'altezza della linea MN del disegno del Patte, il secondo (ricevente) nel punto piu' vicino al centro della sala rispetto al precedente. I due fuochi dell'ellisse inscritto all'originale si troveranno piu' vicini rispetto ai precedenti di una distanza pari circa al doppio della larghezza dei palchetti. Quindi, scartando la prima interpretazione in virtu' del fatto che i raggi entrando nel palchetto non potrebbero piu' seguire il percorso ideale a causa delle pareti interne dello stesso, si cerchera' di verificare la seconda interpretazione valutando anche le opportune modifiche da attuare per rispettare la tesi iniziale del percorso dei raggi uscenti da un fuoco dell'ellisse.

La traccia iniziale dell'ellisse e', secondo me, corretta ma sarebbe stato opportuno cambiare il metodo progettuale in favore di una costruzione che avvenisse verso l'esterno dell'ellisse e non verso l'interno; in questo modo il posizionamento dei fuochi, descritto dal Patte, sarebbe risultato piu' coerente alla sua teoria.

Va aggiunto pero' che la teoria sull'ellisse, probabilmente non e' nativa dei circoli dell'Encyclopedie, dove appunto gravitava il Patte; infatti all'interno del catalogo di una mostra sui teatri storici [6] in Emilia-Romagna¹² vi e' un'incisione tratta dall'opera "Apiaria Universae Philosophiae Mathematicae" del gesuita bolognese Mario Bettini che gia' nel 1642, sulla base di argomentazioni simili a quelle del Patte, aveva avuto

¹² S.M. Bondoni, Bologna 1982

modo di sperimentare la propagazione ellittica del suono; infatti si puo' notare che l'incisione mostra un'analoga utilizzazione dei due fuochi dell'ellisse nei quali sono posizionati gli attori in un fuoco ed il principe in quello opposto. Ma al di la' delle questioni di paternita', il punto fondamentale del Patte sta nella radicalita' delle sue proposizioni, perfettamente in linea con l'orientamento dell'*Encyclopedie* che aveva come obbiettivo quello di estendere il metodo scientifico a tutte le discipline anche negando l'elaborazione artistica del teatro, proprio perche' non scientifica [7].

1.5 La seconda fase del teatro in Italia

La nascita delle nuove esigenze del pubblico, porta al perfezionamento sia dell'apparato tecnico scenografico, che del carattere distributivo della sala a palchi e insieme, costituiranno la natura di un modello conosciuto internazionalmente come "teatro all'italiana".

1.6 Teatro della Pergola

La costruzione di questo teatro viene attribuita a Ferdinando Tacca tra il 1652 e il 1661 a Firenze, con la committenza dell'Accademia degli Immobili. Il progetto originario venne eseguito ma successivamente modificato, nel 1689, portando il numero dei palchi da cinquanta disposti su tre ordini, a 78 disposti su quattro ordini e poi nel 1754 a 84; modificando inoltre, anche la pianta (da campana a ferro di cavallo). Ovviamente le motivazioni di tale intervento sono da ricollegarsi, come detto prima, ad una esigenza economica, passando in secondo piano cosi' il carattere distributivo acustico-architettonico a cui doveva invece riferirsi la funzione stessa del teatro. La disposizione dell'orchestra era stata prevista davanti al proscenio, rappresentando cosi' forse uno dei

primi esempi di tale sistemazione dato che i casi precedenti costituivano un carattere temporaneo.

La scena riprende i canoni del Farnese di Parma, con un impianto molto profondo per permettere l'interposizione di fondali a distanze diverse dal boccascena, così da permettere una varietà prospettica che successivamente verrà usata da molti progettisti.

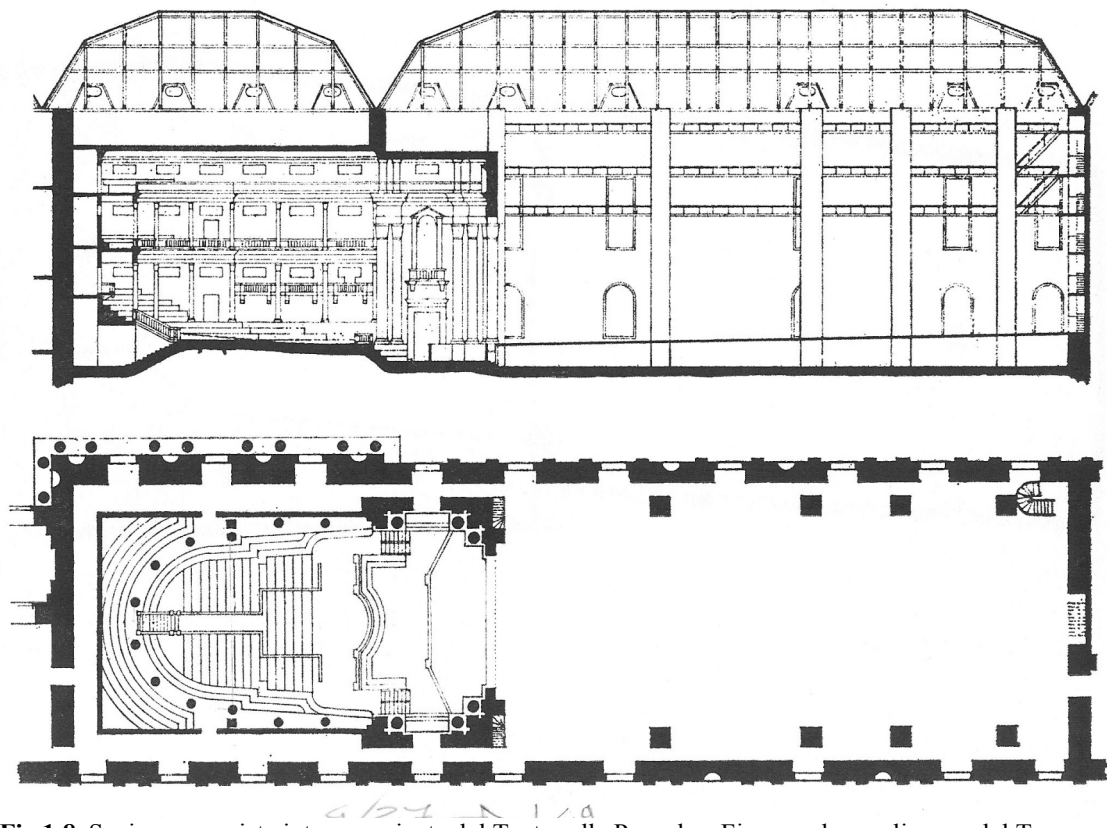


Fig.1.8. Sezione con vista interna e pianta del Teatro alla Pergola a Firenze; da un disegno del Tacca.

1.7 Teatro di Tor di Nona

Varie sono state le vicissitudini di questo teatro costruito a Roma lungo gli argini del Tevere; tre in totale le ricostruzioni e ognuna delle quali differenti soprattutto per quanto riguarda il disegno della pianta, nonché per il numero dei palchetti. La prima edificazione ad opera di Carlo Fontana avvenne nel 1671 con pianta ad U allungata in direzione perpendicolare al Tevere; conseguentemente a ciò le dimensioni del teatro

erano abbastanza ridotte. La seconda costruzione prevedeva una edificazione ex novo, in quanto oltre a cambiare il tipo di pianta, lo stesso architetto, cambio' persino la

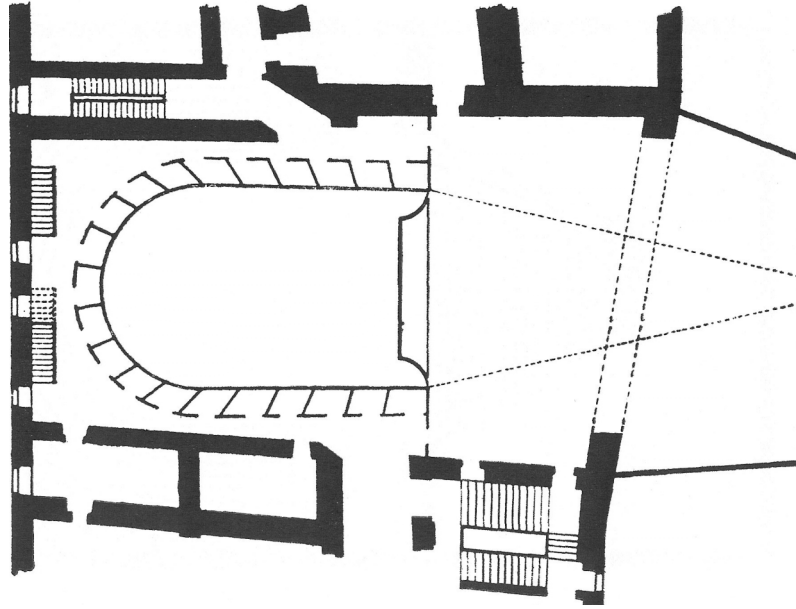


Fig.1.9. Il Teatro Tor di Nona a Roma nel primo progetto del Fontana (1670)

direzione, posizionando la pianta, non piu' ad U ma a magnete (ovvero con le ali direzionate verso la prospettiva scenica, di cui proseguivano gli allineamenti), parallelamente alla sponda del Tevere, guadagnando cosi' spazio utile per l'ampliamento del teatro stesso, nonche' per gli accessi ed i collegamenti. La sua datazione risale al 1696 quando venne inaugurato, ma per dei contrasti con la corte papalina, appena dopo un anno, l'edificio venne chiuso e successivamente smontata la struttura in legno. Si dovro' aspettare il 1733 per vedere il nuovo teatro con un ulteriore cambiamento della pianta in favore della forma a ellisse; questa disposizione sembrava essere la migliore rispetto alle precedenti, tanto da essere citata anche dal Patte nel suo saggio sull'architettura teatrale (1782) insieme al teatro di Torino.

1.8 Teatro di San Carlo

Ancora dalla lettura del Saggio del Patte e la interpretazione di tale saggio da parte del Landriani¹³, si delineano due modi di pensare il luogo teatrale; il primo ha una visione un po' critica soprattutto per quanto riguarda la grande dimensione dell'involucro che non aiuto il rimando della voce, citando anche una sua impressione sull'ascolto di un'opera che mal si udiva pur stando a meta' circa della sala, mentre il Landriani addirittura elogia questo tipo di impianto paragonandolo ad uno dei migliori teatri in Italia; va detto che il Landriani ne esalta le architetture, effettivamente ben congegnate a livello visivo, nonché a livello distributivo, dato che era stato predisposto anche di un ridotto, disimpegno e sale per ogni confort. Si può dire che il San Carlo di Napoli rappresentava l'idea di promuovere l'immagine dei suoi committenti, i Borboni, e da questo punto di vista c'erano riusciti perfettamente tanto che fu quasi un successo politico per i regnanti; Stendhal in una sua dichiarazione elogiativa nei confronti del teatro napoletano, disse anche che fu "un vero colpo di stato" e non senza colpo ferire, aggiungo, dato che il primo impresario, Angelo Carasalle, venne condannato a morte dai Borboni.

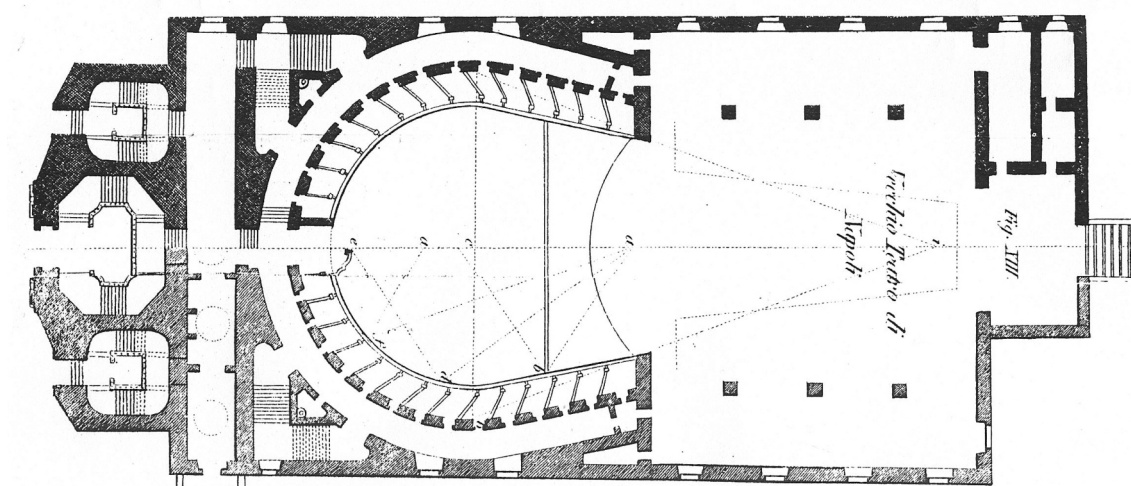


Fig. 1.10. Il primo progetto per il Teatro San Carlo di Napoli del Medrano.

I palchi sono disposti su cinque ordini piu' una galleria e la capienza si aggira intorno ai 3000 spettatori; l'ultima ristrutturazione avvenuta ad opera del Niccolini, introdusse un possente arco scenico (non presente nel primo progetto del Medrano), che segue la direzione prospettica delle ali della pianta a ferro di cavallo, e cio' non solo per un motivo di ordine visivo ma anche da un punto di vista acustico risulta coerente; le colonne binate di ordine composito, forse corinzio, a giudicare dalla piante sembrano delle robuste lesene dato il loro carattere sembra puramente decorativo e non portante a livello strutturale.

1.9 Teatro alla Scala

Parlare di questo "tempio della lirica", puo' risultare riduttivo, dato che in questa sede, si vuol dare solamente una breve descrizione di massima, inoltre e' stato scritto cosi' tanto su questo edificio che meriterebbe un capitolo a parte, quindi mi limitero' a enunciare alcune delle sue caratteristiche con qualche commento trovato nel Saggio del Patte. La sua costruzione risale al 1778 (in alcuni testi e' riportata anche la data del 1774) e il progettista fu il Piermarini (1734-1808); purtroppo a causa dei bombardamenti della seconda guerra mondiale, cio' che rimane del vecchio teatro e' solamente l'involucro esterno e neanche completamente. La pianta della sala ha la forma del ferro di cavallo e cio' che si sa dai vecchi progetti e' che gli interni erano tutti in legno compresa la volta del soffitto che pero' era anche intonacata; il tipo di pianta adottata all'epoca della sua costruzione era presente solamente per il teatro Argentina in Roma e per quello della Reggia di Caserta; da cio' che si sa il Piermarini collaboro' con il Vanvitelli proprio per

¹³ "Storia e Descrizione de' Principali Teatri Antichi e Moderni"; Ferrario, G. (1830), Milano.

quest'ultima opera tra il 1756 e il 1768. I palchi sono 174 e si sviluppano su sei ordini; i posti sono all'incirca 2500 e come si puo' notare dalla pianta in Fig. 1.7, le quinte prospettiche sono l'esatta prosecuzione dei lati della sala o per meglio dire le ali del ferro di cavallo.

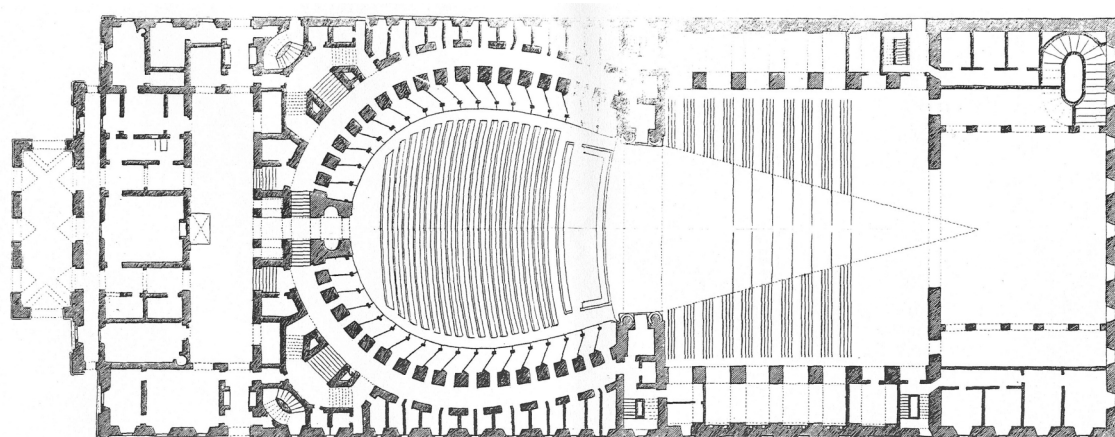


Fig. 1.11. Pianta del progetto del Piermarini per il Teatro alla Scala di Milano.

La prospettiva scenica e' di tipo centrale ad unico punto di fuga, contrariamente all'avanzamento tecnico del tempo dove gia' si praticavano nelle scene, punti di fuga multipli. Vorrei riportare anche un commento, come accennato all'inizio, del Patte che poco apprezzava, e forse non a torto, le grandi sale (volute ad onor del vero, solamente dagli impresari per un motivo economico, e mai dai progettisti ne tanto meno dai trattatisti, come testimoniano numerosi studi sul teatro), che a suo dire erano poco adatte al rimando della voce: *"In vero.....si rendera' facilmente sensibile l'irregolarita' dei rimandi, i quali per ogni verso non si produrranno che uno dopo l'altro, e quindi che d'essa, per tutto cio' che riguarda i rimandi, e' per la sua figura una delle meno adatte a favorirli"*.

1.10 Alcuni fra i maggiori trattatisti teatrali operanti in Italia

L'interesse per il luogo teatrale, nel periodo che va dal seicento all'ottocento principalmente, assume dei connotati particolarmente importanti, alcuni teorici francesi sono spinti a trattare quei principi architettonici concernenti il teatro, attraverso gli occhi di una nuova elaborazione fondata esclusivamente su delle basi scientifiche. Infatti come vedremo il Patte gravitava intorno al circolo culturale dell'Encyclopedie, altri come il Niccolini prendono spunto da quest'ultimo cercando di mettere in pratica le tesi proposte; altri invece proseguiranno l'arte della costruzione teatrale, seguendo una concezione artigianale, tramandata di padre in figlio.

1.10.1 La famiglia dei Galli-Bibiena

Molteplici le realizzazioni teatrali di questa famiglia originaria di Bibbiena in provincia di Arezzo; Ferdinando (1657-1734), Francesco (1659-1739), Giovanni (1699-1760), e Antonio (1700-1774) furono senz'altro fra i più importanti, e realizzarono altrettante importanti opere teatrali anche oltre il confine nazionale. Il Teatro Filarmonico a Verona, ultimato nel 1729 e subendo una ricostruzione non troppo fedele al progetto originario, fatta dopo una parziale distruzione nella seconda guerra, trae la sua originalità soprattutto nella realizzazione dei palchetti digradanti verso la scena, e non orizzontali come la maggioranza dei teatri dell'epoca; il tipo di pianta è a campana e rappresenta un esempio ricorrente nelle progettazioni dei Bibiena. Il Teatro Scientifico di Mantova, progettato nel 1767 da Antonio, rappresenta un modello piuttosto particolare di edificio, perché pur non rispettando i canoni estetico-funzionali dell'epoca, si pone fra i migliori teatri aventi la pianta a campana. Le sue particolarità vanno ricondotte ai committenti che volendo un teatro polivalente e flessibile per gli usi sia di concerti che di feste, balli e riunioni sociali (Accademia di Scienze e Belle

Lettere), vollero sacrificare la scena in favore della sala, evitando così la parte prospettico-scenotecnica; va detto però che l'area in cui sorge tale teatro era già abbastanza piccola e forse per questo godeva di ottimi crediti da un punto di vista acustico¹⁴. L'ultimo edificio, ma non per ordine di importanza, è il Teatro Comunale di Bologna realizzato da Antonio nel 1763 e attraverso il quale conseguirono una notevole fama in tutta la penisola, anche se va detto che il Milizia giudicò l'opera molto negativamente e ciò probabilmente per l'uso della pianta a campana, della quale i Bibiena erano fra i pochi ad attuarla. Il teatro era a quattro ordini di palchi e poteva contenere oltre le mille persone; venne modificato varie volte durante l'ottocento e l'impianto originale venne distrutto da un incendio nel 1931, dopo di che seguì un restauro avvenuto nel 1935.

1.10.2 Il Carini-Motta

"Come, e da chi fosse trovato di fare li teatri non è mia intenzione di difondermi, perche' chiaramente vien descritto da Vitruvio nel libro 5, cap. 3 e da Leon Battista Alberti, lib. 8, cap. 7". Ecco come inizia il *Trattato sopra la struttura de' theatri e scene* di Fabrizio Carini-Motta [5], il primo saggio ad essere pubblicato in Italia nel 1676. In assoluta umiltà, l'autore dichiara che già gli antichi hanno tracciato la strada sulla costruzione dei teatri e perciò nulla di più si può fare che osservare i loro scritti e metterli in pratica. Molto interessante da parte del Carini è l'interpretazione data di alcuni passi di Vitruvio, infatti l'autore traduce alcuni principi dando una nuova visione degli antichi testi. Se ad esempio prendiamo un passo dalla traduzione del libro V° di Vitruvio [8] a pag. 243, dove parlando dell'uso dei vasi nei teatri, così recita: *"Et così*

¹⁴ Per l'inaugurazione di questo teatro, venne organizzato un concerto suonato personalmente da Mozart,

da simiglianti investigazioni con Mathematici discorsi si fanno i vasi di rame secondo la grandezza del Theatro, e quelli si fanno in modo, che quando sono toccati possono fra se rendere la diatessaron, e la diapente in ordine alla disdiapason". Lasciando da parte il concetto dell'uso dei vasi risonanti di Vitruvio¹⁵ (argomento trattato e spiegato da molti autori, soprattutto contemporanei), e invece concentrandosi sul tema della diatessaron e la diapente, si possono scoprire dei concetti molto importanti. Innanzitutto dobbiamo spiegare il significato di questi termini; il primo si riferisce a cio' che in musica viene chiamato rapporto di 4°, il secondo si riferisce al rapporto di 5°. A pagina 11 del trattato del Carini, vi e' una interessante digressione circa la proporzionalita' da tenere fra la larghezza e l'altezza teatrali; l'autore pone un limite oltre il quale sconsiglia di fare l'altezza. Tale limite viene fissato a 3/2 (rapporto di 5°) da utilizzare come rapporto fra larghezza e altezza; come tolleranza di detto rapporto utilizza un altro rapporto che e' quello dei 5/4 (rapporto di 3°).

In pratica fissa un minimo (3/2) ed un massimo (5/4) che rientrano nei rapporti "epimeri" o "superparticularis" [9] basati sulla formula¹⁶:

$$\frac{n+1}{n} \quad (1.3)$$

seguendo infatti quest'ultima si giunge inevitabilmente al rapporto di mezzo fra i due descritti, ovvero il 4/3 (rapporto di 4°); quindi anche il Carini-Motta sostiene la stessa teoria dei rapporti perfetti basati sui concetti dell'acustica musicale e di conseguenza

il quale ebbe modo di esprimere dei giudizi positivi sull'acustica.

¹⁵ Molti autori fanno risalire l'uso e quindi la scoperta dei vasi risonanti a Vitruvio, ma in un documento trovato nella Biblioteca Nazionale, e precisamente "Problemi di fonazione acustica" di Aristotele, ho trovato un accostamento molto preciso circa questi elementi; Aristotele nel Problema n°8 si chiede: "perche' son piu' risonanti quelle case sotto il cui pavimento e' stata messa una giara vuota?"

¹⁶ "Symmetrie e Architetture".

come vedremo in seguito sulla Trasformata di Fourier¹⁷: *"L'altezza del teatro, cioe' della soffitta, non si fara' piu' alta dal piano della piazza della scena, di quanto sia la larghezza del teatro, ne' si fara' meno alta delli due terzi di detta larghezza. Bonissima proporzione sara' farla alta del piano per li quattro quinti della larghezza del teatro"*.

1.10.3 Il razionalismo teatrale del Milizia.

Da un punto di vista architettonico il Milizia potrebbe essere definito come un proto-razionalista dato che in alcuni dei suoi progetti teatrali lasciava permeare all'esterno, la struttura interna. Il rivestimento strutturale esterno in pratica, era la continuazione di quello interno cosi' come voleva la pratica razionalista qualche secolo dopo. Al di la' di questa premessa, seppure importante, l'autore e' stato un vero rivoluzionario in quanto pur avendo vissuto nella seconda meta' del '700, predicava senza riserve un ritorno alla costruzione teatrale vitruviana, dato che, come tanti altri hanno sostenuto, era l'unica a rispondere correttamente alle esigenze dell'acustica. Il problema comunque, al di la' del presunto passatismo del Milizia, risiedeva nella scelta o meno della sala a palchi; l'autore in questione era convinto che questi erano solamente degli elementi di disturbo per il teatro mentre l'altra scuola di pensiero (capeggiata essenzialmente dagli impresari teatrali), sosteneva che i palchi erano necessari, se non altro da un punto di vista economico. Purtroppo, e' quest'ultima idea che prende piede perche' erano gli stessi avventori che richiedevano tali spazi; ricordo che durante quegli anni il teatro era visto come un momento di aggregazione e i palchetti non erano altro che luoghi in cui i proprietari o affittuari, gestivano in completo isolamento dalla rappresentazione sul palcoscenico. Passando adesso al trattato scritto dal Milizia, si sa che la prima edizione

¹⁷ Si veda Par. 4.3.2 per un approfondimento.

del libro risale al 25 dicembre 1771 in Roma, e dopo poche settimane non era più vendibile nessun esemplare; non già perché tutti si fossero venduti, anzi non ne vendette alcuno, ma perché furono tutti ritirati per ordine del Maestro del Sacro Palazzo Pontificio¹⁸, con condizione di non fargli vedere più la luce. Tale censura era forse dovuta alle forti critiche che il Milizia aveva fatto alla concezione teatrale del periodo e soprattutto dell'immediato passato, dato che la tendenza corrente era quella di camuffare la reale funzione del teatro riguardante l'acustica e l'ottica prospettica, in favore di esigenze legate ad una funzione meramente aggregativa, sentita molto soprattutto nei tempi a venire.

Quindi, il Milizia nella progettazione del Teatro poi costruito da Vincenzo Ferrarese, propone un ritorno alla concezione vitruviana del teatro respingendo in pieno lo schema teatrale quale si era venuto elaborando lungo due secoli di tentativi e di esperienze, dopo le formulazioni e le realizzazioni del Serlio e del Palladio. Infatti nel teatro del Ferrarese, mancano completamente i palchetti in favore di gradonate continue, correnti per due file al livello immediatamente superiore alla platea e per successive altre due file divise da una fascia marcapiano sostenuta da un colonnato composito; a coronamento di questi ultimi due livelli vi era il corrispettivo del loggione.

¹⁸ F. Milizia, *Del Teatro*, Venezia, 1773, II Edizione. La prima edizione, stampata a Roma presso Arcangelo Casaletti; nelle lettere del Milizia a Tommaso Temanza, pubblicate per la prima volta a Venezia nel 1823 (*Opere complete di Francesco Milizia*, Bologna, Cardinali e Frulli, 1826-28) si possono leggere le vicende della prima stampa, del suo ritiro ad opera della censura, e della seconda edizione affidata allo stampatore veneziano Pasquali e seguita dalle cure dello stesso Temanza. Nella lettera del 18 gennaio 1772 il Milizia sfoga con aspre parole la sua indignazione per il gesto della censura dovuto ad alcune sue presunte intemperanze, dichiarando che non avrebbe stampato più nulla a Roma.

1.10.4 Luigi Poletti e Ireneo Aleandri: lezioni pratiche per la costruzione di un teatro attraverso un carteggio datato 1823.

La costruzione del Teatro Nuovo a Spoleto (1846), venne affidata ad Ireneo Aleandri e seppur non nuovo alla progettazione di tali architetture, cerco' di rimettersi ai consigli dell'amico Poletti che, da quello che si puo' leggere, aveva delle nozioni in ambito teatrale piu' estese del primo, e dato che non vivevano nella stessa citta', hanno dato vita ad uno scambio epistolare di tipo tecnico [10], degno secondo me di essere riportato, anche se naturalmente attraverso una o piu' epistole¹⁹.

Vorrei riproporre senza commentare, parte di una lettera che il Poletti manda in risposta al collega Aleandri: "...lascia le difficili investigazioni per quelle sale delle grandi citta', nelle quali gli impresarj per amor di guadagno a danno pubblico studiano di accatastare le genti. Ne' piccoli teatri quando siasi mirato alla bellezza, e alla comodita' del vedere, quella del sentire non puo' mancare. Nondimanco eccoti alcune regole generali che ho desunte dallo studio di questa difficilissima parte, e che a mio credere ti varranno forse meglio della copia servile di una curva dei moderni teatri.

1.La miglior curva da darsi ai teatri vuolsi considerare sotto due grandi riguardi, alla comodita' e alla bellezza. Non v'ha dubbio che per la bellezza tutte le altre curve la cedono al circolo.

2.La comodita' nelle curve dei teatri vuol esser presa in due sensi l'uno al vedere, l'altra all'udire.....

5.Veniamo alla comodita' dell'udire. Anche su questo particolare molto si e' scritto, ed a mio credere con poco buon senso, ed utilita' della questione. Lascio di dire dei passati

¹⁹ Tale carteggio e' presente nella Biblioteca Comunale di Macerata, ms. 1052/1, b. LVII, *Lettere a Ireneo Aleandri*, n.554.

scrittori, ma non ti tacero' un certo Nicolini che volendo scrivere sulla sonorita' dei teatri erro' persino nel titolo dell'opuscolo dove ponesi dagli scrittori il maggior studio. Imperocche' lo chiamo' *Della risuonanza nei teatri* che vuol dire *sull'eco dei teatri*. Si guardi ognuno dal credere che egli si proponga tanto inutile ricerca per i teatri, poiche' lo scritto ben d'altro anzi dell'opposto ragiona. Dico di lui perche' questi nostri architetti pare che abbiano ciecamente prestata fede alle sue parole. Egli mena gran rumore, e chiama a tribunale tutti i fisici per la gran scoperta certamente nuova che la sonorita' nei teatri sta nella ventilazione che procurar si deve dalla bocca d'opera alla platea.....Taccio che per siffatta ventilazione il teatro Valle ammalò di raffreddori fortissimi i cantanti e gli spettatori per cui dopo le prime sere il teatro fu sempre vuoto. Per carita' adunque che non ti venga in capo di dare al tuo teatro una simile proprieta'.

6. Pareva che il dato piu' sicuro dovesse desumersi dalla distanza a cui si progaga il suono di una voce ordinaria. Eppur sembra a tutti sfuggita questa considerazione. Ora dall'esperienza si ha percettibile fino a m. 21,70. Tutte le persone che saranno dentro questo limite udiranno distintamente. Da cio' deriva che relativamente alla comodita' del suono nei teatri che hanno l'asse minore di m. 21,70 e' indifferente la figura. Percio' in questi casi basta attendere alla forma per la bellezza, e per la comodita' del vedere, e nel tuo puoi ormai sapere cio' che ti convenga.

1.11 Note storiche sul Teatro Nuovo a Spoleto

La sua costruzione risale al 1853 quando venne affidato l'incarico ad un architetto gia' noto per la sua attivita' di progettazione teatrale, chiamato Ireneo Aleandri, autore dello Sferisterio di Macerata, del Teatro di Ascoli nonche' del Teatro di San Severino nella Regione Marche; ma non va dimenticata altresì, ripeto, la stretta collaborazione, documentata da un carteggio [10], che c'è stata con l'architetto-ingegnere, Luigi

Poletti. Secondo i documenti presenti nel carteggio, parrebbe che l'Aleandri si fosse rivolto proprio al Poletti con richieste di consigli circa le problematiche progettuali riguardanti in particolar modo la parte acustica; non solo ma ci fu anche un altro architetto, meno noto, dal quale l'Aleandri attinse: Fabrizio Carini-Motta architetto del Doge di Mantova che scrisse uno dei primi trattati interamente dedicati al Teatro, ovvero il *“Trattato sopra la Struttura de' Teatri”* [5], molto poco noto per dei vizi editoriali del tempo, ma valido in quanto rappresenta una sintesi senza pretese di alcuni dei suoi predecessori che si occuparono di tali unita' tipologiche, come Vitruvio e l'Alberti.



Fig.1.12. Vista d'insieme del Teatro Nuovo nella penultima fase di restauro; la sala, i quattro ordini di palchi e il loggione, ripresi dal palcoscenico.

L'idea del teatro risale a sette anni prima (1846) quando un gruppo di cittadini locali decisero di costituire una società con l'intento di finanziare quasi interamente l'edificio. Le opere murarie principali terminarono solo dopo quattro anni (1857)

perche' subentrarono sia dei problemi finanziari sia delle discordie all'interno della societa' finanziaria, in quanto alcuni non erano d'accordo su alcuni punti del progetto come per esempio il tipo di copertura della sala principale, oppure la distribuzione dei palchetti.

Il teatro viene inaugurato nel 1864 attraversando varie vicissitudini; il tipo di pianta della sala d'ascolto e' a forma di ferro di cavallo, riprendendo lo stile del teatro d'opera italiano di quei tempi, direttamente sulla pianta si affacciano i prospetti dei quattro ordini di palchi. L'ultimo ordine viene coronato da una loggia attraverso la quale si raccorda il soffitto attraverso un attacco detto a "ombrello" seguendo cosi' lo stile cosiddetto vanvitelliano. Il dimensionamento dei palchetti e' affidato ad una struttura portante primaria in legno costituita da travi e pilastri, che partendo dalla base dei palchi di platea, giunge fino al solaio, ancorate a tali pilastri, partono delle centine in legno curvato, costituite da un doppio tavolato e formanti l'ossatura del Plafond (Fig.1.13) che a loro volta vanno ad intersecare un anello circolare anch'esso in legno, che le collega tutte concentricamente [10]; tale anello posto nel centro della sala di ascolto, e' perfettamente parallelo al terreno (ma non al pavimento) e rappresenta non piu' del venti per cento della superficie del soffitto rimanente che segue un particolare raggio di curvatura. La sala, gli ordini dei palchi e la loggia possono contenere fino ad un massimo di ottocento persone.

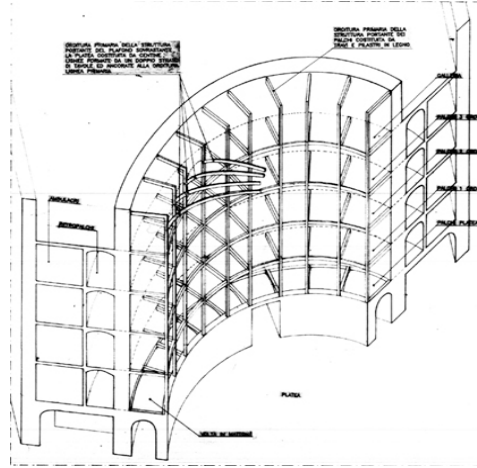


Fig.1.13. Assonometria strutturale dello scheletro ligneo dei palchi e struttura del plafond.

Vari sono i restauri e i cambiamenti che il teatro subisce fin dalla sua nascita, il più importante rimane senza dubbio la riduzione fatta nel 1914, del palcoscenico per favorire l'alloggiamento dell'orchestra; tale modifica però ha probabilmente danneggiato il delicato bilanciamento acustico fra i cantanti su palcoscenico e l'orchestra nella buca. Questa ipotesi si basa sul fatto che essendo stato eliminato il proscenio, i cantanti sono stati relegati a cantare in una posizione più arretrata, non potendo così sfruttare la spinta acustica delle riflessioni provenienti dall'arco scenico, essendo questo direttamente sopra il golfo mistico e vanificando così la funzionalità dell'arco e oltretutto amplificando acusticamente la musica proveniente dall'orchestra.

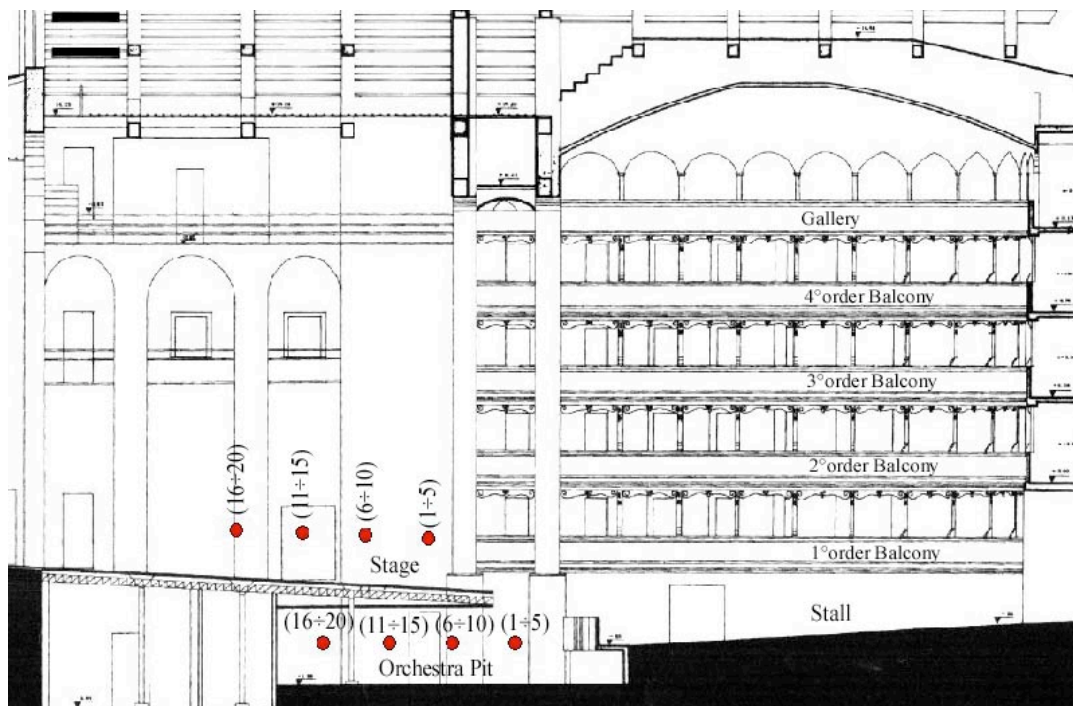


Fig.1.14. Sezione longitudinale del Teatro Nuovo; da notare il taglio del palcoscenico (prima prolungato fino alla fine dell'arco scenico) e il posizionamento delle sorgenti (cerchi rossi) che sono state usate per la campagna delle misurazioni effettuate ed analizzate nei capitoli successivi di questa tesi.

Oltre a queste varianti sono stati operati altri cambiamenti, soprattutto nel 1933 quando vennero sostituiti quasi tutti i pavimenti originali per adeguare l'opera alla normativa di sicurezza e oltretutto venne smantellato il palco nella sua struttura lignea e sostituito con un'altra interamente in acciaio. Nel 1950 iniziano i lavori alla fossa degli orchestrali aumentandone la capienza fino ad arrivare all'anno 1989, in cui vengono approvati dalla Soprintendenza i lavori di restauro.

2.0 Misurazioni nel Teatro Nuovo di Spoleto

2.1 Introduzione

Come affermato nel paragrafo (1.12), l'idea di questo teatro e' stata formulata intorno alla meta' dell'800 da un gruppo di committenti privati locali, amanti del teatro. La pianta a ferro di cavallo che fu scelta dal progettista Ireneo Aleandri fa parte di una evoluzione acustico-architettonica che si e' sviluppata intorno ai trattatisti teatrali, iniziata due secoli prima dal Carini di Mantova e poi proseguita dal Patte, dal Milizia e altri ancora. La tipicita' di questo teatro, confermata sia dal tipo di pianta ma anche dall'inserimento della fossa d'orchestra e dai quattro ordini di palchi piu' il loggione superiore, si discosta quando vengono esaminate le proporzioni geometriche dei volumi nonche' il tipo di soffitto.



Fig.2.1. Immagine dell'attuale arco scenico

L'eccessiva altezza del corpo di fabbrica, in rapporto con la larghezza, fa presagire non tanto un errore progettuale da parte dell'architetto ma, come spesso avveniva in questo

tipo di progetti, ad una imposizione da parte dei committenti che con l'intento di aumentare il numero dei posti in vista di un maggiore ritorno economico, hanno inserito il loggione superiore; infatti tale inserimento ha provocato l'aumento dell'altezza della chiave della volta lasciando invariata l'imposta, aumentandone quindi la curvatura (Fig. 1.14), causando così una superficie troppo concava¹, tanto da 'spezzare' i raggi riflessi invertendo il tipo di direzionalità fra suono diretto e suono riflesso, come si dimostrerà nell'Appendice III attraverso l'analisi delle risposte binaurali con particolari tipi di diagrammi. Inoltre, secondo questo studio, un restauro eseguito nel secolo precedente (1914), ha ridotto lo spazio dello stage eliminando così il proscenio, ed escludendo da una parte, la possibilità di rinforzo della voce attraverso le riflessioni provenienti dall'arco scenico (Fig.2.1), e dall'altra provocando un campo di riflessioni atipico per la parte scoperta della buca d'orchestra a discapito delle file interne (sotto il palcoscenico). La buca d'orchestra per di più, presenta una profondità eccessiva sfavorendo in questo modo il rinforzo proveniente dalla parete di fondo.

2.2 Breve relazione architettonica del teatro

2.2.1 Dimensioni generali della sala (zona palco esclusa)

- altezza = 16m circa (tale altezza è stata considerata dal punto più alto del soffitto fino al pavimento);
- lunghezza = 14,5 m (considerando dall'inizio dell'arco scenico fino al fondo sala);
- larghezza = 15,15 m (considerando il punto più largo del ferro di cavallo).

¹ Da un punto di vista geometrico e quindi per ciò che riguarda il percorso dei raggi sonori, la curvatura del soffitto è inversamente proporzionale all'altezza di quest'ultimo dal pavimento, conseguentemente più è alto il soffitto e minore dovrebbe essere il raggio di curvatura della concavità della volta.

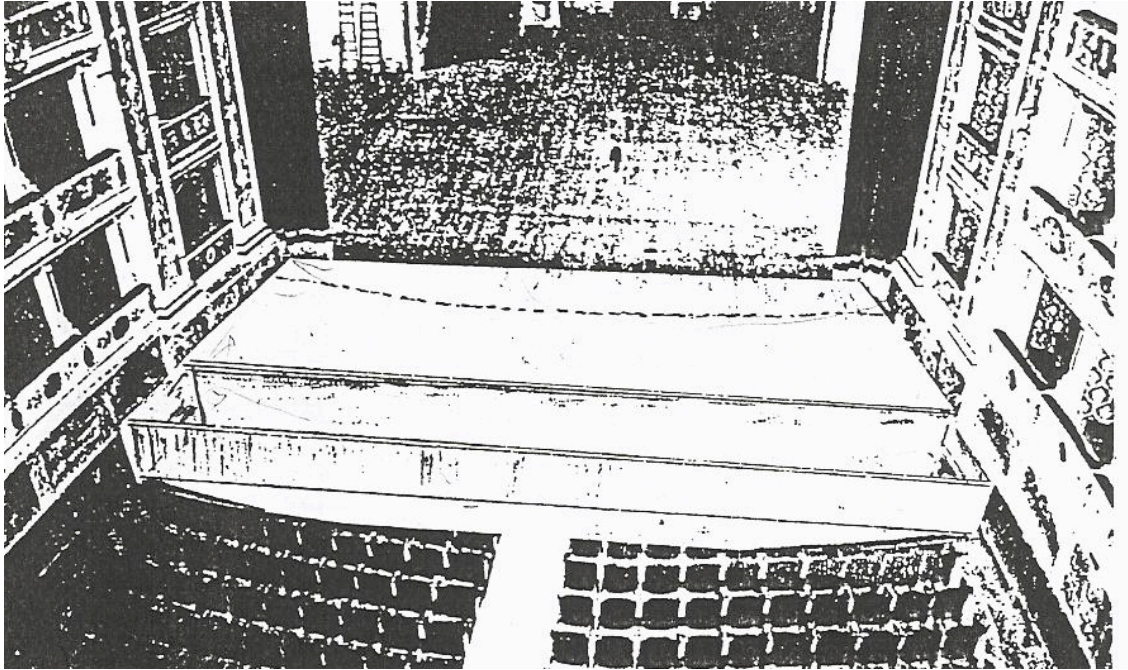


Fig.2.2. Il proscenio come si presentava prima della fase di restauro del 1914; la linea tratteggiata che corre nell'intradosso dell'arco, rappresenta lo stato attuale del palcoscenico del teatro.

2.2.2 Dimensioni e caratteristiche del soffitto:

- raggio della curvatura ≈ 24 m;
- distanza dalla sorgente (fossa degli orchestrali) $\approx 18,5$ m (calcolata dal punto di mezzo situato nella linea di mezzeria della parte più alta della curvatura del soffitto fino a quota 1 m dal pavimento della fossa);
- altezza dell'arco scenico = 14 m (nel punto di colmo).

2.2.3 Dimensioni della buca d'orchestra e palco:

- larghezza della fossa = 13,3m in adiacenza dell'arco scenico (punto di maggiore ampiezza); 11,5m nella parte finale della fossa;
- lunghezza della fossa d'orch. = 10m circa, nel punto più ampio;
- altezza della fossa d'orch.= 2,0 m;
- profondità della fossa (rispetto al pavimento della platea) = 1,1 m;
- altezza del proscenio (rispetto al pavimento della platea) = 1,6 m;
- profondità del palco = 14 m;

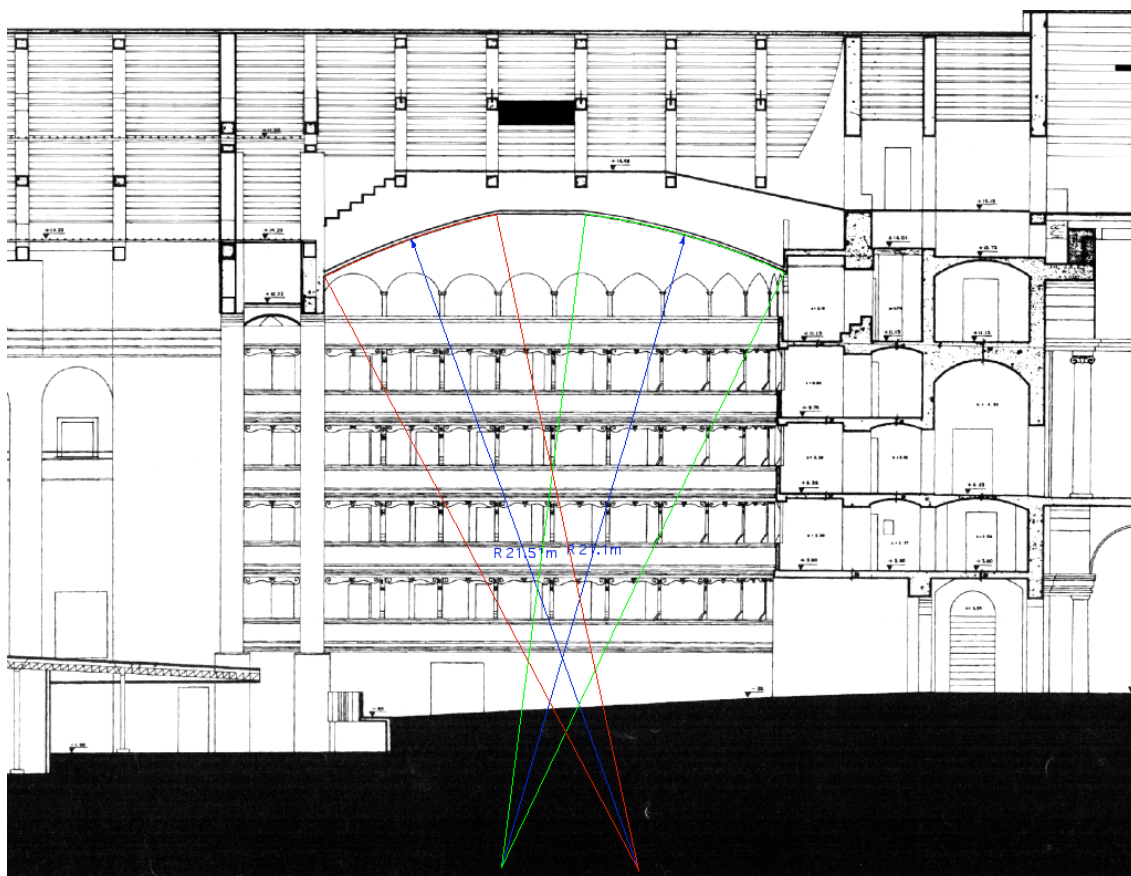


Fig. 2.3. Rappresentazione dei raggi di curvatura del soffitto, misurati secondo l'orientamento longitudinale della sezione.

2.2.4 Caratteristiche generali dimensionali della sezione dei palchetti:

- profondità = 2 m
- altezza = 2,1 m

2.3 Metodologia delle misurazioni

Come in quasi tutti i teatri all'italiana, ci sono due aree destinate alle sorgenti sonore, la buca d'orchestra per gli strumentisti e il palcoscenico per i cantanti; perciò per questo studio si è proceduto analizzando le posizioni delle sorgenti in base ai ricevitori posti in platea e nei palchi superiori. Sono state poste 20 sorgenti nella buca orchestrale e 20 sorgenti nel palcoscenico, posizionate ad una distanza di 2m l'una dall'altra formando

quindi 4 file x 5 colonne come si puo' notare in Fig.2.4, sia per quanto riguarda il palcoscenico sia per quanto riguarda la buca d'orchestra.

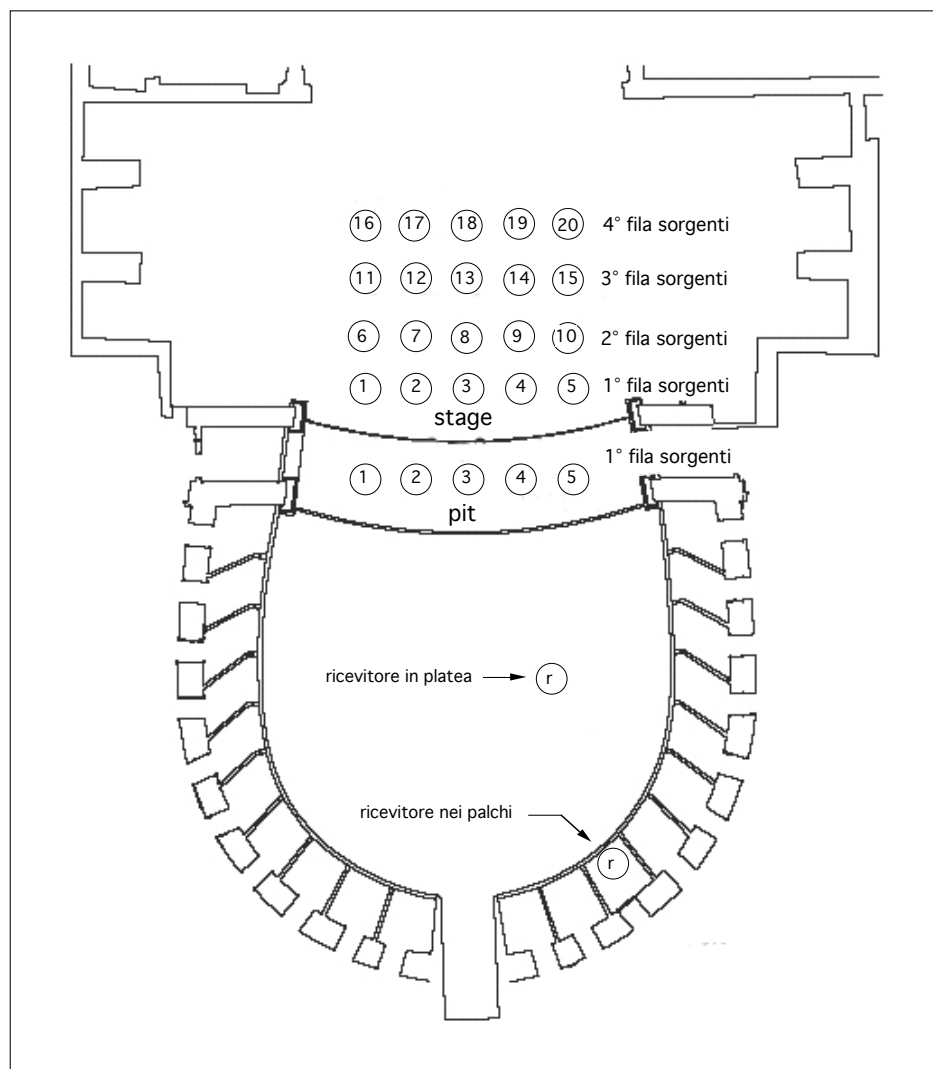


Fig.2.4. Pianta del Teatro Nuovo con il posizionamento delle sorgenti (numeri cerchiati), relative a 20 posizioni nella buca d'orchestra e 20 posizioni nel palcoscenico; la lettera 'r' cerchiata rappresenta la posizione degli ascoltatori posti in platea e nei palchi.

Le risposte binaurali riprese dai ricevitori posti in platea e nei palchi, sono relative per ogni posizione delle 40 sorgenti. Recenti studi sulla qualita' acustica dei teatri d'opera si sono basati quasi sempre da un punto di vista dei riceventi [15-17]; nel senso che venivano misurate le sorgenti in un'unica posizione favorendo invece la mobilita' dei ricevitori, come riportato nella normativa ISO 3382 [18]; cio' viene eseguito per

esaminare la differente risposta all'interno della sala, come e' gia' stato proposto di recente [19]. Durante una esecuzione lirica, i cantanti tendono a muoversi lungo il palcoscenico ed inoltre per una orchestra diventa importante conoscere il tipo di risposta per ogni punto della buca d'orchestra e percio' in questo studio i parametri come la G -Strength e l' EDT mostrano differenti comportamenti evidenziabili attraverso le differenti risposte che giungono ai ricevitori. Questo studio intende percio' essere un contributo originale per il disegno acustico delle aree destinate alle sorgenti sonore (che come e' stato detto prima sono rappresentate dal palcoscenico e dalla buca d'orchestra), investigando l'influenza delle posizioni delle sorgenti nelle due zone suddette, nonche' la qualita' acustica della zona riservata all'ascolto.

2.4 Misurazioni

Le risposte all'impulso binaurali sono state ottenute attraverso la generazione di una sweepata sinusoidale logaritmica di un calcolatore [20], come si puo' notare nella formula (2.1). Questi segnali vengono emessi da un altoparlante omni-direzionale, il cosiddetto dodecaedro, posto in ogni posizione relativamente alla buca d'orchestra e al palcoscenico; le risposte vengono riprese da una testa artificiale (*dummy head*) con due microfoni posti uno nell'orecchio sinistro e uno nell'orecchio destro.

$$x(t) = \text{sen} \left[\frac{\omega_1 t}{\log\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} \left(e^{\frac{1}{T} \log\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} - 1 \right) \right] \quad (2.1)$$

Dove ω_1 rappresenta la frequenza di partenza in Hz,, ω_2 rappresenta la frequenza con cui finisce la sweepata, sempre in Hz, T rappresenta la durata totale della sweepata.

Per queste misurazioni la frequenza di partenza (ω_1) e' 40 Hz, quella di fine (ω_2) e' pari a 20 kHz, e la durata temporale totale (T) corrisponde a 18 s.

Il segnale generato e le successive risposte sono state archiviate all'interno dell'elaboratore fornito di scheda audio (modello Layla24) con convertitori AD/DA aventi una risoluzione di 24 bit e ad una frequenza di campionamento di 44.1 kHz. Come generalmente viene fatto per questo tipo di misure, le risposte sono state tutte convolute con un filtro inverso, composto dal segnale sweepato letto all'indietro in termini temporali, cosi' da ottenere le risposte all'impulso.

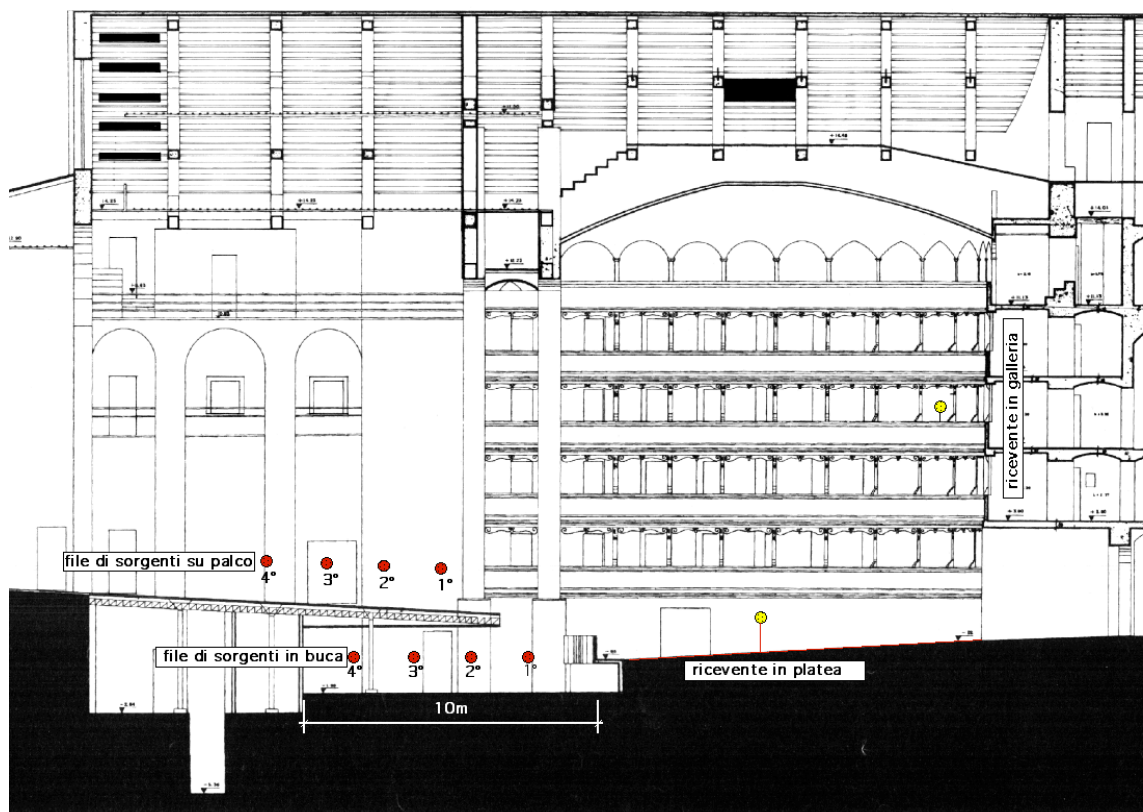


Fig.2.5. Posizionamento delle sorgenti (cerchi rossi) e dei riceventi (cerchi gialli) viste in sezione.

Comparando con il segnale *MLS* (*Maximum Length Signal*), la sweepata seno, qui usata, risente meno della variazione temporale del sistema e soprattutto sulla discrepanza fra il campionamento del segnale generato e la sua relativa registrazione. La stessa sorgente sonora e' stata posta in ognuna delle 20 posizioni del palcoscenico, cosi' come per le 20 posizioni della buca d'orchestra, mentre il ricevitore e' stato

posizionato in platea e nei palchi (Figg.2.4-5); per cio' che concerne la posizione in platea, la scelta e' stata fatta in base a delle precedenti misurazioni fatte nel teatro (posizione fissa della sorgente e posizione mobile del ricevente). Il piano di calpestio del palcoscenico cosi' come quello della buca d'orchestra sono stati segnati in pianta da una griglia di $2m \times 2m$ e la sorgente sonora e' stata posta in ognuna di queste posizioni, per un totale di 5 punti (nella direzione della larghezza) x 4 posizioni (nella direzione della lunghezza).



Fig.2.6. Posizionamento della testa artificiale nei palchi del teatro. Il cerchio tratteggiato indica il posizionamento degli accelerometri per la misura delle vibrazioni.

L'altezza della sorgente sonora, e' di 1,4m nel palcoscenico e di 1,2m nella buca d'orchestra; il ricevitore in platea e' stato posto circa a meta' in senso longitudinale e nella parte destra della platea da un punto di vista trasversale (Fig. 2.4-5); il ricevitore

posto nei palchi e' stato posto all'altezza del 3° ordine di palchi (Fig.2.4). Per quanto riguarda la testa artificiale, o il ricevente, questa e' stata posta vicino all'apertura del palchetto (Fig.2.6), ad una altezza pari a 1,1m simulando il posizionamento dell'ascoltatore seduto. La direzione assiale della dummy head e' stata presa in base al centro del palcoscenico durante le misurazioni, e quest'ultimo era privo di scene, cosi' come per la buca d'orchestra che era priva di poltroncine o strumenti musicali.

2.5 Analisi

Le 80 risposte all'impulso ottenute (20+20 x 2 ricevitori), sono state analizzate usando come software CoolEditPro 2.0 [20]. I parametri acustici usati in questo studio sono G -strength (intensita'), BQI (Binaural Quality Index o indice di qualita' binaurale), Δt_l o $ITDG$ (Initial Time Delay Gap, tempo di ritardo della prima riflessione), EDT (Early Decay Time, tempo di primo decadimento) e T_{sub} (subsequent reverberation time, tempo di riverbero subseguente).

2.5.1 Indice di Intensita' G

$$G = 10 \log \frac{\int_0^T p^2(t) dt}{4\pi s^2 \int_0^{\Delta t} p^2(s, t) dt} \text{ dB} \quad (2.2)$$

dove $p(t)$ e' la pressione sonora nel punto di osservazione derivante da un impulso emesso da una sorgente omnidirezionale; $p(s, t)$ e' la pressione sonora derivante dallo stesso impulso ma registrato in un punto fisso dello spazio, posto a distanza s dalla sorgente (generalmente 10m, ma in alcuni casi anche 5m) ; Δt rappresenta la durata temporale dell'impulso diretto.

2.5.2 *BQI* - Indice di qualita' binaurale

Questo parametro e' basato sulla correlazione incrociata interaurale, meglio rappresentata dalla *IACC*, che descrive la correlazione della risposta all'impulso che giunge al canale sinistro e al canale destro da un punto di vista temporale; viene cosi' definita:

$$IACC = \frac{\left| \int_0^T p_d(t) p_s(t + \tau) dt \right|}{\sqrt{\int_0^T p_d^2(t) dt \int_0^T p_s^2(t) dt}} \Big|_{\tau \leq 1ms} \quad (2.3)$$

dove $p_d(t)$ e $p_s(t)$ rappresentano le pressioni sonore che giungono al canale destro e sinistro rispettivamente, in funzione del tempo; esprime la sensazione spaziale prodotta dalla diffusione del suono. Inoltre la $IACC_{E3}$ rappresenta un tipo di funzione come la (2.3) ma con il parametro temporale definito (0-80ms), ed una regione di frequenze rappresentata dalla media di 3 bande di frequenze (0,5 kHz; 1 kHz; 2 kHz) essendo l'impulso separato in 3 bande d'ottava. Quindi il parametro *BQI* viene cosi' rappresentato:

$$BQI = 1 - IACC_{E3} \quad (2.4)$$

con valori molto alti di *BQI* l'ascoltatore non riesce ad identificare la direzione del suono sorgente [21].

2.5.3 Δt_I (tempo di ritardo della prima riflessione) o *ITDG*

Questo parametro rappresenta il ritardo temporale fra l'arrivo del suono diretto e la prima riflessione di massima ampiezza; e' molto importante perche' permette di studiare il percorso dei raggi riflessi, e quindi di ottimizzare il posizionamento delle pareti

riflettenti in rapporto alla sorgente sonora diretta. Attraverso tale parametro si possono evincere problematiche quali l'interferenza e disturbi da eco.

2.5.4 EDT o tempo di primo decadimento

L'*EDT* che rappresenta il tempo di decadimento dei primi 10 dB, e quindi l'inclinazione iniziale della curva di smorzamento dell'impulso, dimostra quanto questo sia correlato alla percezione del riverbero; cio' e' stato confermato da Gade in numerose misurazioni di risposte all'impulso binaurali eseguite in molte sale [22] ma non solo, proprio in quanto fortemente influenzabile dalle prime riflessioni, l'*EDT*, e' molto sensibile ai dettagli della geometria dello spazio; l'inclinazione iniziale della curva e' largamente correlata alla media delle costanti di smorzamento dei modi propri dell'ambiente eccitati dall'impulso [23].

Altre caratteristiche dell'*EDT*: tale parametro diminuisce con l'allontanarsi del microfono dalla sorgente e diventa un parametro particolarmente significativo per confrontare diversi punti di una stessa sala. Pur non esistendo un campo di riferimento dei valori, Jordan sostiene che una grande variazione dell'*EDT* tra le basse e le alte frequenze non favorisce un buon ascolto. Il tempo di primo decadimento si dimostra un parametro particolarmente sensibile alla localizzazione del microfono (room del ricevitore) in relazione alla sua distanza dalla sorgente e diventa significativo per confrontare i diversi punti di una stessa sala.

2.5.5 T_{sub} o Tempo di riverberazione subseguente

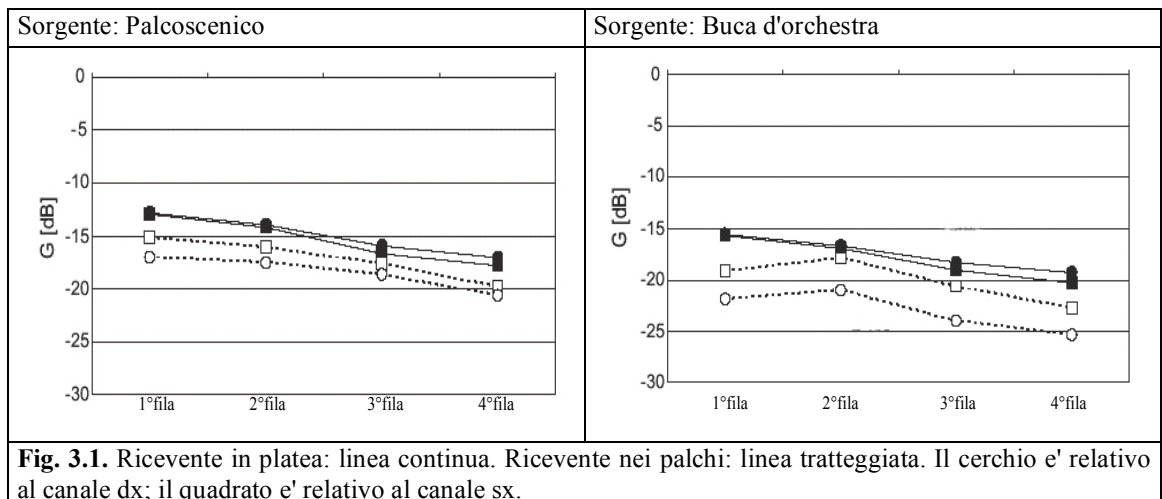
Rappresenta il tempo di riverbero calcolato per mezzo dell'attenuazione della prima massima riflessione del Δt_1 .

3.0 Discussione dei risultati relativi alle misurazioni

3.1 Parametri acustici riferiti per file di sorgenti

In questo paragrafo, verranno mostrati dei grafici relativi ai parametri acustici esposti al capitolo precedente, i valori di ogni simbolo grafico sono riferiti alla media di 5 sorgenti per ogni fila, come verra' indicato per ogni figura.

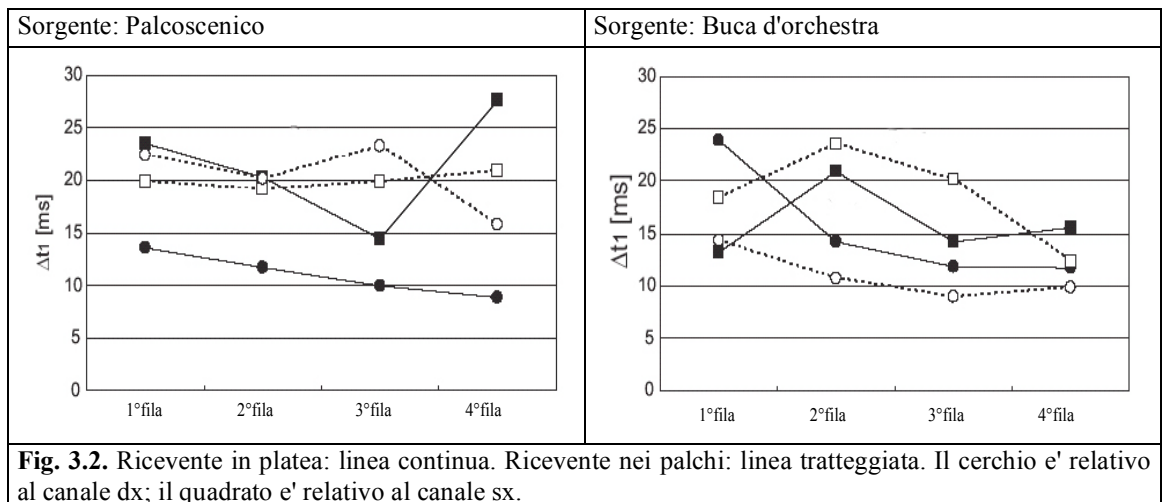
I valori di G risultano piu' grandi nel caso in cui la sorgente sia posta nel palcoscenico invece che nella buca d'orchestra, cio' avviene perche' il suono diretto emesso dalla sorgente su palco puo' arrivare piu' forte nei confronti dei riceventi rispetto a quello proveniente dal sotto palco, ovvero dalla buca (Fig.3.1.).



I percorsi sonori provenienti da quest'ultima, non potendo essere pienamente diffusi verso la sala a causa della balaustra di separazione fra la platea e la buca d'orchestra (vedi Fig.2.5. e precisamente fra la fine della platea e l'inizio della base dell'arco scenico), assumono una particolare direttivita' che risulta essere differente rispetto ai percorsi sonori provenienti dal palcoscenico. Come si puo' notare dai grafici, il valore di G diminuisce in modo indirettamente proporzionale rispetto all'allontanamento della sorgente; solamente nel caso della sorgente in buca e il ricevitore nei palchi, e piu'

precisamente per la 2° fila, cio' non avviene. Probabilmente la causa di tale andamento e' dovuta al fatto che il ricevitore nei palchi puo' registrare una pressione del suono diretto, maggiore perche' subisce meno l'influenza della balaustra di separazione, che invece colpisce la 1° fila come si puo' notare nella Fig.2.5.

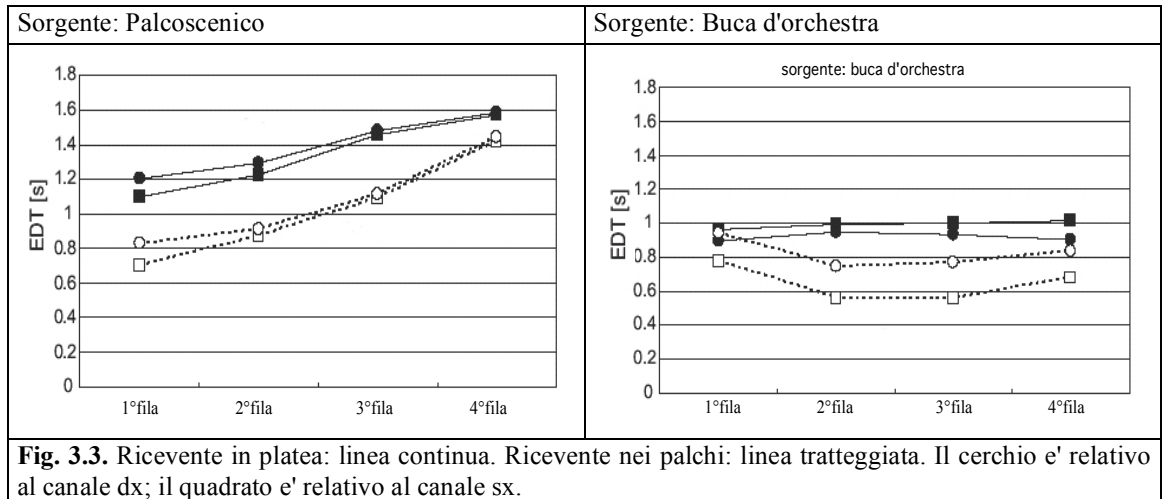
Per quanto riguarda invece il parametro Δt_1 (ITDG), quando la sorgente e' nel palcoscenico la prima riflessione in ampiezza arriva dalla copertura, ma cio' non si verifica quando l'ascoltatore e' nei palchi dato che per questi, il soffitto non e' a vista; comunque questo effetto dovrebbe essere riferito al canale sinistro, mentre invece e' piu' evidente per il canale destro (Fig.3.2).



Con la sorgente nello stage e l'ascoltatore nei palchi, le riflessioni arrivano quasi allo stesso tempo, sia per il canale destro che per quello sinistro; quando invece la sorgente e' nella buca, la differenza temporale di arrivo della prima riflessione fra i due canali e' particolarmente evidente, difatti i valori differiscono in modo netto. E' interessante notare che quando la sorgente e' sotto l'arco scenico (1° fila), la differenza diminuisce molto per il ricevitore posto nei palchi, fino a invertire il canale destro con il sinistro per il ricevitore posto in platea; questo tipo di inversione potrebbe essere causata dalla

eccessiva concavita' della copertura, infatti questa caratteristica e' presente solamente nel ricevitore posto nella platea come verra' dimostrato nei capitoli in appendice.

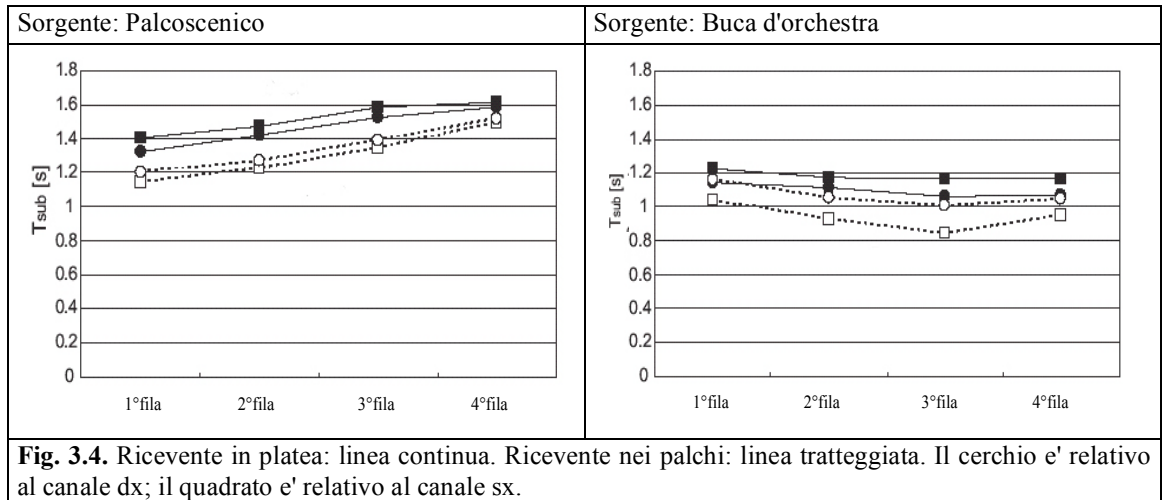
Analizzando il parametro relativo al primo decadimento delle riflessioni (EDT), si trova che nel caso della sorgente nella buca e ricevitore nei palchi (Fig 3.3), il valore piu' alto e' riferito alla 1°fila, rompendo la linea di tendenza presente per le altre file.



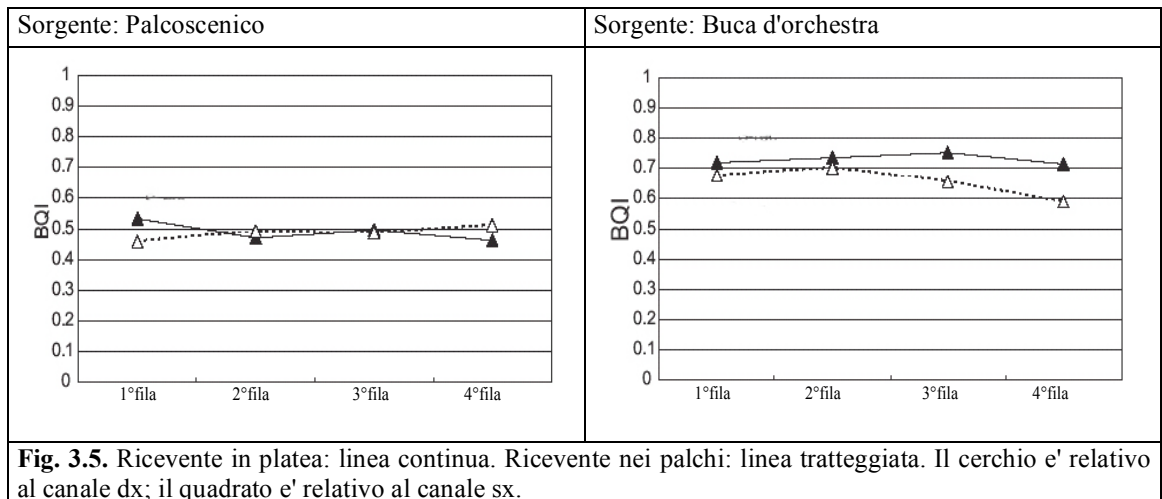
Tale comportamento potrebbe essere causato dall'arco scenico che difatti e' proprio sopra la 1°fila, ma la cosa probabilmente piu' importante e' che sia il ricevitore presente in platea ed il ricevitore presente nei palchi, hanno quasi lo stesso tempo di EDT , e cio' avvalora ancora di piu' l'ipotesi dell'arco scenico.

Come per il parametro dell' EDT , anche il T_{sub} , appartiene a quei fattori in diretta relazione con la riverberazione e quindi il loro comportamento risulta essere simile, come si puo' notare dalla Fig.3.4, anche se le differenze sono piu' evidenti per il primo. Generalmente i suoni provenienti dallo stage sono piu' riverberati rispetto a quelli provenienti dalla buca, ed inoltre i suoni che arrivano in platea sono piu' riverberati rispetto a quelli che arrivano nei palchetti; cio' e' probabilmente dovuto al fatto che piu' i suoni si avvicinano al fondo dello stage, piu' risentono delle riflessioni provenienti

dalla parete di fondo, ed e' per questo motivo che i valori di questi due parametri aumentano con l'aumentare della distanza.



Per quanto riguarda invece l'indice di qualita' binaurale (BQI), i risultati mostrano notevoli differenze fra le sorgenti disposte nel palcoscenico e quelle disposte nella buca d'orchestra. Indifferentemente dalla posizione dei ricevitori, i valori del BQI provenienti dalla buca d'orchestra, sono piu' alti e conseguentemente migliori rispetto a quelli provenienti dallo stage.



La media dei valori di tutte le posizioni delle sorgenti presenti sul palcoscenico sono di 0,48 e 0,49 per i ricevitori in platea e nei palchi rispettivamente, mentre la media dei

valori delle sorgenti poste nella buca d'orchestra sono 0,73 e 0,66, seguendo lo stesso ordine; sembra che la differenza fra le file di sorgenti non sia così evidente per questo parametro. Sembrerebbe manifesto che il suono riflesso arrivi in platea quasi frontalmente, che equivale a dire che la copertura della sala invece di diffondere, tende a concentrare le riflessioni dei raggi sonori (vedi Appendice I); questo effetto non è così evidente per il ricevitore posto nei palchetti dato che l'orientamento degli orecchi della *dummy head* è in rapporto con le pareti laterali del palchetto e l'orientamento delle pareti laterali a loro volta in rapporto con lo stage (vedi Fig.2.4).

3.2 Studio delle sorgenti presenti nella 1° fila

La discussione sui parametri acustici di cui al paragrafo precedente è stata fatta su di una media di valori per file, ma per una indagine più minuziosa converrà studiare il comportamento delle sorgenti sonore singolarmente, soprattutto quelle relative alla 1° fila sia in buca che sul palcoscenico. I parametri temporali come il Δt_l , T_{sub} e l' EDT mostrano una dipendenza relativamente alla loro posizione, presente maggiormente nella 1° fila, sia in buca d'orchestra che su palcoscenico, rispetto alle altre file. Inoltre la 1° fila rappresenta una zona importante dato che i cantanti tendono ad avvicinarsi verso il pubblico e gli strumentisti, presenti in tale fila sono i solisti che eseguono le melodie principali; perciò la zona delle file anteriori, dovrà ricevere particolare cura da un punto di vista acustico e quindi anche progettuale. Come si può notare, le Figg. 3.6-7 mostrano i valori del Δt_l e dell' EDT in rapporto al posizionamento delle sorgenti nella 1° fila; nel caso in cui la sorgente sia sul palcoscenico ed il ricevitore in platea, quando il suono sorgente è nel lato sinistro (prime postazioni vedi Fig.2.4), il valore di Δt_l del canale sinistro è più breve rispetto a quello destro, e quando il suono sorgente

e' nel lato destro (ultime postazioni vedi Fig.2.4), il valore di Δt_l del canale destro e' piu' breve rispetto a quello del canale sinistro.

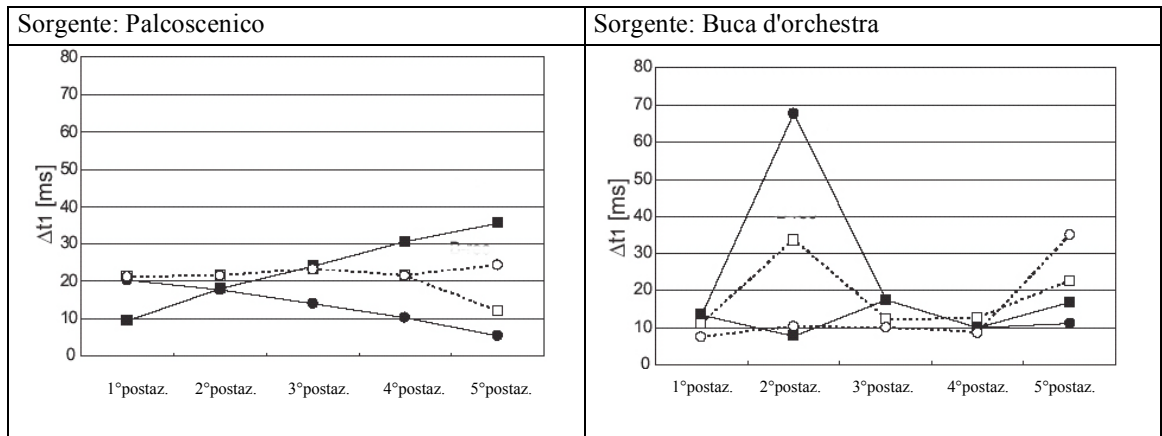


Fig. 3.6. Ricevente in platea: linea continua. Ricevente nei palchi: linea tratteggiata. Il cerchio e' relativo al canale dx; il quadrato e' relativo al canale sx.

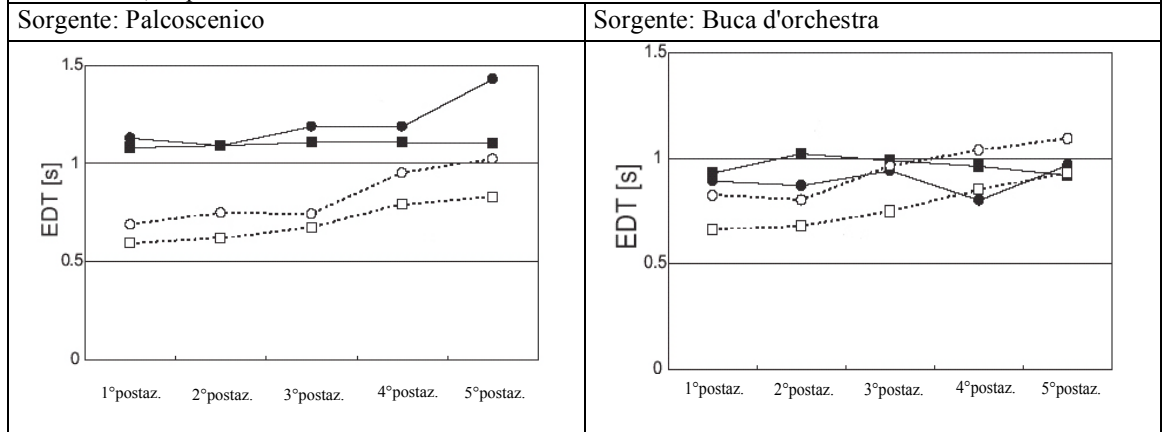


Fig. 3.7. Ricevente in platea: linea continua. Ricevente nei palchi: linea tratteggiata. Il cerchio e' relativo al canale dx; il quadrato e' relativo al canale sx.

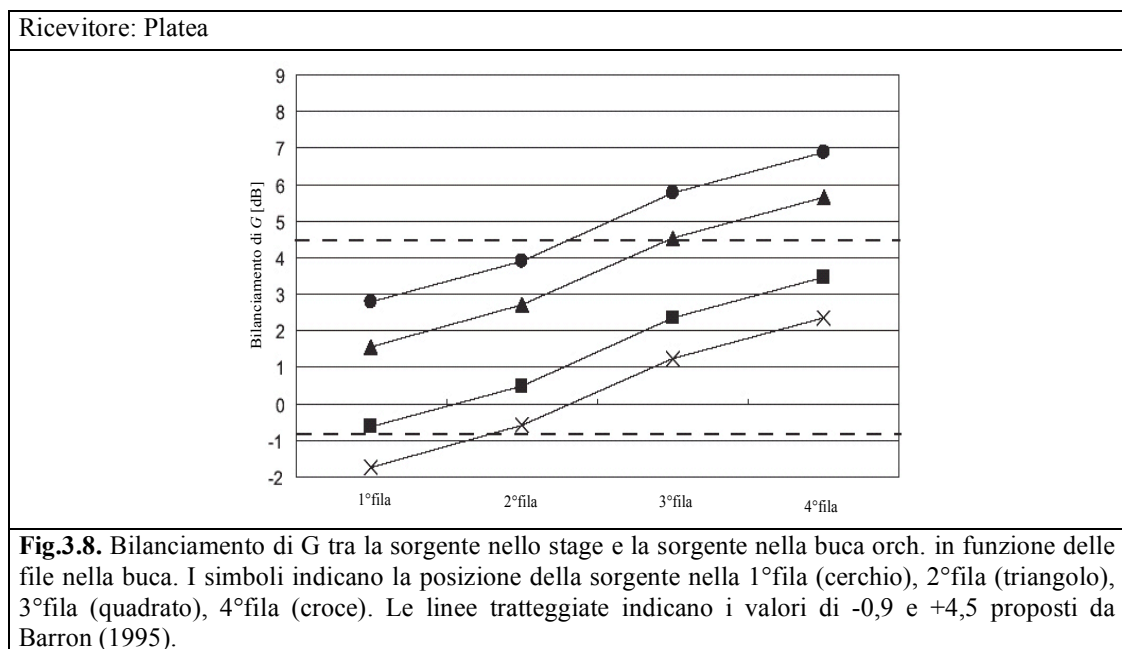
Attraverso la lettura di questi risultati, e' probabile che in questo caso la prima riflessione arrivi dalla base delle mura laterali. Essendo stata posizionata in platea, la dummy head, e piu' precisamente nel lato destro di questa come si puo' notare in Fig.2.4, le sorgenti provenienti da sinistra producono percorsi piu' brevi per le riflessioni provenienti dal muro perimetrale di sinistra che non da quello di destra.

Allo stesso modo per i suoni provenienti dalle sorgenti del lato destro del palcoscenico, la prima riflessione proveniente dal muro laterale destro, raggiunge il canale destro piu' velocemente; d'altra parte, al di la' dalla direzione di provenienza della sorgente, la

prima riflessione dalla sorgente di palcoscenico, raggiunge il ricevitore nei palchi superiori con lo stesso ritardo temporale di circa 20ms generalmente. Questa indipendenza dalle posizioni di provenienza, mostra che la prima riflessione e' radiata dalla copertura probabilmente.

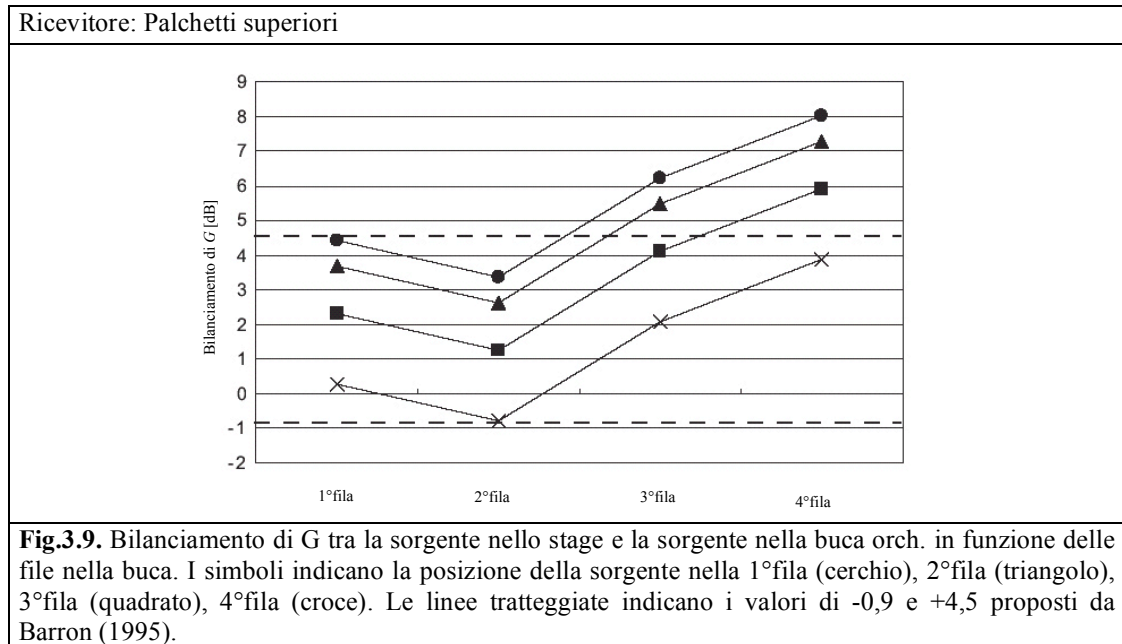
3.3 Bilanciamento energetico basato sull'indice di intensita' G

Questo tipo di bilanciamento viene generalmente eseguito fra la intensita' acustica della buca d'orchestra in rapporto con quella proveniente dal palcoscenico; il bilanciamento e' stato quantificato attraverso la differenza del livello della pressione sonora per un ascoltatore nell'area di udienza, nel caso in cui lo stesso livello di potenza e' emesso da due differenti sorgenti sonore poste nel palcoscenico e nella buca d'orchestra.



Barron [24] ha proposto una serie dinamica compresa nei valori di -0,9 e +4,5 dB, come criterio di buon bilanciamento basato sulla differenza del livello di pressione sonora (SPL), per le esecuzioni operettistiche. In base al fatto che i livelli di potenza del

palcoscenico e della buca orchestrale sono uguali, il criterio di bilanciamento proposto da Barron si dimostra utile anche in termini di G (strength).



Le Figg.3.8 e 3.9 mostrano le differenze dell'indice di intensità' (G) in funzione di ogni fila; tenendo in considerazione le prime 2 file di sorgenti nel palcoscenico (vedi Fig.2.4), si ottiene la media di valori di 10 sorgenti ed una area di circa 32m^2 : per il ricevitore in platea, questa zona di movimento per i cantanti, sembra corretta per un buon bilanciamento.

La corrispondente superficie usata dall'orchestra nella buca, copre le prime 3 file per un'area totale di circa 48m^2 : la stima di un'area più grande sarebbe da considerarsi fuori dalla serie dinamica per un buon bilanciamento. Quando il ricevitore è nei palchetti superiori, si può affermare che l'area ideale per un buon bilanciamento è rappresentata dalla superficie occupata dalle prime 2 file (media di 2×5 sorgenti) nel palcoscenico, ma l'area corrispondente per l'orchestra nella buca, in questo caso, dovrebbe essere ridotta di 1 fila per un migliore risultato per ciò che concerne il bilanciamento.

3.4 Considerazioni finali

In linea di massima, i teatri d'opera italiani sono composti da una serie di elementi la cui combinazione e' determinante per il campo acustico; lo spazio destinato al palcoscenico, alla platea o sala, alla buca d'orchestra e ai palchetti, decide la composizione della risposta acustica. Inoltre, con questa serie di spazi accoppiati acusticamente, diventa arduo associare ad un teatro d'opera, il cosiddetto campo uniformemente diffuso riscontrabile in altri tipi di spazi, a parer mio, molto piu' grandi e con caratteristiche sia architettoniche che acustiche molto differenti. Per questo tipo di indagine e' stato usato un tipo di misurazione differente rispetto ai comuni casi di analisi di uno spazio; infatti sono stati usati solamente due ricevitori (uno in platea e l'altro nei palchi), mentre per cio' che riguarda le sorgenti sono state usate 40 differenti posizioni per meglio capire l'effetto del differente tipo di sorgente. Attraverso il Cap. 2 e 3, si e' cercato di analizzare attraverso una lunga campagna di misurazioni fatta dal *D.I.E.N.C.A.* di Bologna, il luogo teatrale e nello specifico il Teatro Nuovo di Spoleto; in questi due capitoli sono state analizzate le risposte all'impulso in modo coerente agli standards per i teatri. L'analisi nel dominio del tempo, attraverso i parametri acustici visti finora, ha prodotto degli interessantissimi risultati che successivamente verranno confrontati e/o integrati con l'analisi nel dominio della frequenza esposta nei capitoli successivi. Quindi, le problematiche piu' evidenti possono essere cosi' descritte: la ristrutturazione avvenuta nel 1914 che ha provocato il taglio del proscenio, ha eliminato tutto il gruppo di riflessioni provenienti dall'arco scenico verso i cantanti, in "favore" della parte scoperta dell'orchestra; questa cosa, estremamente sfavorevole sia per gli esecutori che per gli ascoltatori verra' messa in evidenza nei capitoli successivi attraverso l'analisi in frequenza della R.I.. Inoltre, la curvatura del soffitto presenta un raggio troppo corto in rapporto all'altezza a cui e' posta, oltretutto l'altezza della

copertura del teatro e' sproporzionata rispetto alle altre due dimensioni, infatti come si evince dal paragrafo 2.2, l'altezza ha una dimensione piu' elevata sia della larghezza che della lunghezza, e cio' non favorisce sicuramente il campo acustico.

4.0 Rapporto fra performance musicale e spazio teatrale secondo i principi della Teoria Modale e dell'Acustica Musicale

4.1 Teoria Modale - brevi cenni

Essendo questa teoria molto efficace, soprattutto rispetto a tante altre, perché permette una descrizione ben definita del suono negli spazi chiusi [31], se ne riportano brevemente alcuni passi dato che nel capitolo successivo riguardante la lettura in frequenza della risposta all'impulso se ne usa l'impostazione di massima.

Prendendo in considerazione un ambiente a sezione rettangolare nel quale è stata posta una sorgente sonora ad un vertice dell'ambiente di dimensioni l_x , l_y , l_z , il quale vertice viene assunto come origine di una terna di assi cartesiani come si nota in Fig. 4.1.

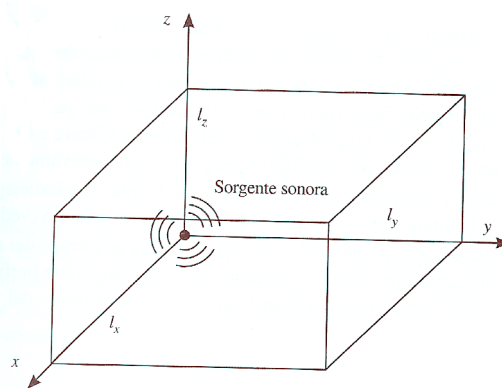


Fig. 4.1. Ambiente tridimensionale a sezione rettangolare; la sorgente sonora è ad uno dei vertici (Cirillo, 1997).

Le onde si propagano, non appena la sorgente entra in funzione, in ogni direzione tra le facce opposte di ciascuna coppia di pareti e sia all'interno dell'ambiente in modo tale da interessare ogni parete (una coppia, due coppie, tre coppie di pareti) rispetto agli angoli di incidenza. Quando le onde ritornano su loro stesse, per valori opportuni degli angoli di incidenza, si verifica il fenomeno dell'onda stazionaria e relativamente a questo caso, corrisponde un modo normale di vibrazione dell'ambiente; inoltre quando la frequenza

del suono emesso dal punto sorgente uguaglia la frequenza di uno dei modi normali di vibrazione, si verifica il fenomeno della risonanza, perche' l'ambiente risponde, attraverso la lunghezza d'onda della frequenza relativa, esaltando in ampiezza tale frequenza rispetto alle altre.

I modi normali di vibrazione, che precedentemente sono stati introdotti e che rappresentano la risposta dell'ambiente alle frequenze, sono dati in Hz dalla seguente relazione:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (4.1)$$

dove: c (ms^{-1}) e' la velocita' del suono nell'aria, l_x , l_y , l_z , (m) sono le dimensioni dell'ambiente; n_x , n_y , n_z ; sono numeri interi compresi tra 0 e ∞ [25].

Da cio' deriva che i modi normali di vibrazione di un ambiente sono teoricamente infiniti, dipendendo questi solamente dalla combinazione dei tre numeri interi n_x , n_y , n_z ; cio' e' facilmente verificabile in un piccolo ambiente di forma parallelepipeda, ma nei grandi ambienti aventi forme irregolari generalmente si considera solamente una o al massimo due dimensioni (generalmente larghezza e altezza per i teatri oppure il raggio maggiore per ambienti a sezione non rettangolare).

I modi si dividono in tre categorie secondo il tipo di collisione che il raggio sonoro segue nel suo tracciato e secondo soprattutto l'interazione fra gli stessi (Fig. 4.2):

- modi assiali: si hanno quando due valori di n sono uguali a zero; e si verificano attraverso la propagazione, assiale appunto, fra due pareti parallele;
- modi tangenziali: si hanno quando un valore di n e' uguale a zero; essi si verificano quando le onde acustiche viaggiano parallelamente a due coppie di pareti;

- modi obliqui: si hanno quando tutti i valori di n sono diversi da zero; si verificano quando le onde entrano in risonanza con le tre coppie di pareti.

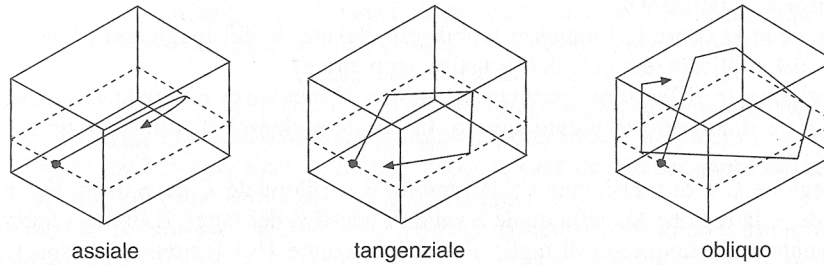


Fig. 4.2. Rappresentazione dei tre tipi di modi all'interno di un ambiente a forma parallelepipedica (Everest, 1996).

Naturalmente esiste una specie di gerarchia dei modi in funzione della loro intensita', infatti alcuni ricercatori hanno scoperto che fra i tre modi, quelli con la piu' alta intensita' sono gli assiali, poi i tangenziali con una intensita' minore di 3 dB rispetto ai primi ed infine gli obliqui che subiscono un ulteriore decremento di 3 dB rispetto ai precedenti.

Il numero dei modi di vibrazione racchiusi entro lo spazio descritto, puo' essere approssimato al valore del rapporto tra il volume dell'ottava parte della sfera di raggio f e il volume del blocco elementare B ($B = c^3/8V$), ottenendo così:

$$N = \frac{4\pi V}{3c^3} f^3 \quad (4.2)$$

Tale relazione e' piu' rispondente per ambienti relativamente grandi [31], ma per ambienti piccoli e' necessario introdurre la formula completa:

$$N = \frac{4\pi f^3 V}{3c^3} + \frac{\pi f^2 S}{4c^2} + \frac{fL}{8c} \quad (4.3)$$

dove V (m^3) e' il volume dell'ambiente, S (m^2) e' l'area totale delle superfici dell'ambiente ed L (m) e' la somma delle lunghezze degli spigoli del parallelepipedo.

Inoltre se si differenzia quest'ultima (4.3) rispetto alla frequenza, con una certa approssimazione, si può calcolare il numero delle vibrazioni modali in una data banda di frequenza:

$$\Delta N = \left(\frac{4\pi V}{c^3} f^2 + \frac{\pi A}{2c^2} f + \frac{L}{8c} \right) \Delta f \quad (4.4)$$

Inoltre, i modi normali di vibrazione sono rappresentati negli spettrogrammi dai picchi di intensità maggiore, tali picchi che sono ben distanziati alle basse frequenze, diventano sempre più vicini sino a sovrapporsi in modo direttamente proporzionale con l'aumentare della frequenza; risultando quindi alle alte frequenze, l'ambiente, più omogeneo ed uniforme rispetto alle basse frequenze. Va aggiunto che sono molto importanti le proporzioni fra l_x , l_y , l_z , ovvero le lunghezze dei lati del parallelepipedo, infatti in un ambiente a forma cubica si formerebbero modi coincidenti quasi completamente sovrapposti e tale sovrapposizione rappresenta la prima regola da osservare per evitare simili risultati, che a livello di ascolto produrrebbero delle colorazioni eccessive solamente alla frequenza relativa alla lunghezza del lato del cubo.

4.2 Teoria delle proporzioni dimensionali in rapporto ai Modi

Come già accennato le proporzioni fra lunghezza, larghezza e altezza sono fondamentali per la corretta distribuzione dei modi all'interno di uno spazio, infatti i modi troppo ravvicinati producono il cosiddetto fenomeno del *battimento* molto conosciuto in acustica musicale ma che verrà approfondito nel prossimo paragrafo. In questo mi occuperò dei rapporti dimensionali proposti da vari ricercatori come Sepmeyer [26], Louden [27], Volkmann [27], Boner [27], ed infine Beranek [28].

Sepmeyer, attraverso il suo studio "Computed Frequency and Angular Distribution of the Normal Modes of Vibration", definisce i migliori rapporti spaziali da lui

trovati attraverso lo studio sia delle frequenze che della distribuzione angolare dei modi normali all'interno di uno spazio. I criteri adottati sono stati computerizzati per ogni banda di 1/2 ottava fino a 4 ottave. Gli altri ricercatori hanno adottato tecniche simili ma il miglior modo per verificare tali rapporti si basa sulla applicazione della formula (4.1) già vista in precedenza. Vediamo adesso in una tabella, tutti i rapporti trovati dai sopra citati autori.

<i>Autore</i>		<i>Altezza (relativa)</i>	<i>Larghezza (relativa)</i>	<i>Lunghezza (relativa)</i>
Sepmeyer	A	1,00	1,14	1,39
Sepmeyer	B	1,00	1,28	1,54
Sepmeyer	C	1,00	1,6	2,33
Louden	D	1,00	1,4	1,9
Louden	E	1,00	1,3	1,9
Louden	F	1,00	1,5	2,5
Volkman	G	1,00	1,5	2,5
Boner	H	1,00	1,26	1,59
Beranek	I	1,00	1,6	2,3
Beranek	L	1,00	2	3

Tab. 4.1. Rapporti per la migliore distribuzione dei modi trovati per spazi a sezione rettangolare

4.2.1 Rapporti di Sepmeyer

Analizzando il grafico relativo ai rapporti (A) di Sepmeyer ci proponiamo di evidenziare quei modi in cui sono presenti le sovrapposizioni; infatti seguendo il criterio di Bonello [29] si trova che ogni modo deve avere una necessaria distanza dall'altro per evitare i cattivi effetti della sovrapposizione modale che necessariamente porta al fenomeno del *battimento*, come detto prima. Ovviamente ci deve essere la migliore distribuzione possibile fra un modo e l'altro e uno di questi criteri si basa appunto nel misurare la frequenza dei due modi ritenuti vicini e calcolarne la vicinanza

in percentuale, sapendo dallo studio di Bonello che oltre il 5%, questa vicinanza viene giudicata in modo negativo per la ricezione ($c = 344\text{m s}^{-1}$).

4.2.1.1 Rapporto A (Sepmeyer)

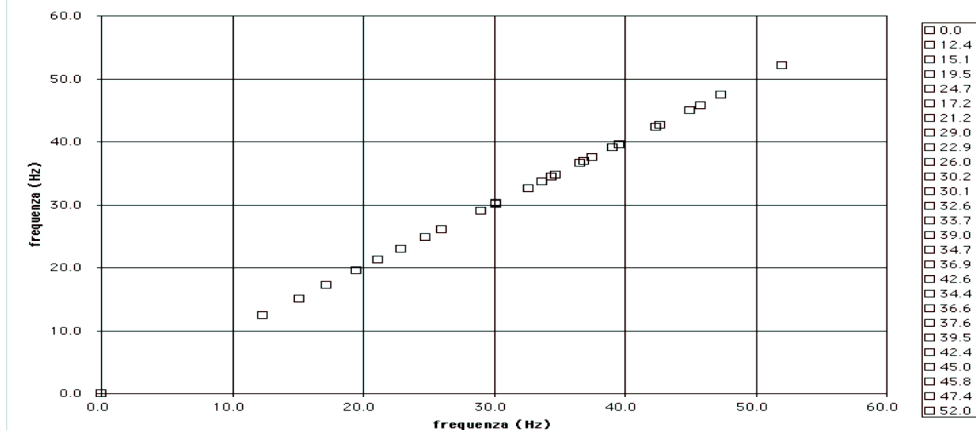


Fig. 4.3. Distribuzione dei modi secondo Sepmeyer (A). Frequenze (colonna a destra).

Numero delle sovrapposizioni modali:			
1°	29,0 Hz ÷ 30,1 Hz	7°	36,9 Hz ÷ 37,6 Hz
2°	30,1 Hz ÷ 30,2 Hz	8°	42,4 Hz ÷ 42,6 Hz
3°	32,6 Hz ÷ 33,7 Hz	9°	45,0 Hz ÷ 45,8 Hz
4°	33,7 Hz ÷ 34,4 Hz	10°	/
5°	34,4 Hz ÷ 34,7 Hz	11°	/
6°	36,6 Hz ÷ 36,9 Hz	12°	/

4.2.1.2 Rapporto B (Sepmeyer)

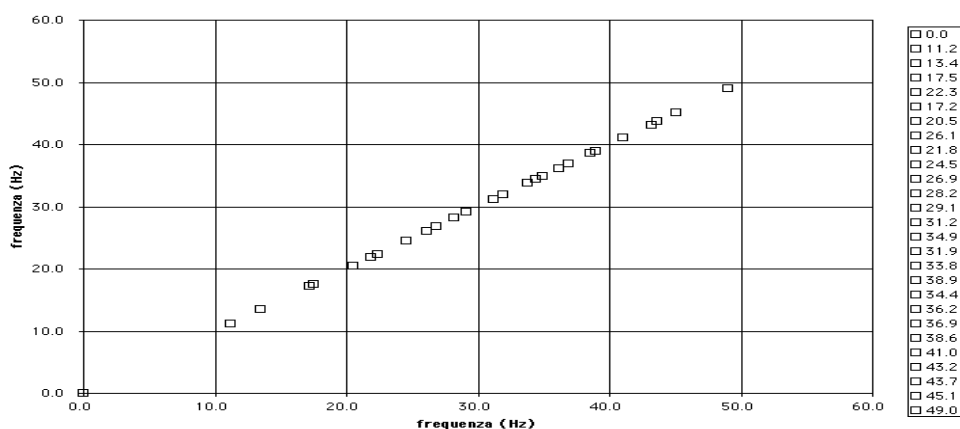


Fig. 4.4. Distribuzione dei modi secondo Sepmeyer (B). Frequenze (colonna a destra).

Numero delle sovrapposizioni modali:			
1°	17,2 Hz ÷ 17,5 Hz	7°	34,4 Hz ÷ 34,9 Hz
2°	21,8 Hz ÷ 22,3 Hz	8°	36,2 Hz ÷ 36,9 Hz
3°	26,1 Hz ÷ 26,9 Hz	9°	38,6 Hz ÷ 38,9 Hz
4°	28,2 Hz ÷ 29,1 Hz	10°	43,2 Hz ÷ 43,7 Hz
5°	31,2 Hz ÷ 31,9 Hz	11°	/
6°	33,8 Hz ÷ 34,4 Hz	12°	/

4.2.1.3 Rapporto C

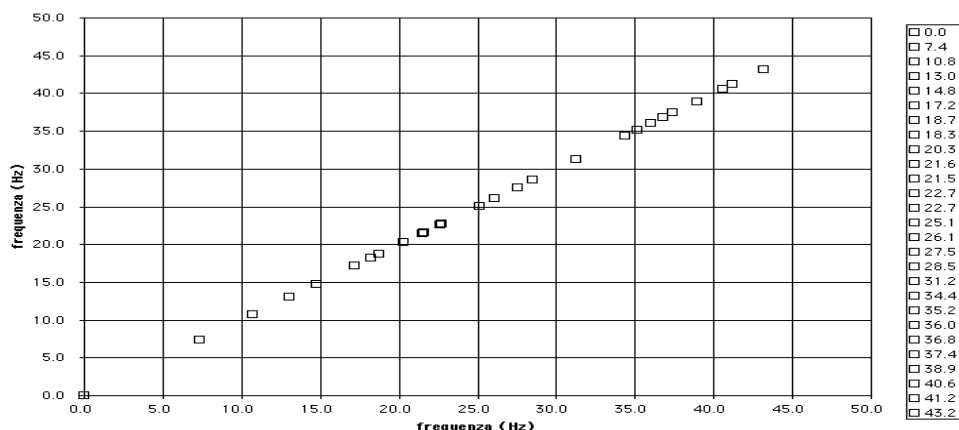


Fig. 4.5. Distribuzione dei modi secondo Sepmeyer (C). Frequenze (colonna a destra).

Numero delle sovrapposizioni modali:			
1°	18,3 Hz ÷ 18,7 Hz	7°	36,0 Hz ÷ 36,8 Hz
2°	21,5 Hz ÷ 21,6 Hz	8°	36,8 Hz ÷ 37,4 Hz
3°	22,7 Hz ÷ 22,7 Hz	9°	40,6 Hz ÷ 41,2 Hz
4°	25,1 Hz ÷ 26,1 Hz	10°	/
5°	27,5 Hz ÷ 28,5 Hz	11°	/
6°	34,4 Hz ÷ 35,2 Hz	12°	/

4.2.2 Rapporti di Louden

4.2.2.1 Rapporto D

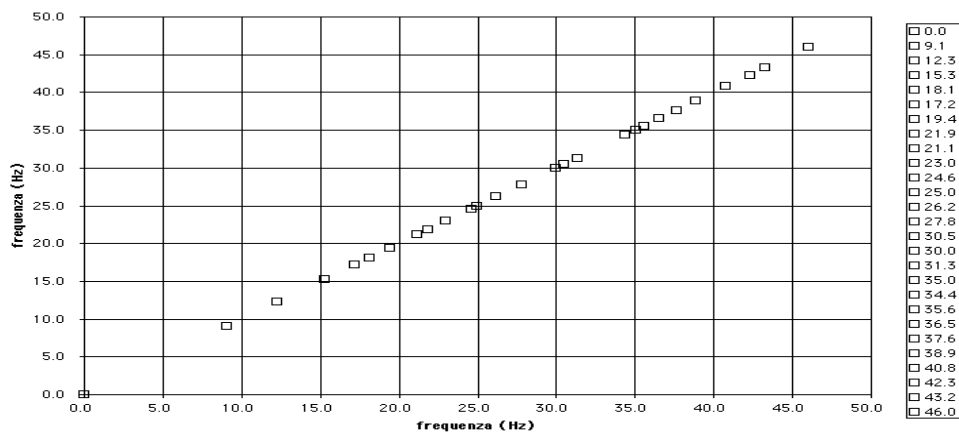


Fig. 4.6. grafico rappresentante la distribuzione dei modi secondo Louden (D).

Numero delle sovrapposizioni modali:			
1°	21,1 Hz ÷ 21,9 Hz	7°	35,6 Hz ÷ 36,5 Hz
2°	24,6 Hz ÷ 25,0 Hz	8°	36,5 Hz ÷ 37,6 Hz
3°	30,0 Hz ÷ 30,5 Hz	9°	37,6 Hz ÷ 38,9 Hz
4°	30,5 Hz ÷ 31,3 Hz	10°	42,3 Hz ÷ 43,2 Hz
5°	34,4 Hz ÷ 35,0 Hz	11°	/
6°	35,0 Hz ÷ 35,6 Hz	12°	/

4.2.2.2 Rapporto E

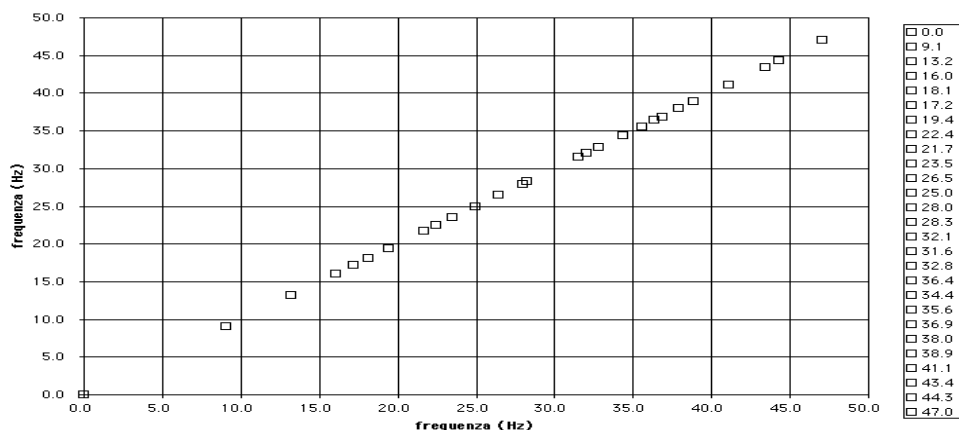


Fig. 4.7. grafico rappresentante la distribuzione dei modi secondo Louden (E).

Numero delle sovrapposizioni modali:			
1°	21,7 Hz ÷ 22,4 Hz	7°	38,0 Hz ÷ 38,9 Hz
2°	28,0 Hz ÷ 28,3 Hz	8°	43,4 Hz ÷ 44,3 Hz
3°	31,6 Hz ÷ 32,1 Hz	9°	/
4°	32,1 Hz ÷ 32,8 Hz	10°	/
5°	35,6 Hz ÷ 36,4 Hz	11°	/
6°	36,4 Hz ÷ 36,9 Hz	12°	/

4.2.2.3 Rapporto F

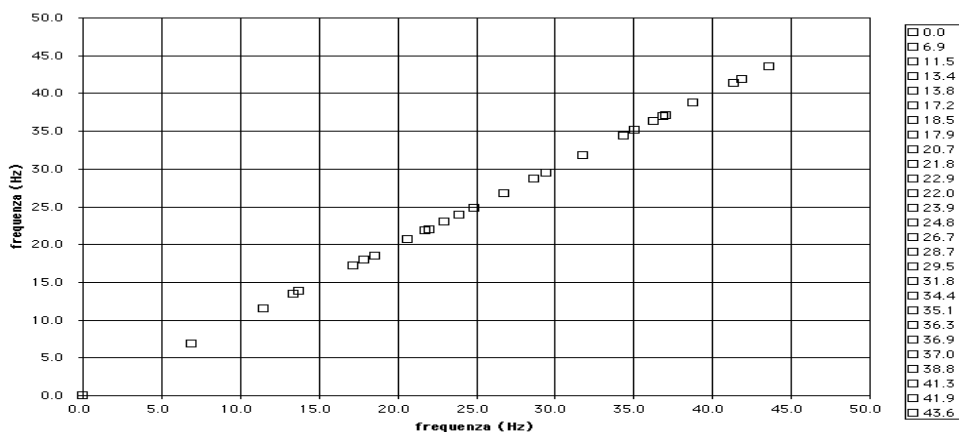


Fig. 4.8. grafico rappresentante la distribuzione dei modi secondo Louden (F).

Numero delle sovrapposizioni modali:			
1°	13,4 Hz ÷ 13,8 Hz	7°	23,9 Hz ÷ 24,8 Hz
2°	17,2 Hz ÷ 17,9 Hz	8°	28,7 Hz ÷ 29,5 Hz
3°	17,9 Hz ÷ 18,5 Hz	9°	34,4 Hz ÷ 35,1 Hz
4°	21,8 Hz ÷ 22,0 Hz	10°	36,3 Hz ÷ 36,9 Hz
5°	22,0 Hz ÷ 22,9 Hz	11°	36,9 Hz ÷ 37,0 Hz
6°	22,9 Hz ÷ 23,9 Hz	12°	41,3 Hz ÷ 41,9 Hz

4.2.3 Rapporti di Volkmann

4.2.3.1 Rapporto G

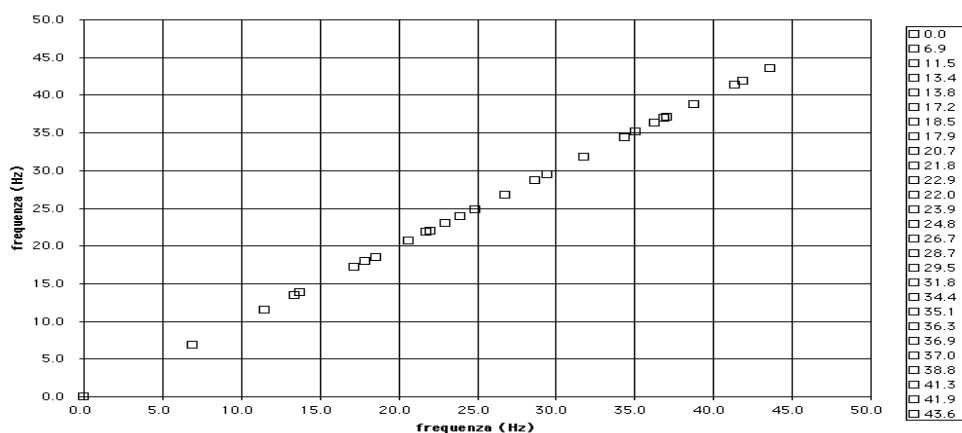


Fig. 4.9. grafico rappresentante la distribuzione dei modi secondo Volkmann (G).

Numero delle sovrapposizioni modali:			
1°	13,4 Hz ÷ 13,8 Hz	7°	23,9 Hz ÷ 24,8 Hz
2°	17,2 Hz ÷ 17,9 Hz	8°	28,7 Hz ÷ 29,5 Hz
3°	17,9 Hz ÷ 18,5 Hz	9°	34,4 Hz ÷ 35,1 Hz
4°	21,8 Hz ÷ 22,0 Hz	10°	36,3 Hz ÷ 36,9 Hz
5°	22,0 Hz ÷ 22,9 Hz	11°	36,9 Hz ÷ 37,0 Hz
6°	22,9 Hz ÷ 23,9 Hz	12°	41,3 Hz ÷ 41,9 Hz

4.2.4 Rapporti di Boner

4.2.4.1 Rapporto H

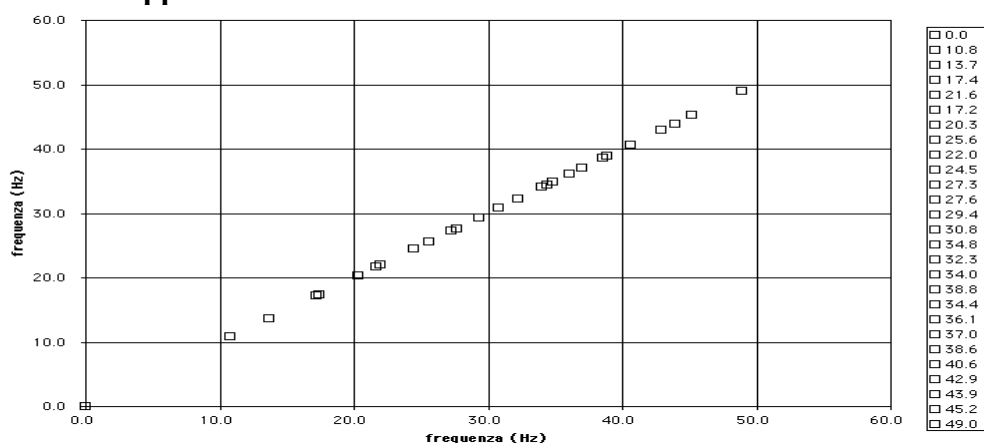


Fig. 4.8. grafico rappresentante la distribuzione dei modi secondo Boner (H).

Numero delle sovrapposizioni modali:			
1°	17,2 Hz ÷ 17,4 Hz	7°	34,8 Hz ÷ 36,1 Hz
2°	21,6 Hz ÷ 22,0 Hz	8°	36,1 Hz ÷ 37,0 Hz
3°	24,5 Hz ÷ 25,6 Hz	9°	38,6 Hz ÷ 38,8 Hz
4°	27,3 Hz ÷ 27,6 Hz	10°	42,9 Hz ÷ 43,9 Hz
5°	34,0 Hz ÷ 34,4 Hz	11°	43,9 Hz ÷ 45,2 Hz
6°	34,4 Hz ÷ 34,8 Hz	12°	/

4.2.5 Rapporti di Beranek

4.2.5.1 Rapporto I

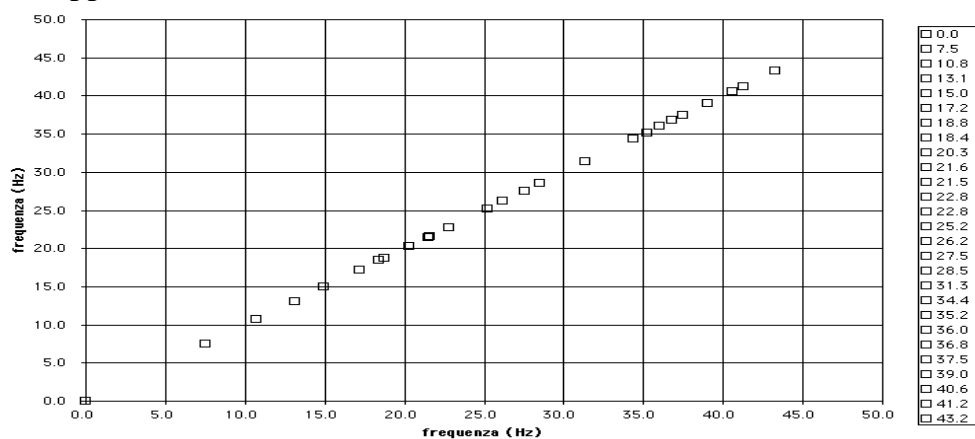


Fig. 4.9. grafico rappresentante la distribuzione dei modi secondo Beranek (I).

Numero delle sovrapposizioni modali:			
1°	18,4 Hz ÷ 18,8 Hz	7°	36,0 Hz ÷ 36,8 Hz
2°	21,5 Hz ÷ 21,6 Hz	8°	36,8 Hz ÷ 37,5 Hz
3°	25,2 Hz ÷ 26,2 Hz	9°	40,6 Hz ÷ 41,2 Hz
4°	27,5 Hz ÷ 28,5 Hz	10°	/
5°	34,4 Hz ÷ 35,2 Hz	11°	/
6°	35,2 Hz ÷ 36,0 Hz	12°	/

4.2.5.2 Rapporto L

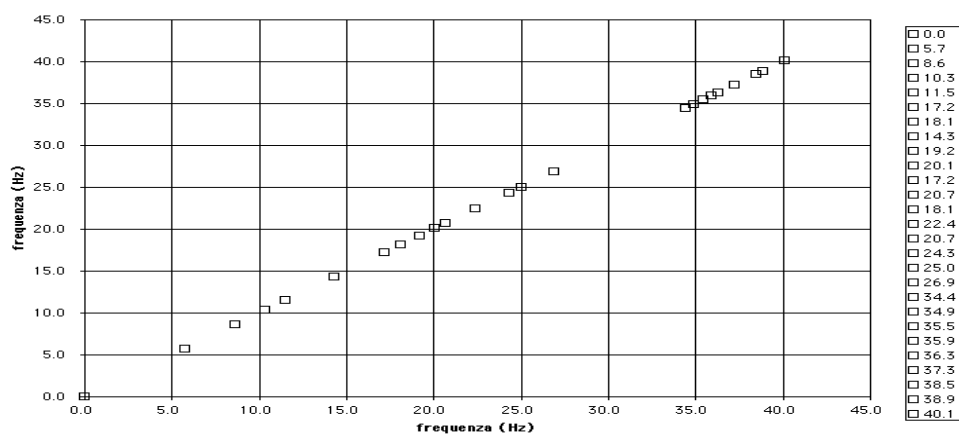


Fig. 4.10. grafico rappresentante la distribuzione dei modi secondo Beranek (L).

Numero delle sovrapposizioni modali:			
1°	20,1 Hz ÷ 20,7 Hz	7°	36,3 Hz ÷ 37,3 Hz
2°	24,3 Hz ÷ 25,0 Hz	8°	37,3 Hz ÷ 38,5 Hz
3°	34,4 Hz ÷ 34,9 Hz	9°	38,5 Hz ÷ 38,9 Hz
4°	34,9 Hz ÷ 35,5 Hz	10°	38,9 Hz ÷ 40,1 Hz
5°	35,5 Hz ÷ 35,9 Hz	11°	/
6°	35,9 Hz ÷ 36,3 Hz	12°	/

4.2.6 Analisi e discussione dei rapporti modalì

Come si può notare dai vari grafici, le differenze di proporzione dimensionale e quindi di forma sono assai importanti per la corretta distribuzione delle frequenze modalì, ma per una più corretta e diretta analisi conviene vedere i risultati riportati nella seguente Tab. 4.2. Come si può notare il numero delle sovrapposizioni modalì divise per autore varia da un minimo di 8 ad un massimo di 12, entro una larghezza di banda di circa 50 Hz; sono stati calcolati solamente i primissimi modi per facilità, infatti i modi vanno dal modo (0,0,0) al modo (2,2,2), ma come si sa questo è influente ai fini qualitativi in quanto poi tendono a ripetersi. Indubbiamente secondo questa teoria, il miglior rapporto dimensionale ottenuto è quello che presenta un minore numero di sovrapposizioni modalì, perciò ritengo che il rapporto (E) di Louden sia il migliore.

<i>autore</i>		<i>n° delle sovrapposizioni</i>
Sepmeyer	<i>A</i>	9
Sepmeyer	<i>B</i>	10
Sepmeyer	<i>C</i>	9
Louden	<i>D</i>	11
Louden	E	8
Louden	<i>F</i>	12
Volkman	<i>G</i>	12
Boner	<i>H</i>	11
Beranek	<i>I</i>	9
Beranek	<i>L</i>	10

Tab. 4.2. Sovrapposizioni modalì divise per autore.

Inoltre andrebbe considerata anche la densità modale all'interno della distribuzione dei modi perché va detto, che modi molto lontani sono da ritenersi negativi come se fossero troppo vicini, producendo altri effetti negativi come scarsità di risposta armonica in alcune frequenze ed eccesso di colorazione armonica per altre. È questo il caso del Rapporto L (Beranek) dove fino ai primi 25 Hz circa, non si verificano

sovrapposizioni ma quando si arriva intorno ai 35 Hz le sovrapposizioni raggiungono un numero elevatissimo, n° 8 sovrapposizioni in soli 6 Hz di gamma (Fig.4.10). Cio' vuol dire che in alcune gamme di frequenza che tendono a ripetersi ciclicamente, si avranno una serie di battimenti molto elevata. Si puo' affermare, in ultima analisi, che un minor numero di sovrapposizioni qualifica una migliore densita' distributiva di tali modi.

4.3 Teoria delle proporzioni dimensionali secondo i principi dell'Acustica Musicale

Esiste uno stretto legame fra la performance musicale e le dimensioni dell'involucro architettonico in cui essa viene eseguita; a prescindere dai materiali usati e dalla forma, ci si riferisce piu' propriamente al rapporto che si viene a sviluppare attraverso l'interazione fra lunghezza d'onda (misurabile spazialmente) e dimensioni del teatro (lunghezza, larghezza e altezza); oppure al rapporto fra dimensioni invisibili (lunghezze d'onda) e dimensioni visibili (dimensioni della sala teatrale).

4.3.1 Appunti brevi di acustica musicale

Va detto innanzitutto che non sono le quantita' metriche che entrano in discussione ma il rapporto fra di esse, come affermano le teorie inerenti la Sezione Aurea e la Successione Numerica di Fibonacci da cui prende spunto, in parte, questa analisi.

Prima pero' di approfondire il problema occorre fare una premessa di acustica musicale secondo l'armonia musicale classica e delle regole che governano il rapporto fra le note; tale rapporto viene regolato dalle teorie di composizione e armonia che si sono sviluppate nei secoli secondo i canoni della psico-acustica o secondo i canoni estetici propri del gusto, del piacere nell'ascolto ma anche da dati oggettivi, come vedremo in seguito.

Tali canoni (sempre relativi alla musica classica) che hanno alla base, come si e' detto, secoli di esperienze estetiche soggettive/oggettive ci trasmettono delle teorie di base che definiscono il campo del bello all'ascolto e di cio' che non lo e' per il nostro orecchio¹.

Ad esempio prendiamo il cosiddetto rapporto di quinta che in musica e' chiamato "rapporto perfetto", e non e' altro che la somma di due note (due frequenze), ad es.: Do + Sol; tale rapporto e' perfettamente distinguibile da tutti gli altri in quanto il nostro apparato uditivo riesce meglio a percepirlo per una questione oggettiva che si rifa' alla cosiddetta teoria della "vibrazione per simpatia" molto conosciuta in musica o "vibrazione per risonanza" in acustica fisica [30].

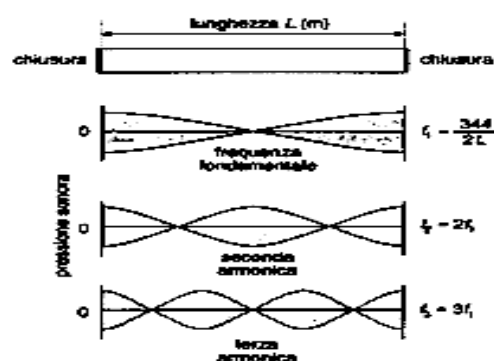


Fig.4.11. rappresentazione del fenomeno della risonanza fra due superfici limitate e parallele.

Come si puo' notare in Fig.4.11 una corda entra in vibrazione quando riceve una quantita' di energia vibrazionale che genera una frequenza f corrispondente ad una lunghezza d'onda pari ad un multiplo intero della sua lunghezza metrica.

¹ Non dimentichiamo che ai tempi della Controriforma, fine del XVI sec., la chiesa vietava espressamente un tipo di rapporto musicale perche' ritenuto brutto all'ascolto e quindi pericoloso per l'anima di chi lo ascoltava, per piu' di un secolo; tale rapporto era il rapporto di quinta diminuita, da non confondere con quello di quinta normale che invece era fortemente usato.

In pratica il Teorema di Fourier dimostra la stessa cosa dicendo che, se $f(t)$ rappresenta la pressione sonora di un suono di periodo T , essa può essere scritta come somma di armoniche, del tipo $\cos(\omega + \varphi)$, di frequenza angolare $2\omega, 3\omega, \dots$ e ciascuna con una propria fase φ [31].:

$$f(t) = \sum_0^{\infty} A_n \cos(n\omega t + \varphi_n) \quad (4.5)$$

dove n è un numero intero ($n=1,2,3,\dots$) e le A_n sono delle costanti numeriche che indicano quanto ogni armonica concorre al suono complesso e quindi rappresentano l'ampiezza di ciascuna componente; partendo dalla componente A_0 che non ha nessuna influenza, A_1 è l'ampiezza della cosiddetta fondamentale, cioè l'armonica di frequenza $f = \omega/2\pi$, A_2 quella della seconda armonica, di frequenza $2f$; A_3 quella della terza armonica di frequenza $3f$ ecc.

Quindi con una frequenza principale f , entreranno in vibrazione i multipli interi (parziali armonici) ma anche i multipli non interi (parziali non armonici) che per completezza vanno citati ma che non verranno presi in esame in questa relazione [32].

4.3.2 Il Teorema di Fourier e la formazione degli accordi musicali

I parziali armonici presi nell'ordine sono: $f, 2f, 3f, 4f, \dots, nf$; ma vediamo cosa vuol dire tale sequenza da un punto di vista acustico musicale dato che lo scopo dell'articolo è quello di mettere in relazione due fonti che parlano lo stesso linguaggio ma non usano gli stessi termini.

Se al posto della “ f ” si sceglie una frequenza non casuale ma una frequenza relativa ad una nota musicale, come per esempio il Do della 5° ottava che corrisponde ad una frequenza pari a 523,2 Hz, che cosa succederà con i multipli interi (Tab. 4.3).

Multipli interi di f	Frequenze	Note musicali relative	Posizione relativa all'interno dell'ottava
f	523,2 Hz	Do 5°ott.	1° (tonica)
$2f$	1046,4 Hz	Do 6°ott.	1° (tonica)
$3f$	1569,6 Hz	Sol 6°ott.	5° (dominante)
$4f$	2092,8 Hz	Do 7°ott.	1° (tonica)
$5f$	2616,0 Hz	Mi 7°ott.	3° (--)

Tab. 4.3. corrispondenza fra i multipli interi delle eigenfrequencies che si formano per risonanza nell'ambiente, e le relative note musicali che a loro volta formano un accordo

Come si può notare nella Tab. 4.3, i parziali armonici fino al 5° ordine sono sufficienti alla formazione della “triade” musicale, come si evince dall'ultima colonna relativa alle posizioni all'interno dell'ottava:

La 1°, 3° e la 5° corrispondenti alle note *Do*, *Mi* e *Sol*, sono le note necessarie per la formazione dell'accordo di *Do* maggiore e quindi si comprende quanto la teoria musicale non sia solamente frutto di speculazioni estetiche evolute nel tempo ma realtà oggettive relative alle caratteristiche fisiche del nostro apparato uditivo ma soprattutto materia oggettiva dipendente da grandezze fisiche.

La Teoria Musicale (formazione degli accordi e note) e' la traduzione, oppure, lo sviluppo consequenziale di cio' che in Fisica viene chiamato “Risonanza” che e' un fenomeno “naturale”, endogeno alla meccanica dei corpi siano essi solidi, liquidi o gassosi. E dato che la musica e' un fenomeno legato inscindibilmente al fenomeno della risonanza (e per conseguenza al Teorema di Fourier), risulta logico pensare che l'interno di uno spazio chiuso (soggetto a risonanza, quindi), se non opportunamente dimensionato, l'interazione con la musica non sara' mai naturale; intendendo per dimensioni opportune, quelle dimensioni che rapportate fra di loro, sono in grado di accogliere e/o bilanciare l'originario iter delle onde acustico-musicali.

4.3.3 Rapporti fra note musicali (Armonia Musicale)

A questo punto si possono descrivere i rapporti “accettati” dall’armonia classica e quelli che invece sono chiamati “evitati” attraverso le seguenti due tabelle (Tabb. 4.4-5), alle quali e’ stato annesso anche il corrispettivo in frequenza (Hz) e lunghezza d’onda (metri) delle note musicali prese ad esempio:

<i>Vedi Tab.:</i>	<i>Rapporti fra note</i>	<i>Note musicali corrispettive</i>	<i>Frequenze in Hz</i>	<i>Lunghezze d’onda in metri e loro rapporto²</i>
<i>A</i>	3°-	<i>Do / Re#</i>	523,2Hz / 622,2Hz	0,64m / 0,54m = 1,18
<i>B</i>	3°	<i>Do / Mi</i>	523,2Hz / 659,2Hz	0,64m / 0,51m = 1,25
<i>C</i>	4°	<i>Do / Fa</i>	523,2Hz / 698,4Hz	0,64m / 0,48m = 1,33
<i>D</i>	5°	<i>Do / Sol</i>	523,2Hz / 783,9Hz	0,64m / 0,43m = 1,49
<i>E</i>	6°	<i>Do / La</i>	523,2Hz / 880Hz	0,64m / 0,38m = 1,68
<i>F</i>	7°-	<i>Do / La#</i>	523,2Hz / 932,3Hz	0,64m / 0,36m = 1,77
<i>G</i>	7°	<i>Do / Si</i>	523,2Hz / 987,7Hz	0,64m / 0,34m = 1,82

Tab. 4.4. rapporti musicali fra note/frequenze che vengono maggiormente usati nell’armonia musicale classica e le rispettive lunghezze d’onda

<i>Vedi Tab.:</i>	<i>Rapporti fra note</i>	<i>Note musicali corrispettive</i>	<i>Frequenze in Hz</i>	<i>Lunghezze d’onda in metri e loro rapporto</i>
<i>H</i>	5°-	<i>Do / Fa#</i>	523,2Hz / 739,9Hz	0,64m / 0,45m = 1,42
<i>I</i>	5°+	<i>Do / Sol#</i>	523,2Hz / 830,6Hz	0,64m / 0,40m = 1,60

Tab 4.5. rapporti musicali fra note/frequenze che non vengono usati nell’armonia musicale classica (o usati raramente) e le rispettive lunghezze d’onda.

4.3.4 Rapporto fra esecuzioni musicali e spazio: accordi fra lunghezze d’onda e lunghezze spaziali

Nelle seguenti tabelle viene descritto il comportamento di qualsiasi tipo di esecuzione musicale di tipo classico (sono state esaminate le dodici tonalita’ maggiori

² Il motivo dell’inserimento dei rapporti fra dimensioni metriche sara’ spiegato nei capitoli successivi.

corrispondenti alle dodici note) da un punto di vista della frequenza o tonalita' di base³, all'interno di uno spazio delimitato da pareti con varie soluzioni metriche delle dimensioni della base preso ad esempio. Per una questione di facilita' di lettura verranno esaminati i rapporti metrici relativi alla pianta (lunghezza x larghezza) escludendo l'altezza e quindi la terza dimensione.

Verranno usati vari rapporti dimensionali corrispondenti a loro volta a dei rapporti musicali per capire il comportamento delle singole esecuzioni musicali e come queste interagiscono con lo spazio. Si notera' infine come rapporti dimensionali "sbagliati" (relativi alla Tab. 4.5) sviluppino cattive risonanze al punto di infierire sull'esecuzione e quindi sull'ascolto.

Nella Tabella A che segue si tentera' di descrivere come i rapporti musicali (fra note) possano essere applicati ai rapporti architettonici (altezza, lunghezza, larghezza di un auditorium) e come questa applicazione possa risolversi positivamente dal punto di vista qualitativo di ascolto per la musica. In tale tabella e' stato usato un rapporto fra lunghezza/larghezza⁴ pari a (1,185) il che corrisponde in musica ad un rapporto di terza minore (*Do*; *Re#*). In pratica: se ho una sala con una lunghezza pari a 32 m, in questo caso la larghezza dovra' corrispondere a 27,00 m, esempio:

lunghezza della sala = 32 m

larghezza della sala = **(32m : 1,18) = 27,00 m**

tonalita' in dissonanza (Tab.A)= 6 su un totale di 12

3 Non da un punto di vista temporale o ritmico della velocita' misurabile attraverso un metronomo, riferibile come detto prima al dominio del tempo.

4 E quindi saranno solamente le riflessioni fra le pareti laterali e le riflessioni fra la parete di fondo e il palco ad essere considerate, e questo come gia' si e' detto, facilita la lettura delle tabelle grafiche; in seguito verra' introdotta la 3° dimensione che sara' il corrispettivo dell'altezza del teatro e che a sua volta corrispondera' alla terza nota dell'accordo in musica.

Tab. A - 6 tonalità su 12 risultano in dissonanza -								Rapporto = 1,18		Tonalità in dissonanza
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	Do	Re#	
Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si	Do	1°	3°-	
Do#	Re#	Fa	Fa#	Sol#	La#	Do	Do#	7°	2°	
Re	Mi	Fa#	Sol	La	Si	Do#	Re	7°-	1°+	X
Re#	Fa	Sol	Sol#	La#	Do	Re	Re#	6°	1°	
Mi	Fa#	Sol#	La	Si	Do#	Re#	Mi	5°+	7°	X
Fa	Sol	La	La#	Do	Re	Mi	Fa	5°	7°-	
Fa#	Sol#	La#	Si	Do#	Re#	Fa	Fa#	5°-	6°	X
Sol	La	Si	Do	Re	Mi	Fa#	Sol	4°	5°+	X
Sol#	La#	Do	Do#	Re#	Fa	Sol	Sol#	3°	5°	
La	Si	Do#	Re	Mi	Fa#	Sol#	La	3°-	5°-	X
La#	Do	Re	Re#	Fa	Sol	La	La#	2°	4°	
Si	Do#	Re#	Mi	Fa#	Sol#	La#	Si	1°+	3°	X

Cio' che si vuol dimostrare e' che solamente alcuni rapporti dimensionali si presteranno di piu' ad accogliere qualsivoglia tipo di esecuzione musicale (dal punto di vista della frequenza); il rapporto dimensionale della Tab.A presenta 6 tonalita' con possibili dissonanze e le rimanenti 6 tonalita' invece perfettamente consonanti. Infatti le tonalita' (o scale) di *Re*, *Mi*, *Fa#*, *Sol*, *La* e *Si*, hanno al loro interno delle note che suonate in uno spazio con rapporti dimensionali (Tab.A) fra lunghezza e larghezza pari a 1,85, daranno luogo a dissonanze, vediamo perche'.

- onda diretta → corrispondente alla nota suonata = 130,81 Hz (Do)

- onda riflessa → corrispondente alla nota ascoltata⁵ = 134,70 Hz ($Do \leq f \leq Do\#$)

⁵ per nota ascoltata si intende il missaggio fra l'onda diretta con l'onda riflessa e contemporaneo effetto di battimento fra le due: $(138,59\text{Hz} - 130,81\text{Hz} = 7,78\text{ Hz})$ e poi $(130,81 + 7,78/2) = 134,70\text{ Hz}$.

Tale sovrapposizione che si creerà attraverso le riflessioni di 1° e 2° ordine, genererà un fastidioso effetto di battimento trattandosi di frequenze vicine, mentre invece si parlerà di un effetto di mascheramento per frequenze dissonanti lontane.

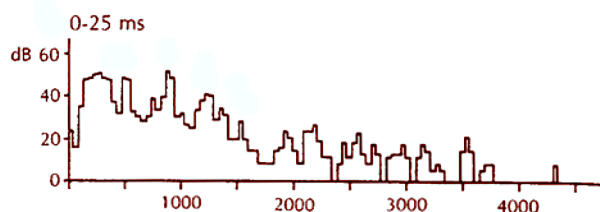


Fig. 4.12. Spettro in frequenza dei primi 25ms della nota di un pianoforte.

L'effetto di Battimento genererà una frequenza intermedia con una caratteristica essenziale dovuta all'oscillazione temporale dell'intensità'.

4.3.5 Tabelle rimanenti

Tab. B - 6 tonalità su 12 risultano in dissonanza -								Rapporto = 1,25		Tonalità in dissonanza
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	Do	Mi	
Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si	Do	1°	3°	
Do#	Re#	Fa	Fa#	Sol#	La#	Do	Do#	7°	3°-	
Re	Mi	Fa#	Sol	La	Si	Do#	Re	7°-	2°	
Re#	Fa	Sol	Sol#	La#	Do	Re	Re#	6°	1°+	X
Mi	Fa#	Sol#	La	Si	Do#	Re#	Mi	5°+	1°	X
Fa	Sol	La	La#	Do	Re	Mi	Fa	5°	7°	
Fa#	Sol#	La#	Si	Do#	Re#	Fa	Fa#	5°-	7°-	X
Sol	La	Si	Do	Re	Mi	Fa#	Sol	4°	6°	
Sol#	La#	Do	Do#	Re#	Fa	Sol	Sol#	3°	5°+	X
La	Si	Do#	Re	Mi	Fa#	Sol#	La	3°-	5°	
La#	Do	Re	Re#	Fa	Sol	La	La#	2°	5°-	X
Si	Do#	Re#	Mi	Fa#	Sol#	La#	Si	1°+	4°	X

Tab. C - 4 tonalità su 12 risultano in dissonanza -								Rapporto = 1,33		Tonalità in dissonanza
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	Do	Fa	
Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si	Do	1°	4°	
Do#	Re#	Fa	Fa#	Sol#	La#	Do	Do#	7°	3°	
Re	Mi	Fa#	Sol	La	Si	Do#	Re	7°-	3°-	
Re#	Fa	Sol	Sol#	La#	Do	Re	Re#	6°	2°	
	Fa#	Sol#	La	Si	Do#	Re#	Mi	5°+	1°+	X
Fa	Sol	La	La#	Do	Re	Mi	Fa	5°	1°	
Fa#	Sol#	La#	Si	Do#	Re#	Fa	Fa#	5°-	7°	X
Sol	La	Si	Do	Re	Mi	Fa#	Sol	4°	7°-	
Sol#	La#	Do	Do#	Re#	Fa	Sol	Sol#	3°	6°	
La	Si	Do#	Re	Mi	Fa#	Sol#	La	3°-	5°+	X
La#	Do	Re	Re#	Fa	Sol	La	La#	2°	5°	
Si	Do#	Re#	Mi	Fa#	Sol#	La#	Si	1°+	5°-	X

Tab. D - 4 tonalità su 12 risultano in dissonanza -								Rapporto = 1,49		Tonalità in dissonanza
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	Do	Sol	
Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si	Do	1°	5°	
Do#	Re#	Fa	Fa#	Sol#	La#	Do	Do#	7°	5°-	X
Re	Mi	Fa#	Sol	La	Si	Do#	Re	7°-	4°	
Re#	Fa	Sol	Sol#	La#	Do	Re	Re#	6°	3°	
Mi	Fa#	Sol#	La	Si	Do#	Re#	Mi	5°+	3°-	X
Fa	Sol	La	La#	Do	Re	Mi	Fa	5°	2°	
Fa#	Sol#	La#	Si	Do#	Re#	Fa	Fa#	5°-	1°+	X
Sol	La	Si	Do	Re	Mi	Fa#	Sol	4°	1°	
Sol#	La#	Do	Do#	Re#	Fa	Sol	Sol#	3°	7°	
La	Si	Do#	Re	Mi	Fa#	Sol#	La	3°-	7°-	
La#	Do	Re	Re#	Fa	Sol	La	La#	2°	6°	
Si	Do#	Re#	Mi	Fa#	Sol#	La#	Si	1°+	5°+	X

Tab. E - 6 tonalità su 12 risultano in dissonanza -								Rapporto = 1,684		Tonalità in dissonanza
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	Do	La	
Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si	Do	1°	6°	
Do#	Re#	Fa	Fa#	Sol#	La#	Do	Do#	7°	5°+	X
Re	Mi	Fa#	Sol	La	Si	Do#	Re	7°-	5°	
Re#	Fa	Sol	Sol#	La#	Do	Re	Re#	6°	5°-	X
Mi	Fa#	Sol#	La	Si	Do#	Re#	Mi	5°+	4°	X
Fa	Sol	La	La#	Do	Re	Mi	Fa	5°	3°	
Fa#	Sol#	La#	Si	Do#	Re#	Fa	Fa#	5°-	3°-	X
Sol	La	Si	Do	Re	Mi	Fa#	Sol	4°	2°	
Sol#	La#	Do	Do#	Re#	Fa	Sol	Sol#	3°	1°+	X
La	Si	Do#	Re	Mi	Fa#	Sol#	La	3°-	1°	
La#	Do	Re	Re#	Fa	Sol	La	La#	2°	7°	
Si	Do#	Re#	Mi	Fa#	Sol#	La#	Si	1°+	7°-	X

Tab. F - 5 tonalità su 12 risultano in dissonanza -								Rapporto = 1,77		Tonalità in dissonanza
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	Do	La#	
Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si	Do	1°	7°-	
Do#	Re#	Fa	Fa#	Sol#	La#	Do	Do#	7°	6°	
Re	Mi	Fa#	Sol	La	Si	Do#	Re	7°-	5°+	X
Re#	Fa	Sol	Sol#	La#	Do	Re	Re#	6°	5°	
Mi	Fa#	Sol#	La	Si	Do#	Re#	Mi	5°+	5°-	X
Fa	Sol	La	La#	Do	Re	Mi	Fa	5°	4°	
Fa#	Sol#	La#	Si	Do#	Re#	Fa	Fa#	5°-	3°	X
Sol	La	Si	Do	Re	Mi	Fa#	Sol	4°	3°-	
Sol#	La#	Do	Do#	Re#	Fa	Sol	Sol#	3°	2°	
La	Si	Do#	Re	Mi	Fa#	Sol#	La	3°-	1°+	X
La#	Do	Re	Re#	Fa	Sol	La	La#	2°	1°	
Si	Do#	Re#	Mi	Fa#	Sol#	La#	Si	1°+	7°	X

Tab. G - 6 tonalità su 12 risultano in dissonanza -								Rapporto = 1,88		Tonalità in dissonanza
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	Do	Si	
Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si	Do	1°	7°	
Do#	Re#	Fa	Fa#	Sol#	La#	Do	Do#	7°	7°-	
Re	Mi	Fa#	Sol	La	Si	Do#	Re	7°-	6°	
Re#	Fa	Sol	Sol#	La#	Do	Re	Re#	6°	5°+	X
Mi	Fa#	Sol#	La	Si	Do#	Re#	Mi	5°+	5°	X
Fa	Sol	La	La#	Do	Re	Mi	Fa	5°	5°-	X
Fa#	Sol#	La#	Si	Do#	Re#	Fa	Fa#	5°-	4°	X
Sol	La	Si	Do	Re	Mi	Fa#	Sol	4°	3°	
Sol#	La#	Do	Do#	Re#	Fa	Sol	Sol#	3°	3°-	
La	Si	Do#	Re	Mi	Fa#	Sol#	La	3°-	2°	
La#	Do	Re	Re#	Fa	Sol	La	La#	2°	1°+	X
Si	Do#	Re#	Mi	Fa#	Sol#	La#	Si	1°+	1°	X

Tab. H - 6 tonalità su 12 risultano in dissonanza -								Rapporto = 1,42		Tonalità in dissonanza
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	Do	Fa#	
Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si	Do	1°	5°-	X
Do#	Re#	Fa	Fa#	Sol#	La#	Do	Do#	7°	4°	
Re	Mi	Fa#	Sol	La	Si	Do#	Re	7°-	3°	
Re#	Fa	Sol	Sol#	La#	Do	Re	Re#	6°	3°-	
Mi	Fa#	Sol#	La	Si	Do#	Re#	Mi	5°+	2°	X
Fa	Sol	La	La#	Do	Re	Mi	Fa	5°	1°+	X
Fa#	Sol#	La#	Si	Do#	Re#	Fa	Fa#	5°-	1°	X
Sol	La	Si	Do	Re	Mi	Fa#	Sol	4°	7°	
Sol#	La#	Do	Do#	Re#	Fa	Sol	Sol#	3°	7°-	
La	Si	Do#	Re	Mi	Fa#	Sol#	La	3°-	6°	
La#	Do	Re	Re#	Fa	Sol	La	La#	2°	5°+	X
Si	Do#	Re#	Mi	Fa#	Sol#	La#	Si	1°+	5°	X

Tab. I - 6 tonalità su 12 risultano in dissonanza -								Rapporto = 1,60		Tonalità in dissonanza
1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	Do	Sol#	
Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si	Do	1°	5°+	X
Do#	Re#	Fa	Fa#	Sol#	La#	Do	Do#	7°	5°	
Re	Mi	Fa#	Sol	La	Si	Do#	Re	7°-	5°-	X
Re#	Fa	Sol	Sol#	La#	Do	Re	Re#	6°	4°	
Mi	Fa#	Sol#	La	Si	Do#	Re#	Mi	5°+	3°	X
Fa	Sol	La	La#	Do	Re	Mi	Fa	5°	3°-	
Fa#	Sol#	La#	Si	Do#	Re#	Fa	Fa#	5°-	2°	X
Sol	La	Si	Do	Re	Mi	Fa#	Sol	4°	1°+	X
Sol#	La#	Do	Do#	Re#	Fa	Sol	Sol#	3°	1°	
La	Si	Do#	Re	Mi	Fa#	Sol#	La	3°-	7°	
La#	Do	Re	Re#	Fa	Sol	La	La#	2°	7°-	
Si	Do#	Re#	Mi	Fa#	Sol#	La#	Si	1°+	6°	X

4.4 Estrapolazione dei migliori rapporti dimensionali in base all'Acustica Musicale

Risulta ovvio che qualsiasi dimensione spaziale accostata alle dimensioni delle lunghezze d'onda relative alle note musicali, produrrà sempre una qualche dissonanza ma lo scopo di questo articolo è quello di individuare le dimensioni migliori, intendendo con questo termine, quelle dimensioni che daranno luogo ad un minor numero di dissonanze provocate dalle riflessioni.

Tale rapporto si potrà riscontrare nelle Tabb. C – D, che, come viene descritto, solamente 4 tonalità su 12 risulteranno dissonanti. La cosa comunque più interessante risiede nel fatto che i rapporti delle tabelle di cui sopra sono chiamati rapporti perfetti nella letteratura musicale; di conseguenza se sono correlazionabili ad una dimensione spaziale attraverso la lunghezza d'onda anch'essa misurabile in metri, risulta logico pensare che tali rapporti si presteranno maggiormente per delimitare i confini spaziali di un ambiente per concerti o più specificatamente un Teatro d'Opera.

Tab. degli Indici di Preferenza: sintesi delle Tabb. presentate				
<i>Tab</i>	<i>n° di tonalità consonanti</i>	<i>n° di tonalità dissonanti</i>	<i>Indice di preferenza (1÷3)</i>	<i>Rapporti preferiti per il disegno delle piante teatrali</i>
<i>A</i>	6	6	1	1,18
<i>B</i>	6	6	1	1,25
C	8	4	3	1,33
D	8	4	3	1,49
<i>E</i>	6	6	1	1,68
<i>F</i>	7	5	2	1,77
<i>G</i>	6	6	1	1,88
<i>H</i>	6	6	1	1,42
<i>I</i>	6	6	1	1,60

Qualsiasi spazio chiuso per complesso che possa essere si comporterà sempre come un generatore di risonanze relative; queste ultime sono facilmente predicibili per forme di tipo “shoe-box” o comunque semplici (e difficilmente predicibili per spazi

complessi), ma sapendo dalla geometria che qualsiasi spazio complesso e' scomponibile in finiti spazi semplici, il calcolo modale delle 'eigenfrequencies' potra' essere trovato attraverso la composizione in frequenza degli spazi semplici.

Osservando la Tabella degli Indici di Preferenza, si puo' dedurre che i migliori rapporti da rispettare per la progettazione e/o il restauro dei Teatri d'Opera e Auditoria sono quelli inerenti le Tabb. C e D e i corrispettivi rapporti 1,33 e 1,49 relativi ai rapporti musicali di 'quarta perfetta' e 'quinta perfetta' rispettivamente.

Si proporranno adesso due rapporti dimensionali tenendo conto dei principi dell'acustica musicale.

4.5 Confronto fra rapporti

Si esamineranno adesso i rapporti scaturiti dalla correlazione della teoria modale con l'acustica musicale e soprattutto con i migliori rapporti musicali trovati attraverso l'analisi di quest'ultima. I rapporti presentati sono due, M ed N secondo la Tab. 4.6. Il primo (M), presenta le seguenti caratteristiche: il rapporto fra larghezza e altezza e' pari a 1,49 (corrispondente al rapporto perfetto di 5°) mentre il rapporto fra lunghezza e larghezza e' pari a 2 (corrispondente al rapporto di 8°, qui non inserito perche' comunemente accettato come il primo rapporto esprimente la migliore consonanza). Il secondo (N), presenta invece altre caratteristiche come per esempio, il rapporto fra larghezza e altezza e' pari 1,49 come il precedente e quindi corrispondente al rapporto perfetto di 5°; mentre il rapporto fra lunghezza e larghezza, a differenza del precedente M, si e' mantenuto il rapporto di 5°; vediamo i risultati.

	Altezza (relativa)	Larghezza (relativa)	Lunghezza (relativa)
M	10	14,9	29,8
N	10	14,9	22,2

Tab. 4.6. rapporti per la migliore distribuzione dei modi trovati per spazi a sezione rettangolare secondo l'acustica musicale.

4.5.1 Rapporto M

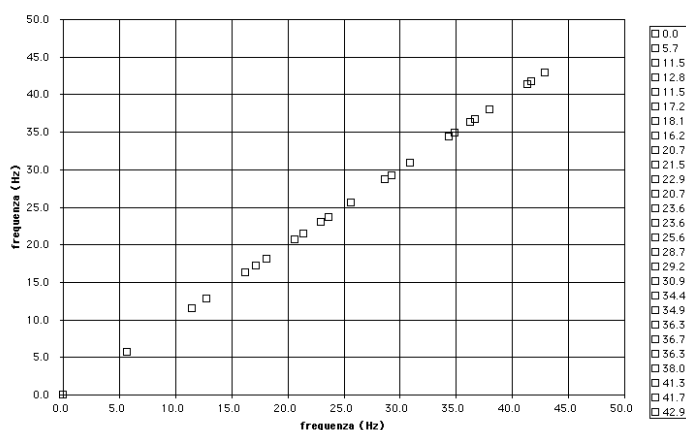


Fig. 4.13. grafico rappresentante la distribuzione dei modi secondo la teoria sviluppata in questa tesi(M).

Numero delle sovrapposizioni modali:			
1°	20,7 Hz ÷ 21,5 Hz	7°	/
2°	23,1 Hz ÷ 23,7 Hz	8°	/
3°	28,8 Hz ÷ 29,4 Hz	9°	/
4°	34,4 Hz ÷ 34,9 Hz	10°	/
5°	36,3 Hz ÷ 36,7 Hz	11°	/
6°	41,4 Hz ÷ 41,8 Hz	12°	/

4.5.2 Rapporto N

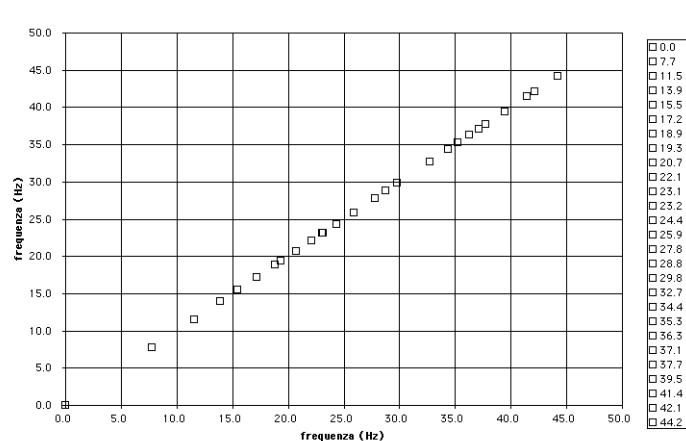


Fig. 4.14. grafico rappresentante la distribuzione dei modi secondo la teoria sviluppata in questa tesi (N).

Numero delle sovrapposizioni modali:			
1°	18,9 Hz ÷ 19,3 Hz	7°	41,4 Hz ÷ 42,1 Hz
2°	27,8 Hz ÷ 28,8 Hz	8°	/
3°	28,8 Hz ÷ 29,8 Hz	9°	/
4°	34,4 Hz ÷ 35,3 Hz	10°	/
5°	36,3 Hz ÷ 37,1 Hz	11°	/
6°	37,1 Hz ÷ 37,7 Hz	12°	/

4.6 Aggiornamento Tab. 4.2

Con i nuovi valori trovati sperimentalmente, si cercherà di fare un confronto con i risultati trovati dagli altri autori di cui al punto 4.2 per verificare l'effettiva utilità della correlazione incrociata fra teoria modale e acustica musicale.

<i>autore</i>		<i>n° delle sovrapposizioni</i>
Sepmeyer	A	9
Sepmeyer	B	10
Sepmeyer	C	9
Louden	D	11
Louden	E	8
Louden	F	12
Volkman	G	12
Boner	H	11
Beranek	I	9
Beranek	L	10
sperimentale	M	6
sperimentale	N	7

Tab. 4.3: riepilogo delle sovrapposizioni modali divise per autore con l'inserimento dei due nuovi dati trovati sperimentalmente attraverso la correlazione fra teoria modale e acustica musicale.

Come si può notare in Tab.4.3, vi è una certa differenza fra i valori che vanno da A a L e quelli ottenuti sperimentalmente con l'ausilio dei rapporti relativi all'acustica musicale; pertanto pur avendo la limitazione che tali dati possono essere solamente applicati a sezioni di ambienti rettangolari, se ne propone un uso più esteso anche per ambienti di forma complessa, come sono appunto i teatri all'italiana. Nei prossimi capitoli si proporranno dei criteri di progetto acustico per i teatri, seguendo anche i principi relativi a questi dati sperimentali.

4.7 Conclusioni

Partendo dall'analisi della teoria modale e delle sue limitazioni, si sono esposti i dati piu' significativi di alcuni importanti autori, riguardanti le migliori proporzioni da adottare per la progettazione e/o la correzione acustica di spazi adibiti all'ascolto musicale. Tali dati sono stati verificati attraverso l'uso dei grafici e dei calcolatori modali (comuni fogli di calcolo) dai quali sono stati estrapolati i dati riguardanti il numero delle sovrapposizioni. Dopo di che e' stata esposta una teoria che prende spunto sia da quella dei modi che dall'acustica musicale e soprattutto dalla struttura armonica del sistema tonale in uso nella musica occidentale, e in ultimo sono stati inseriti tali dati all'interno di un comunissimo calcolatore modale per la verifica. I risultati ottenuti sono piu' che soddisfacenti in quanto questi ultimi dati rappresentano sia per densita' modale che per basso numero di sovrapposizioni modali un importante punto di partenza per la continuazione di questo tipo di studio; come si nota dalla Tab.4.3, i migliori risultati sono quelli ottenuti sperimentalmente in questo studio, infatti le sovrapposizioni modali del *rapporto M*, sono minori rispetto a tutti gli altri rapporti trovati, percentualmente tale rapporto riesce ad abbassare il numero delle sovrapposizioni del 100% rispetto al *rapporto F e G* e del 25% rispetto al *rapporto E* trovato da Loudon (Tab.4.3).

Lo studio dell'acustica dei teatri, penso debba essere fatto alla luce della teoria del sistema musicale armonico tonale per poter meglio effettuare correzioni, restauri nonche' progettazione sia di piccoli spazi (come la buca d'orchestra, i palchetti ecc.) che di grandi spazi (la platea, il palcoscenico ecc.); e soprattutto riguardo a questi ultimi, nei prossimi capitoli si cerchera' di spiegare che la teoria dei Modi puo' essere applicata anche ad ambienti ritenuti grandi come i teatri d'opera, nonostante molti ricercatori sostengono la scarsa efficacia di questo metodo per locali voluminosi.

In ogni caso, pur prendendo atto della teoria riguardante la Frequenza di Schroeder [33], ovvero quella teoria che asserisce che per i grandi spazi i modi non sono riconoscibili o interpretabili come tali, (non si capisce il perché non applicare gli stessi rapporti giudicati ottimi dalla maggior parte dei ricercatori in acustica per ambienti medio-piccoli, anche per locali ritenuti grandi, dato che non è stato ancora provato che essi siano dannosi per la diffusione del suono in questi ambienti. Inoltre secondo me, il concetto di volume V nella formula di Schroeder⁶ è importante ma non sufficiente, dato che non prende in considerazione il concetto di asimmetria di assorbimento (vedi Cap.6), dando per scontato che un ambiente sia generalmente diffuso uniformemente.

Nel prossimo capitolo verrà preso in esame un teatro di medie dimensioni al quale sarà applicato uno studio della risposta all'impulso attraverso il dominio della frequenza e da questa, si vedranno dei risultati che si avvicinano molto alla teoria modale.

Inoltre, in base a questi risultati si può asserire che le vecchie teorie sulla forma e le proporzioni spaziali, adottate da molti progettisti e saggisti teatrali del passato, come Fabrizio Carini-Motta, Pierre Patte, Vitruvio e l'Alberti solo per citare i più conosciuti, si sono dimostrate effettivamente corrette.

⁶ $f_{sc} = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}}$

5.0 La lettura della Risposta all'Impulso nel dominio della frequenza

5.1 Breve introduzione teorica

Tale tipo di analisi eseguita su segnali non stazionari e transitori, richiede di sapere quale segmento temporale e' stato oggetto dell'analisi e soprattutto per quanto riguarda il caso dei transitori, e' inoltre importante sapere che il segnale sia stato analizzato interamente e senza interruzioni. Gli algoritmi di calcolo detti *Fast Fourier Transform*, *FFT*, introdotti nella analisi con metodi numerici basati sulla *Discrete Fourier Transform*, *DFT*, permettono di ridurre il numero di operazioni per trasformare una serie temporale di N elementi, da N^2 della *DFT* a $N\log_2 N$. L'analizzatore di spettro basato su *FFT* e' in grado di eseguire l'analisi senza perdere segmenti temporali del segnale, infatti i filtri digitali hanno bisogno di un tempo di calcolo relativo alle operazioni di filtraggio e del valore efficace rilevato, il quale deve essere minore di t_s , reciproco della frequenza di campionamento, per essere nella condizione di poter processare ogni campione in arrivo dal convertitore *A/D*.

5.2 Analisi della Risposta all'Impulso

Come gia' accennato nel Capitolo 2, le Risposte all'Impulso sono 80 e di tipo binaurale, di cui 40 con la sorgente nella buca d'orchestra in 20 posizioni differenti suddivise in 4 file, e altrettante con la sorgente sul palcoscenico in 20 posizioni differenti anche queste suddivise in 4 file. Per quanto riguarda il ricevente, si ricorda che e' stato posto solamente in 2 posizioni, la prima in platea e la seconda nei palchetti superiori e piu' precisamente nei palchetti del 3° ordine.

La procedura seguita e' stata la seguente; le 80 risposte all'impulso sono state ridotte ad un numero inferiore dato che per questo tipo di analisi si ricavano una quantita' di dati

di gran lunga superiore all'analisi temporale, di conseguenza sono state scelte le risposte all'impulso piu' significative e piu' rispondenti alla realta' di una comune performance teatrale (orchestra/cantanti). Sono state scelte le prime due file poste sia nella buca d'orchestra che nello stage e di queste sono state recuperate quelle relative alla parte centrale (sia della buca d'orchestra che dello stage), nonche' quelle agli estremi destro e sinistro di ogni sorgente; in totale quindi sono state scelte 24 risposte all'impulso rientranti nelle posizioni come si vede in Fig. 5.1, n°1-3-5 della prima fila e n°6-8-10 della seconda fila.

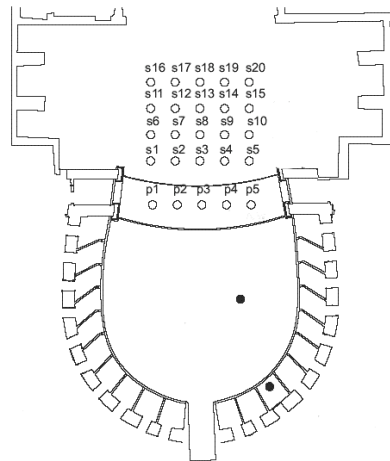


Fig. 5.1: pianta del Teatro Nuovo con il posizionamento delle sorgenti e dei riceventi (p1, p2 ecc rappresentano i punti sorgente nella buca d'orchestra, mentre s1, s2 ecc rappresentano i punti sorgente sullo stage o palcoscenico). Come si puo' notare le posizioni scelte per questa analisi sono rappresentate dalle posizioni centrali nonche' dalle posizioni laterali di destra e sinistra.

Le file successive sono state anche scartate per i seguenti motivi, la buca d'orchestra del Teatro Nuovo ha una profondita' eccessiva e quindi raramente si potranno disporre tanti musicisti quanti ne puo' contenere il volume, ed inoltre le file piu' caratteristiche sono proprio quelle file come la prima, perche' e' nella parte scoperta rispetto allo stage ed e' perfettamente sottostante l'arco scenico, e la seconda fila invece, perche' e' situata nella parte sottostante lo stage o palcoscenico. Per quanto riguarda invece la scelta delle sorgenti nel palcoscenico si sono scelte le stesse prime due file perche' quelle piu' vicine

al pubblico e quindi anche all'arco scenico e si presume siano le posizioni migliori per i cantanti.

La procedura di analisi e' la seguente: una volta individuato il punto di arrivo del suono diretto t_d , si sono calcolati 10 ms per fare il primo rilievo e cosi' via fino ad arrivare ad un numero di 8 rilievi cadenzati ogni 10 ms, per un totale quindi di 80 ms. In una risposta all'impulso secondo molti studiosi, non e' necessario andare oltre gli 80 ms dato che sono le prime riflessioni a determinare qualitativamente uno spazio come differenza fra i vari punti di ascolto, infatti esse sono costituite da riflessioni intense e isolate; invece le riflessioni successive sono piu' rappresentative dei fenomeni stazionari. Secondo il Cremer [34] il dettaglio della risposta all'impulso non e' importante oltre una quantita' da lui stabilita, ovvero: $t_{st} = 2\sqrt{V}$ (dove V e' il volume della sala) e dato che il volume della sala del Teatro Nuovo e' di circa 3000 m^3 , di conseguenza nel nostro caso avremo $t_{st} = 109 \text{ ms}$; ma dato che la durata dei transitori della maggior parte degli strumenti musicali e' inferiore ai 100 ms [31], mi sono adattato a questo schema temporale per l'analisi in frequenza.

5.3 Scelta delle frequenze

Le frequenze inserite nelle tabelle successive sono state scelte in base alla frequenza di picco (maggiore intensita' per frequenza) presente in ogni scansione che come abbiamo detto e' stata fatta ogni 10 ms, il range delle frequenze considerate varia da 40-1000 Hz. Tali punti di massimo, in teoria, non possono essere chiamati Modi in quanto secondo la Teoria di Schroeder [33], quando la frequenza della sorgente e' bassa per l'ambiente in considerazione, la pressione sonora, sebbene somma di infiniti contributi modali, e' dominata dalla somma in ampiezza e fase di pochi modi; mentre all'aumentare della frequenza la densita' modale e quindi il grado di sovrapposizione o *modal overlap*,

cresce, e quindi si dice che la frequenza e il grado di sovrapposizione modale sono direttamente proporzionali. La pressione sonora in un punto dell'ambiente, e' il risultato della combinazione di numerosi modi eccitati in risonanza per i quali si ritiene essere casuali e quindi cio' comporta che l'ampiezza della pressione sonora risultante assume le caratteristiche di una variabile aleatoria, la cui densita' di probabilita' e' indipendente dal tipo di ambiente, dalla forma, dal volume:

$$f_s \approx \frac{5400}{\sqrt{(V \langle \delta_n \rangle)}} \text{ Hz} \approx 2000 \sqrt{\frac{T}{V}}, \quad (5.1)$$

dove, T = tempo di riverbero e V= volume dell'ambiente

pur non essendo completamente d'accordo con tale teoria, di cui alla formula (5.1) perche' troppo riduttiva, mi atterro' a quanto comunemente viene accettato come la Frequenza di Schroeder. Di conseguenza tali punti di massimo verranno qui identificati come Livelli di Picco Ambientale (LPA).

5.4 Livelli di Picco Ambientale (lettura in frequenza della R.I.)

Questi livelli di picco vengono chiamati ambientali in quanto si presume un legame o meglio una derivazione direttamente dall'ambiente esaminato (in questo caso il Teatro Nuovo), attraverso la loro lunghezza d'onda che come si sa:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (5.2)$$

dove λ = lunghezza d'onda, c= velocita' del suono, f= frequenza

ma soprattutto relativo alla 4.1 modificata in quanto sono stati scartati i termini relativi ai modi obliqui e tangenziali e quindi fatto riferimento solamente ai modi assiali, come:

$$f_n = \frac{c}{2} \left(\frac{n_x}{l_x} \right) \quad (5.3)$$

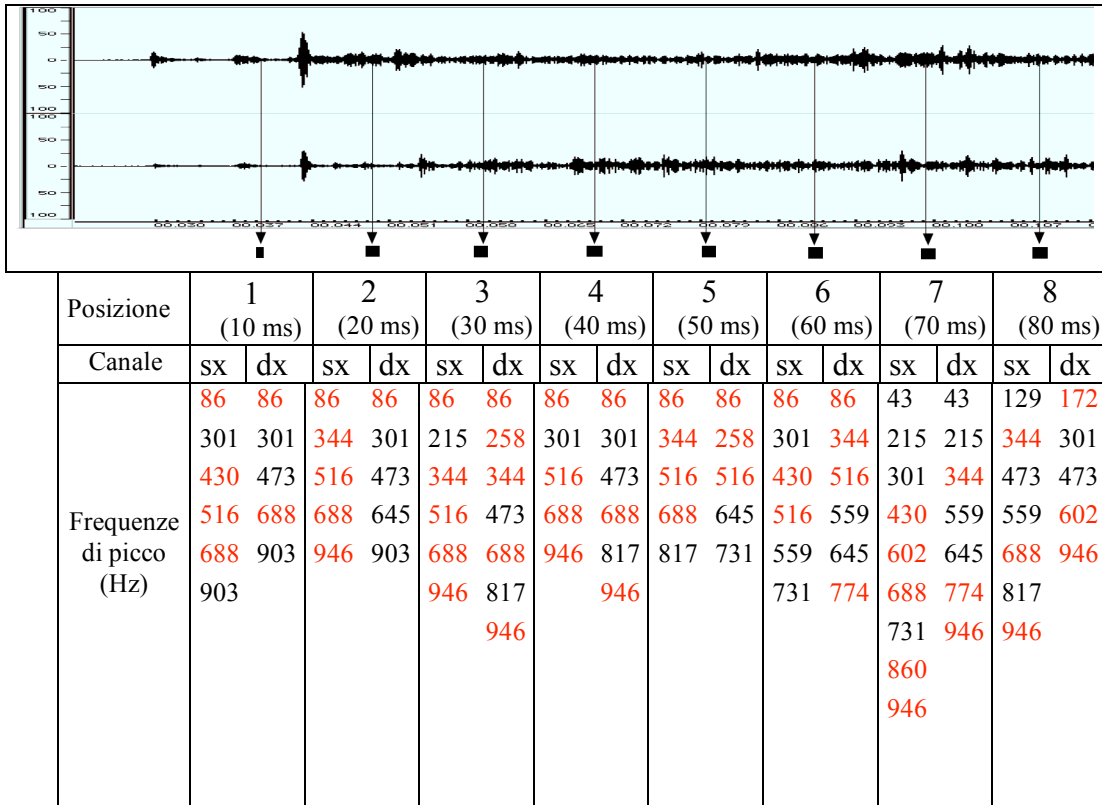
dove, n_x = numero intero relativo all'ordine del modo, l_x = lunghezza relativa ad uno spazio.

5.5 Presentazione delle tavole relative al sistema sorgente-ricevitore: orchestra-platea.

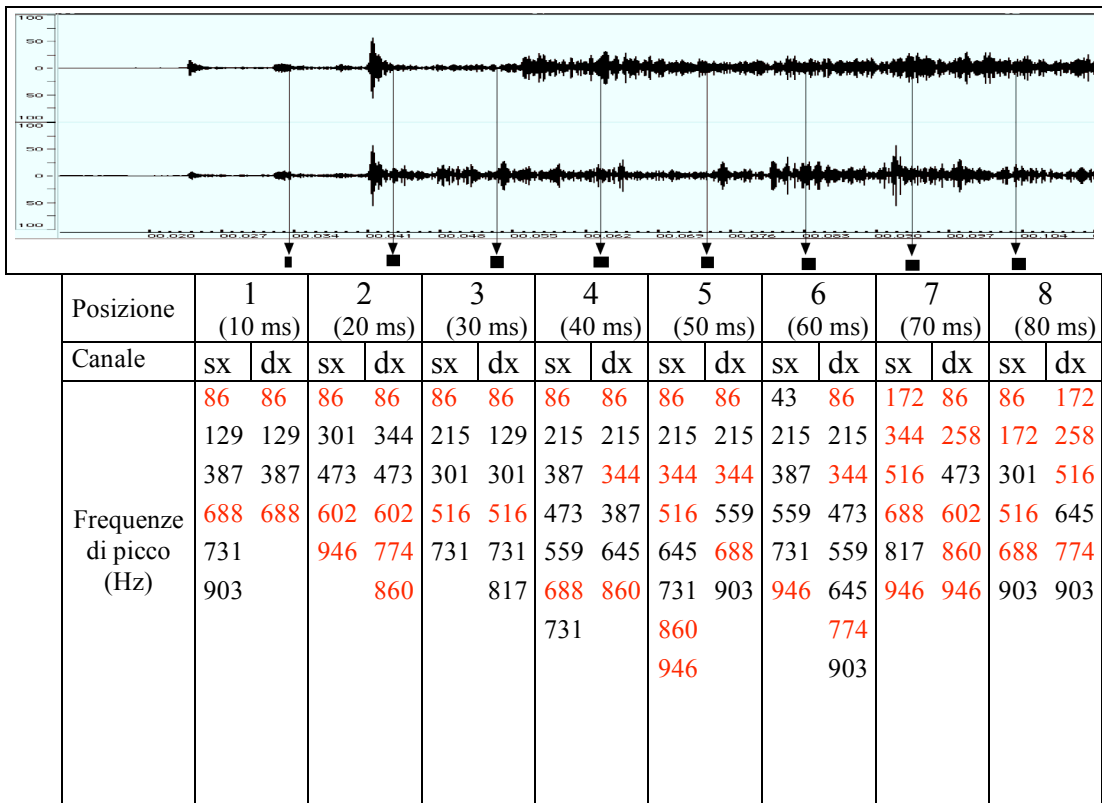
Nelle pagine successive verranno inserite le tabelle relative alla lettura in frequenza della risposta all'impulso (sorgente: buca d'orch. e ricevente: platea); la metodologia di impaginazione, vista la mole di spettri presentata, e' dovuta al fatto che si necessita di comprovare visivamente il risultato della risposta all'impulso attraverso le frequenze derivate. Nella prima pagina vengono presentate due risposte all'impulso con le relative tabelle riportanti le frequenze di picco rilevate, nelle due pagine successive verranno presentati gli spettri della R.I. (n° 8 spettri per ogni ripresa in ogni pagina) relativi alle risposte all'impulso con la tabella delle frequenze incorporata, e così' per le altre.

Come si puo' vedere ad esempio nella sezione 5.5.1, nella parte sottostante la risposta all'impulso, vi sono riportate in tabella, tutte le serie di frequenze rispondenti ai picchi trovati per ogni scansione temporale fatta; all'interno di ogni fila vi sono alcune frequenze stampate in colore rosso e altre in colore nero. Le frequenze relative al colore rosso sono state così' contraddistinte perche' sono frequenze multiple della frequenza relativa allo 86 Hz, mentre invece quelle di colore nero sono così' contraddistinte perche' sono frequenze multiple della frequenza relativa al 43 Hz.

5.5.1 orchestra-platea 1



5.5.2 orchestra-platea 3



5.5.3 Spettrogrammi: orchestra-platea 01

- Tempo di arrivo dell'impulso diretto (t_d) = 29,5 ms (1304pt)
- Sorgente: buca orchestrale 01
- Ricevente (testa artificiale binaurale; sx: nero; dx: grigio): Platea.

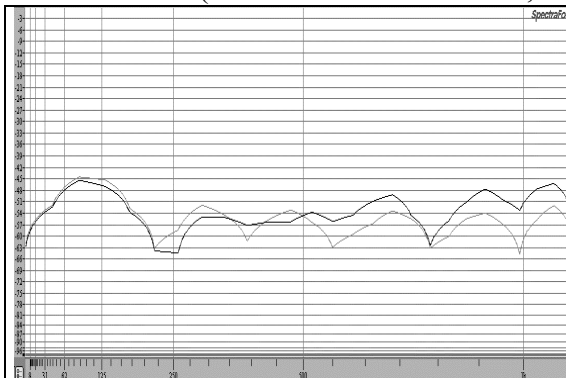


Fig. 5.2: 10ms dal segnale diretto.

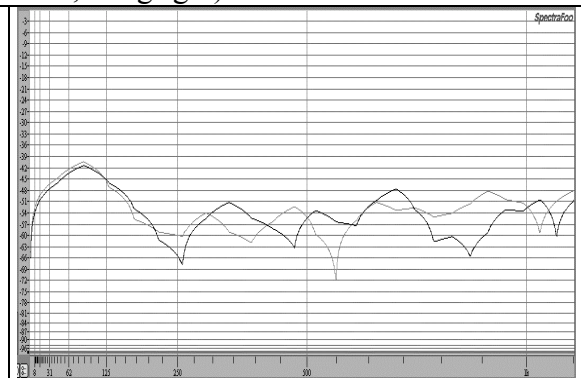


Fig. 5.3: 20ms dal segnale diretto.

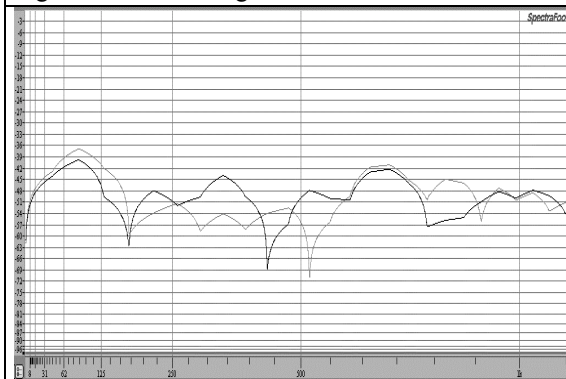


Fig. 5.4: 30ms dal segnale diretto.

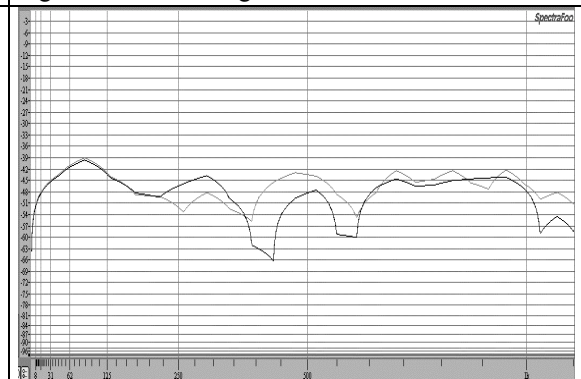


Fig. 5.5: 40ms dal segnale diretto.

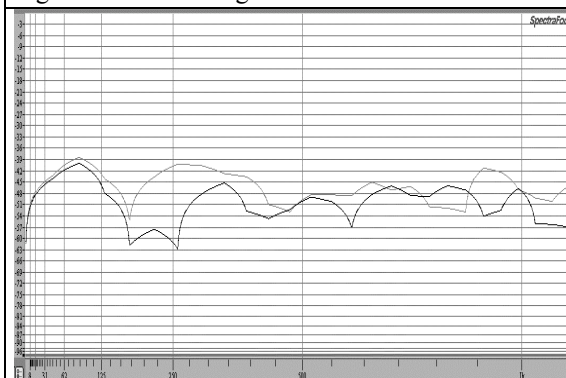


Fig. 5.6: 50ms dal segnale diretto.

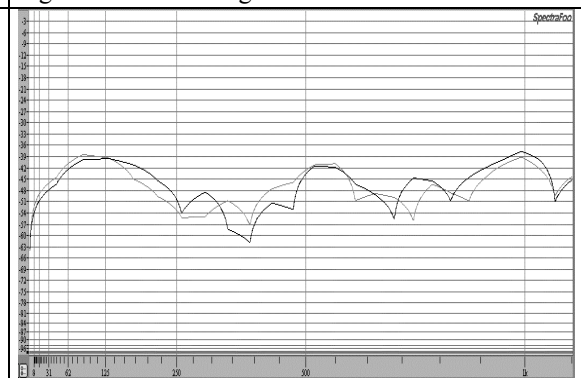


Fig. 5.7: 60ms dal segnale diretto.

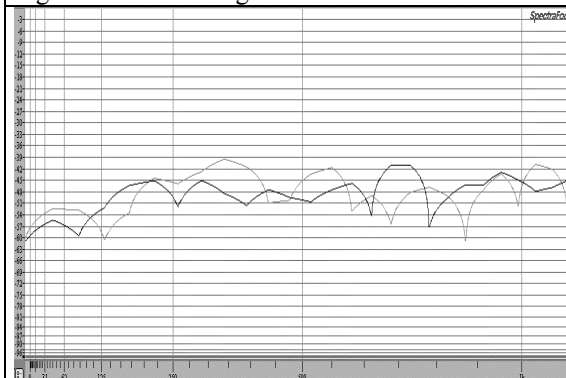


Fig. 5.8: 70ms dal segnale diretto.

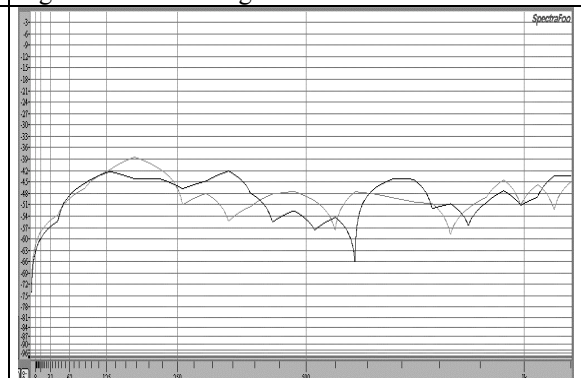


Fig. 5.9: 80ms dal segnale diretto.

5.5.4 Spettrogrammi: orchestra-platea 03

- Tempo di arrivo dell'impulso diretto (t_d) = 23,5 ms (1040 pt)
- Sorgente: buca orchestrale 03
- Ricevente (testa artificiale binaurale; sx: nero; dx: grigio): Platea.

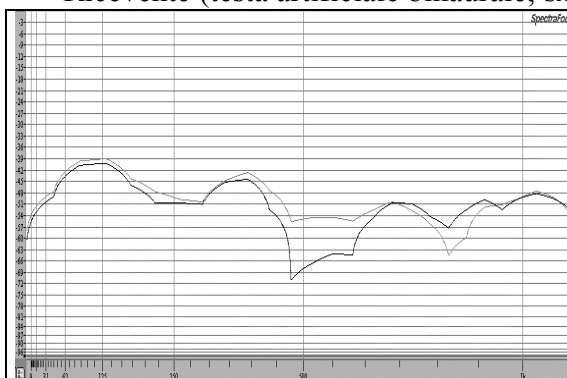


Fig. 5.10: 10ms dal segnale diretto.

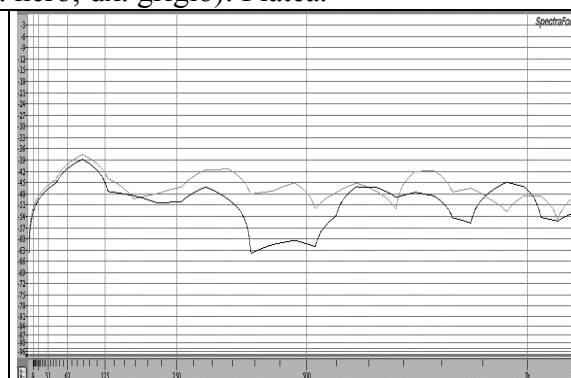


Fig. 5.11: 20ms dal segnale diretto.

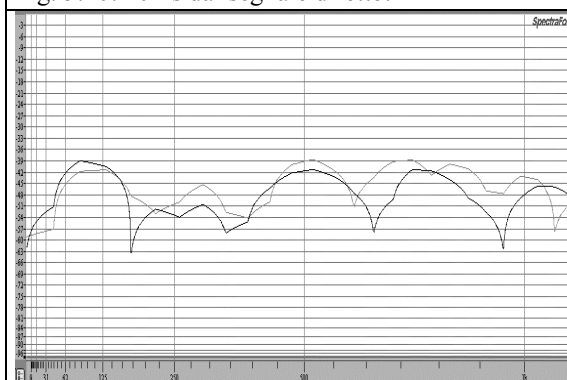


Fig. 5.12: 30ms dal segnale diretto.

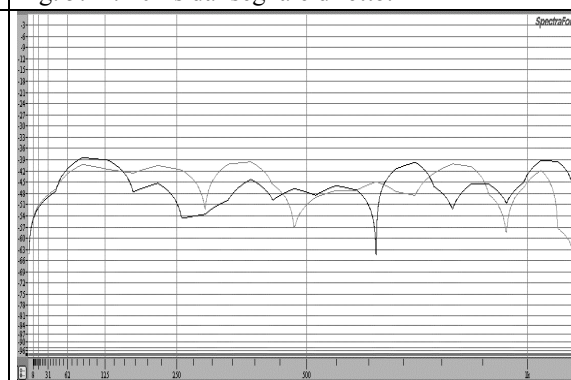


Fig. 5.13: 40ms dal segnale diretto.

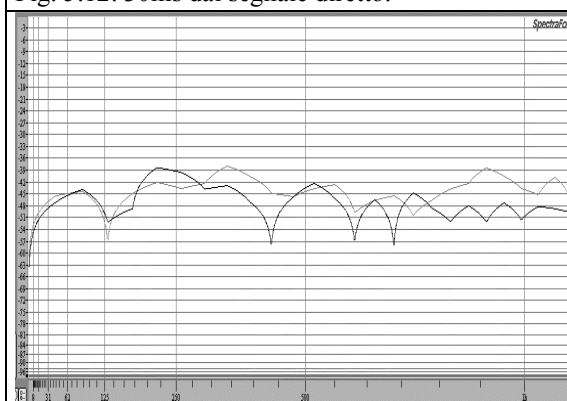


Fig. 5.14: 50ms dal segnale diretto.

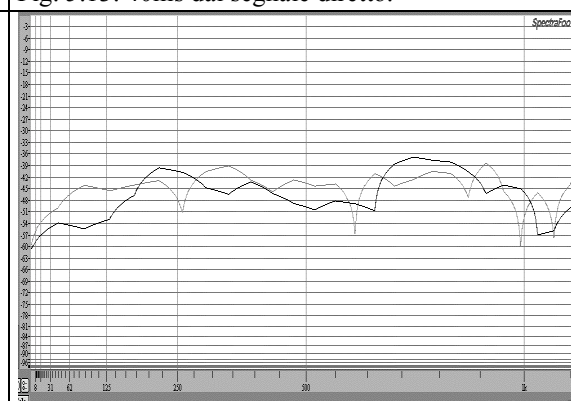


Fig. 5.15: 60ms dal segnale diretto.

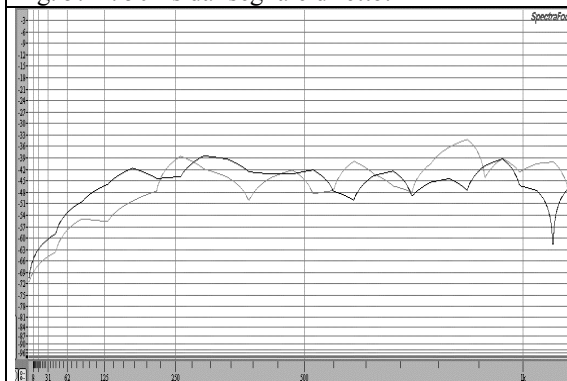


Fig. 5.16: 70ms dal segnale diretto.

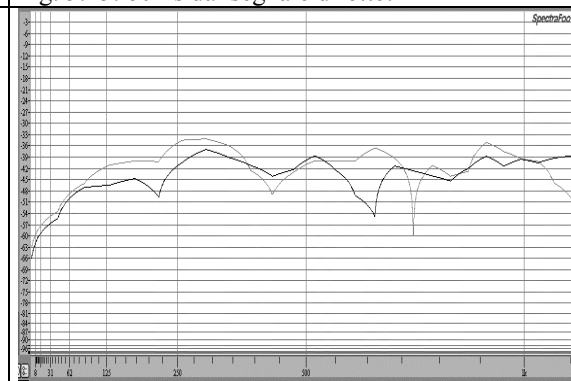
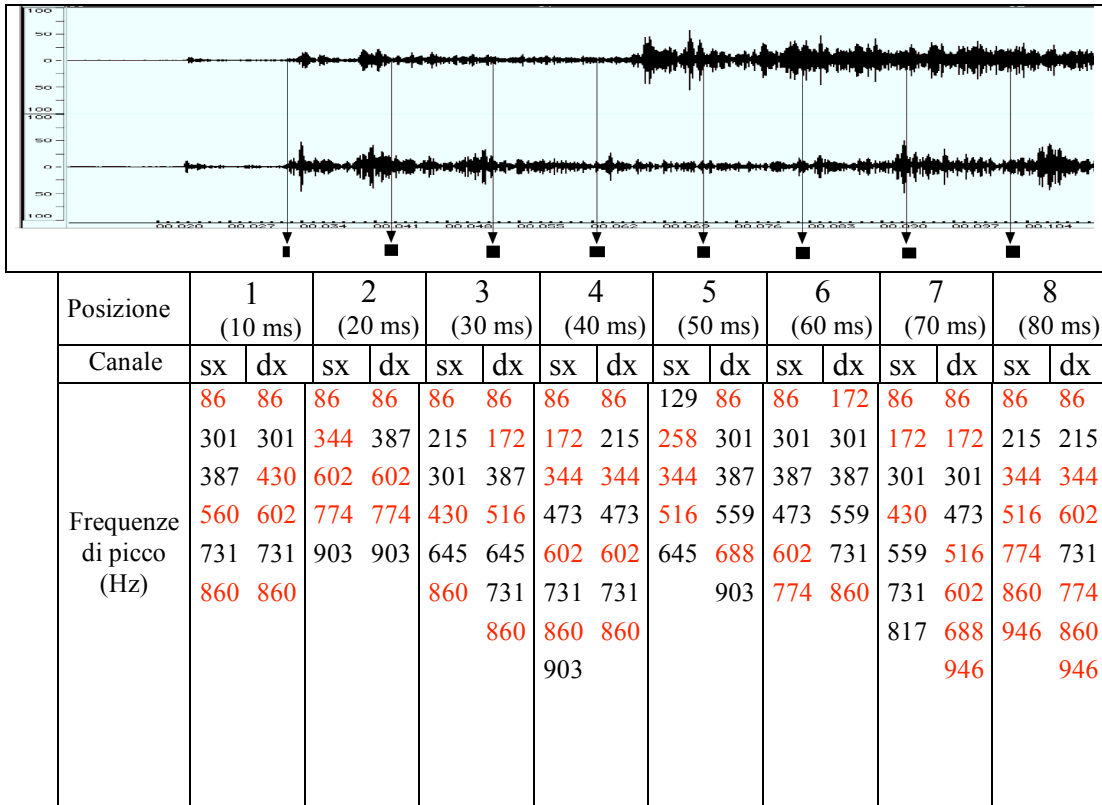
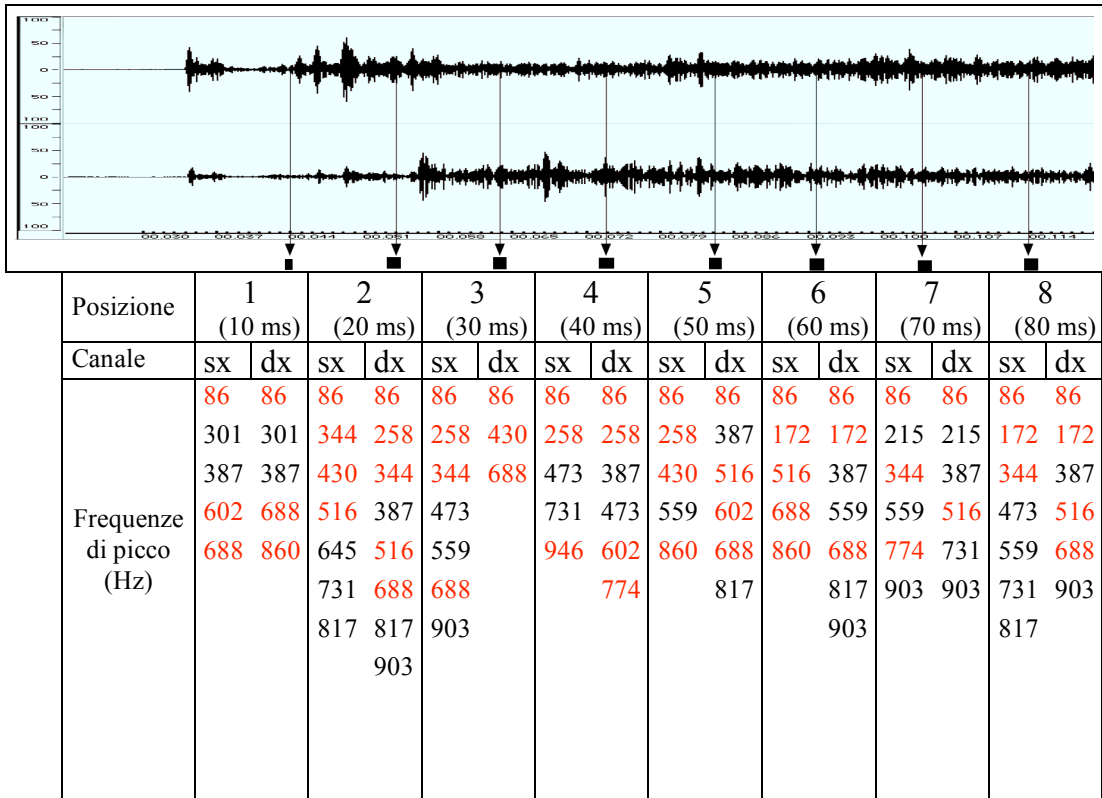


Fig. 5.17: 80ms dal segnale diretto.

5.5.5 orchestra-platea 5



5.5.6 orchestra-platea 6



5.5.7 Spettrogrammi: orchestra-platea 05

- Tempo di arrivo dell'impulso diretto (t_d) = 22,5 ms (994 pt)
- Sorgente: buca orchestrale 05
- Ricevente (testa artificiale binaurale; sx: nero; dx: grigio): Platea.

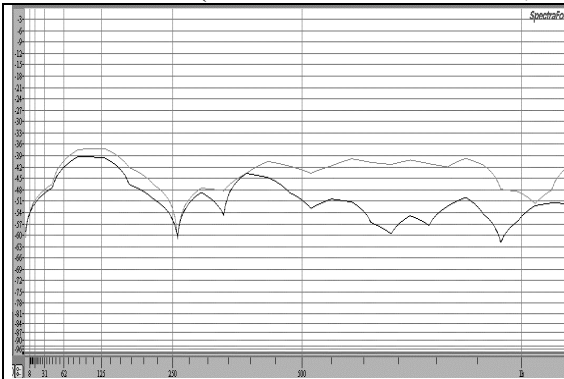


Fig. 5.18: 10ms dal segnale diretto.

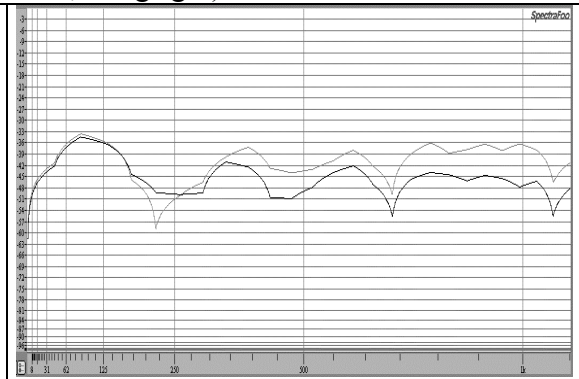


Fig. 5.19: 20ms dal segnale diretto.

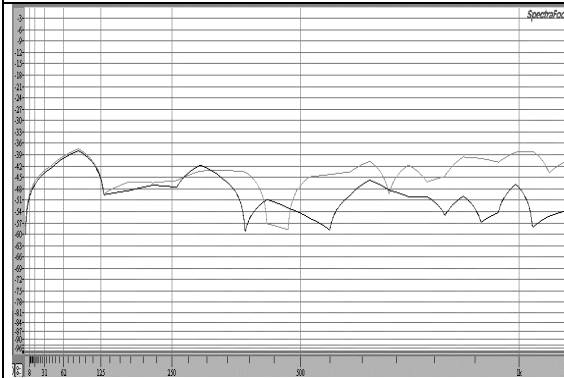


Fig. 5.20: 30ms dal segnale diretto.

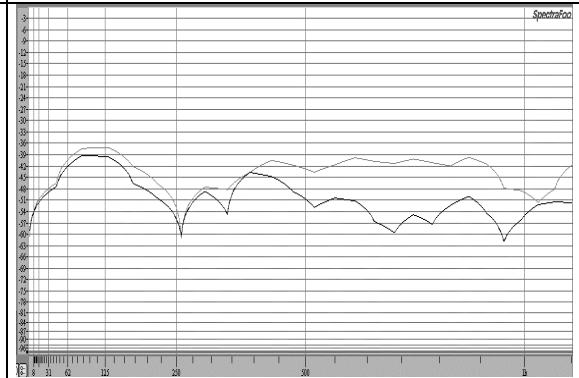


Fig. 5.21: 40ms dal segnale diretto.

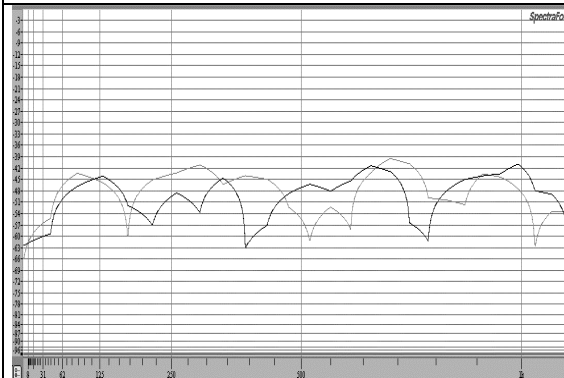


Fig. 5.22: 50ms dal segnale diretto.

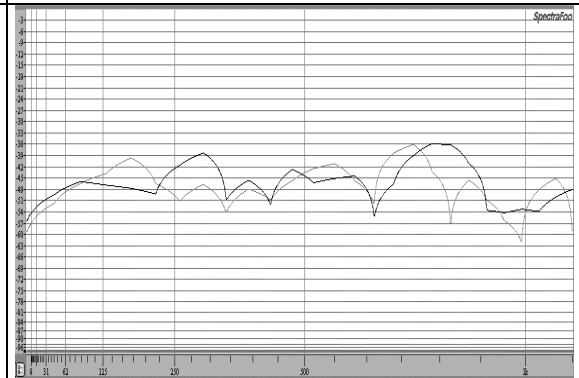


Fig. 5.23: 60ms dal segnale diretto.

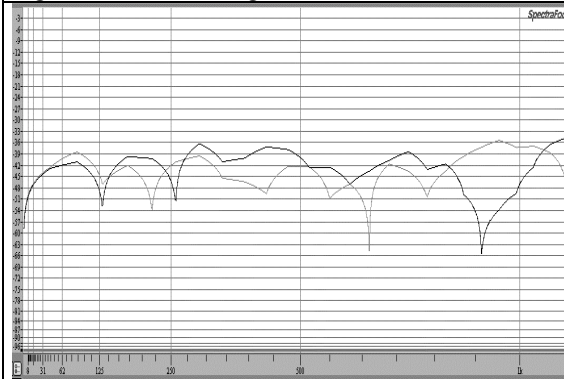


Fig. 5.24: 70ms dal segnale diretto.

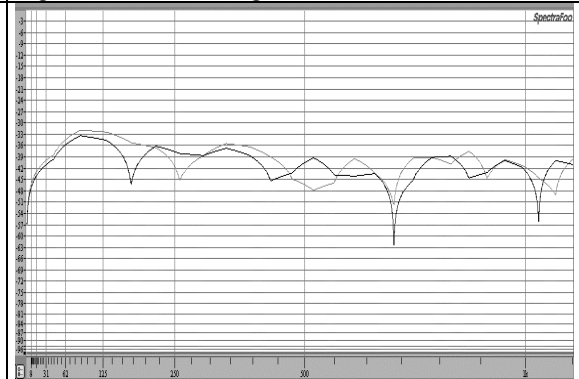


Fig. 5.25: 80ms dal segnale diretto.

5.5.8 Spettrogrammi: orchestra-platea 06

- Tempo di arrivo dell'impulso diretto (t_d) = 34 ms (1496 pt)
- Sorgente: buca orchestrale 06
- Ricevente (testa artificiale binaurale; sx: nero; dx: grigio): Platea.

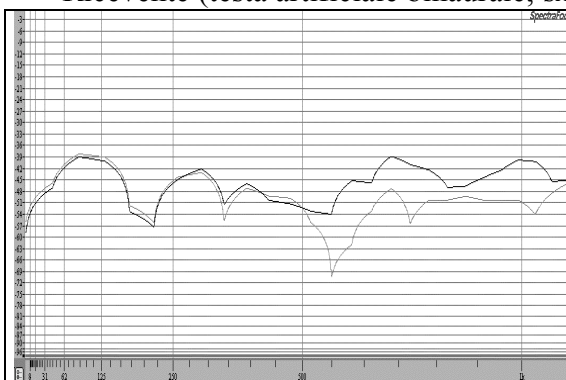


Fig. 5.26: 10ms dal segnale diretto.

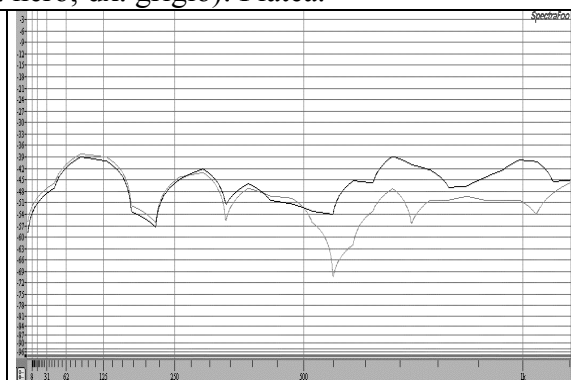


Fig. 5.27: 20ms dal segnale diretto.

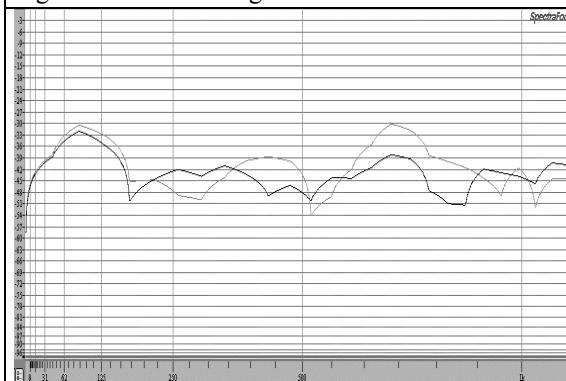


Fig. 5.28: 30ms dal segnale diretto.

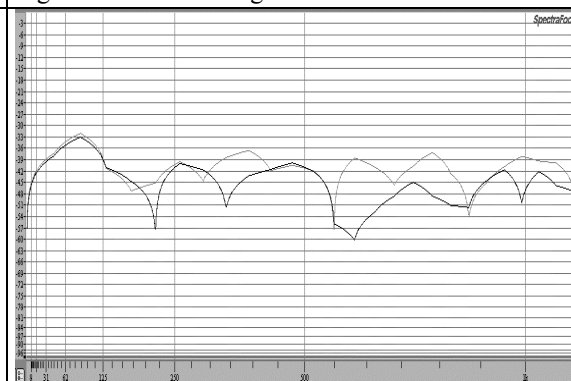


Fig. 5.29: 40ms dal segnale diretto.

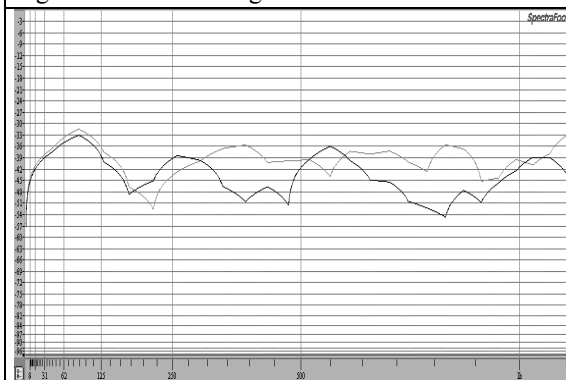


Fig. 5.30: 50ms dal segnale diretto.

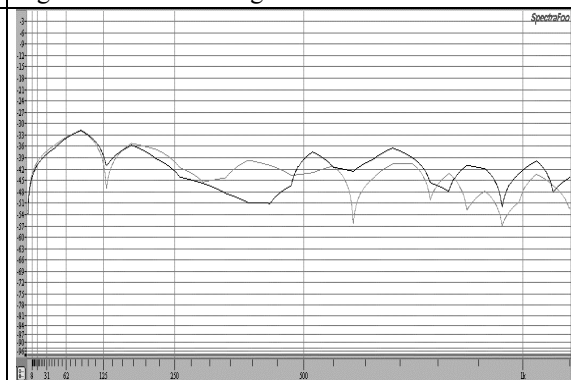


Fig. 5.31: 60ms dal segnale diretto.

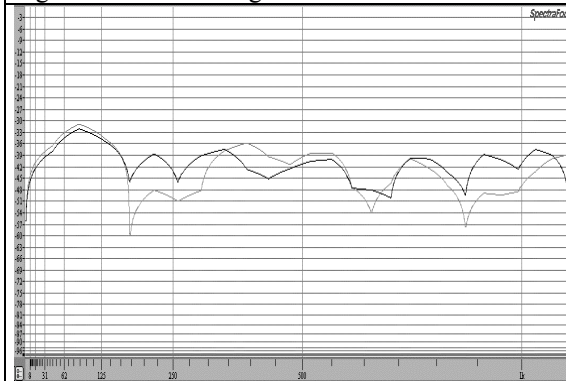


Fig. 5.32: 70ms dal segnale diretto.

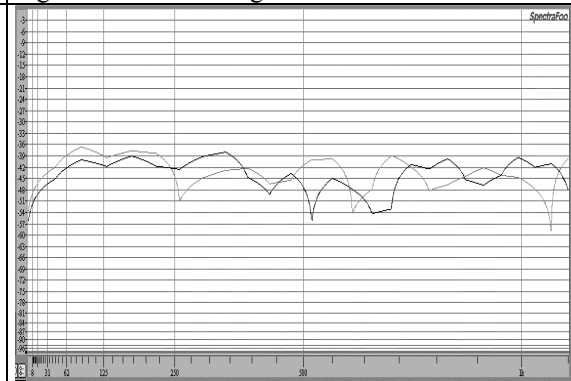
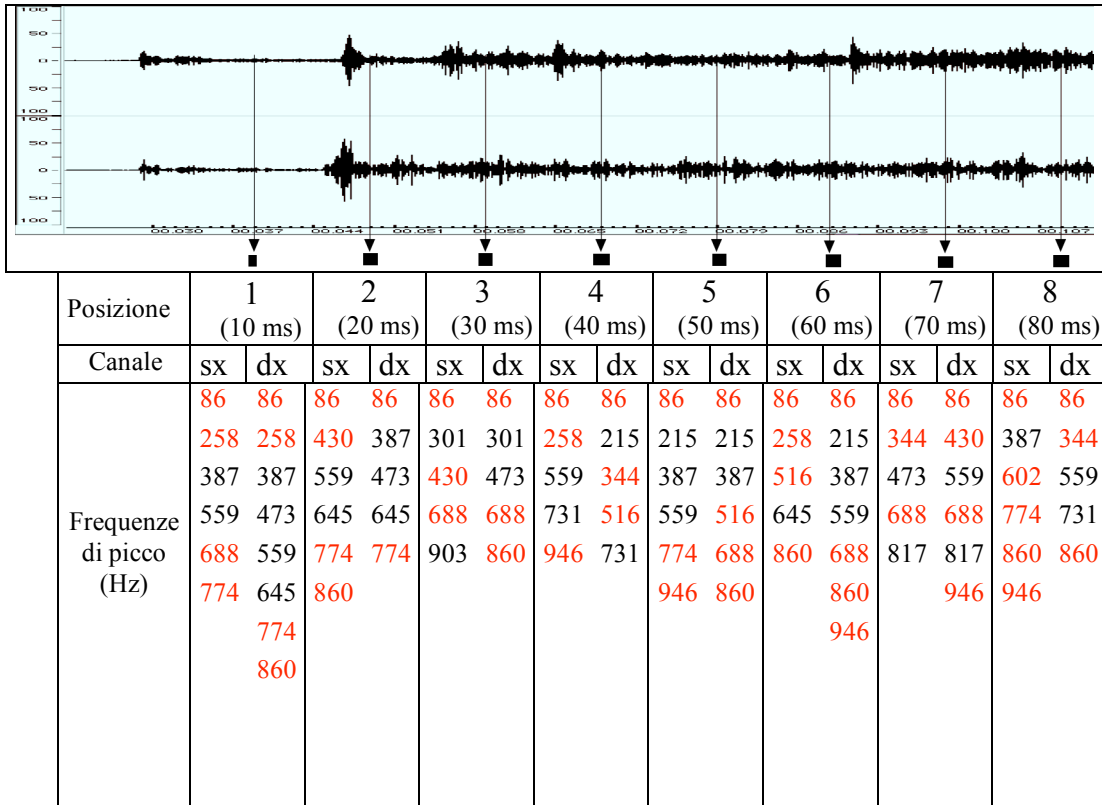
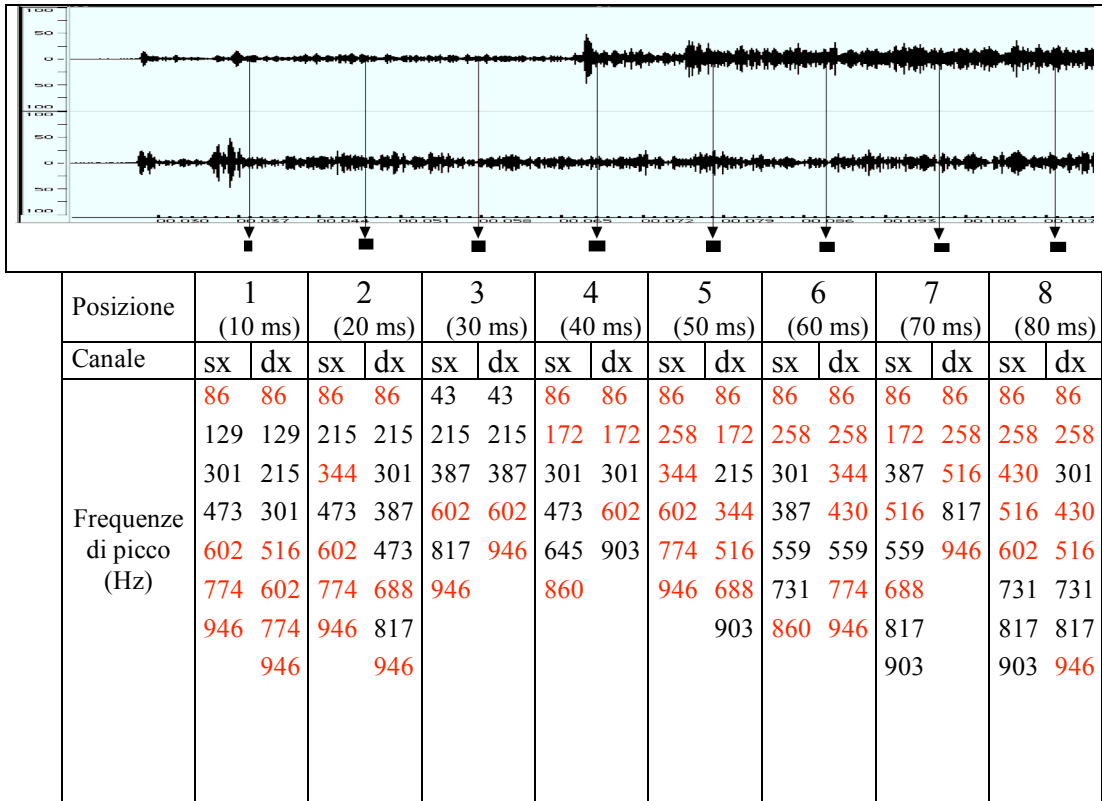


Fig. 5.33: 80ms dal segnale diretto.

5.5.9 orchestra-platea 8



5.5.10 orchestra-platea 10



5.5.11 Spettrogrammi: orchestra-platea 08

- Tempo di arrivo dell'impulso diretto (t_d) = 28,9 ms (1276 pt)
- Sorgente: buca orchestrale 08
- Ricevente (testa artificiale binaurale; sx: nero; dx: grigio): Platea.

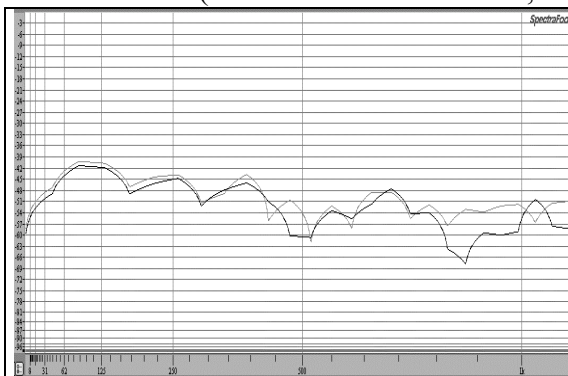


Fig. 5.34: 10ms dal segnale diretto.

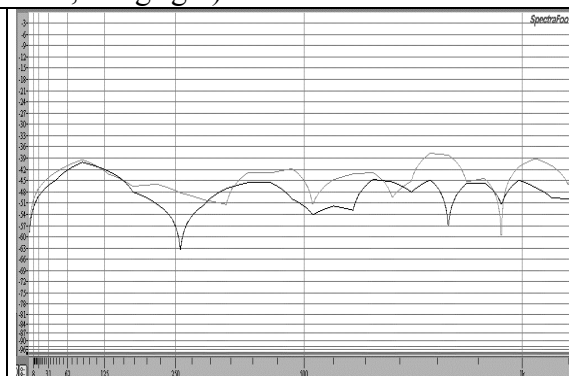


Fig. 5.35: 20ms dal segnale diretto.

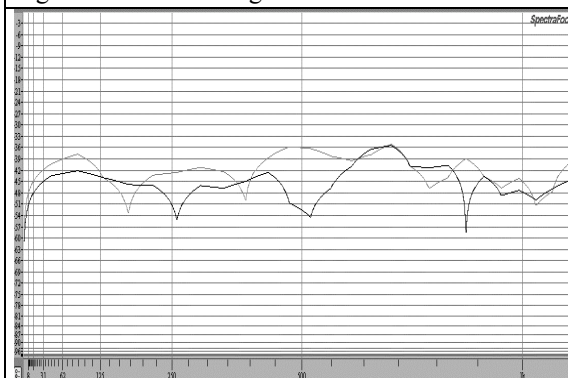


Fig. 5.36: 30ms dal segnale diretto.

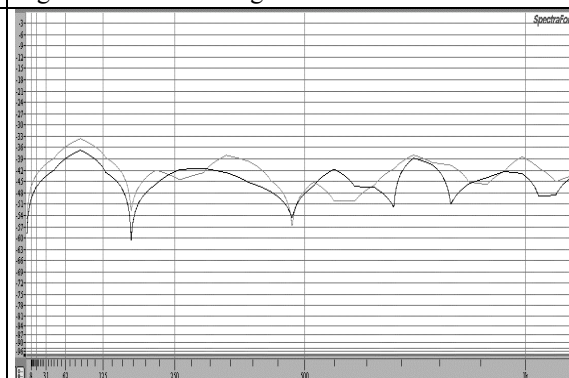


Fig. 5.37: 40ms dal segnale diretto.

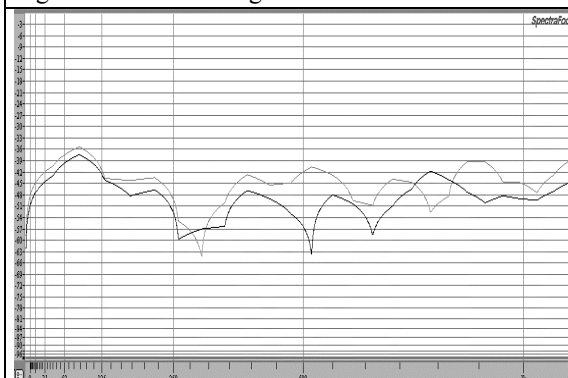


Fig. 5.38: 50ms dal segnale diretto.

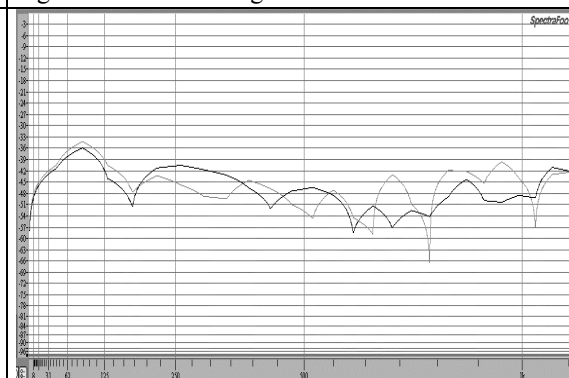


Fig. 5.39: 60ms dal segnale diretto.

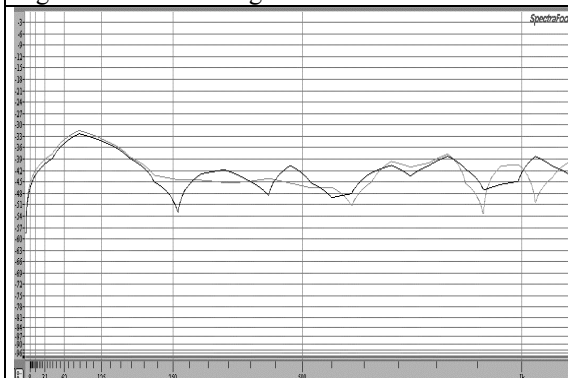


Fig. 5.40: 70ms dal segnale diretto.

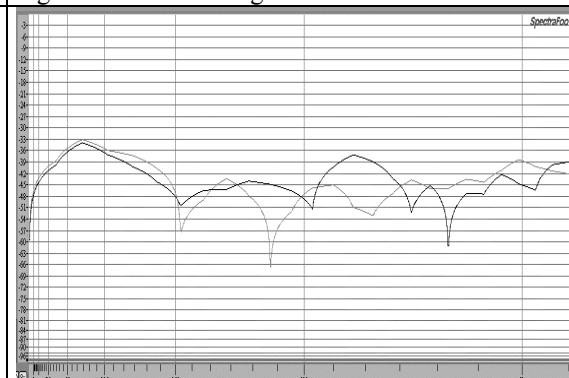


Fig. 5.41: 80ms dal segnale diretto.

5.5.12 Spettrogrammi: orchestra-platea 10

- Tempo di arrivo dell'impulso diretto (t_d) = 28,1 ms (1240 pt)
- Sorgente: buca orchestrale 10
- Ricevente (testa artificiale binaurale; sx: nero; dx: grigio): Platea.

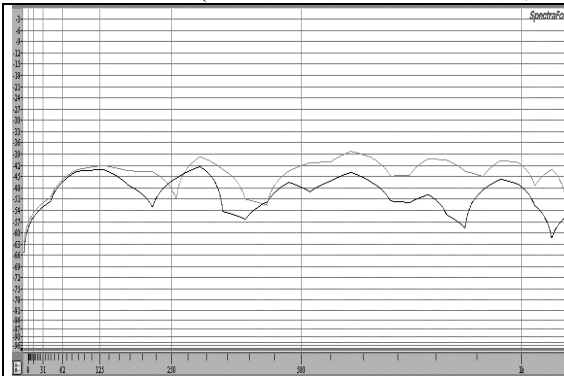


Fig. 5.42: 10ms dal segnale diretto.

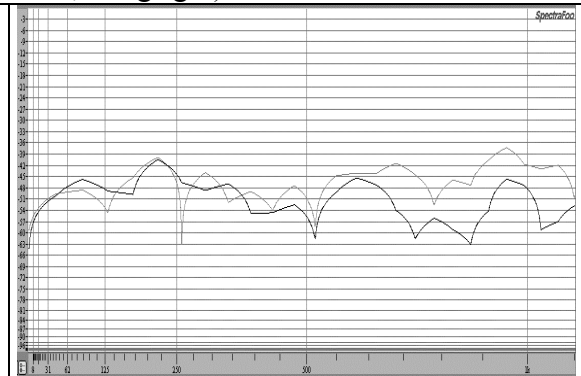


Fig. 5.43: 20ms dal segnale diretto.

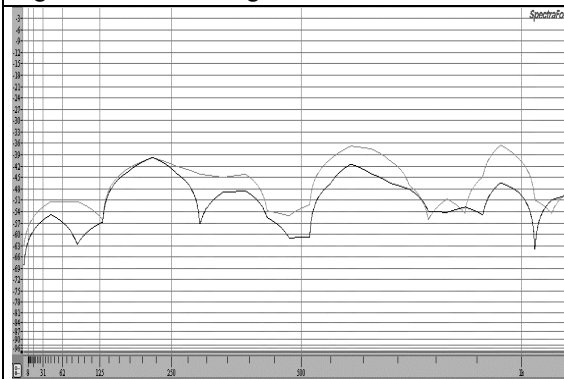


Fig. 5.44: 30ms dal segnale diretto.

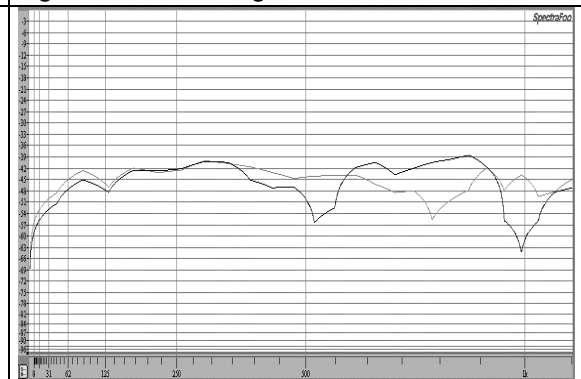


Fig. 5.45: 40ms dal segnale diretto.

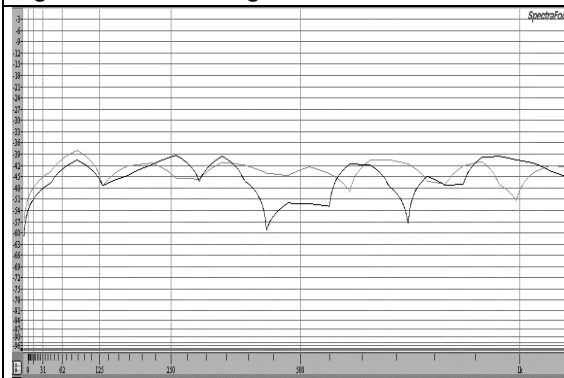


Fig. 5.46: 50ms dal segnale diretto.

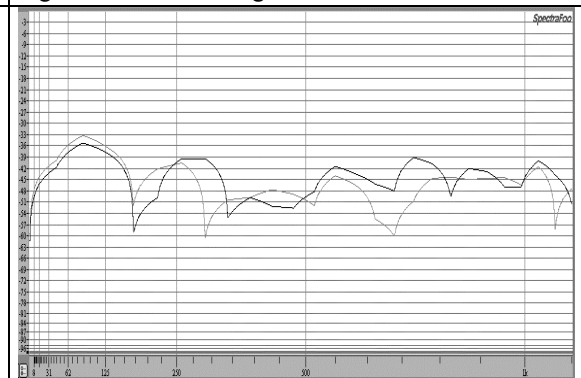


Fig. 5.47: 60ms dal segnale diretto.

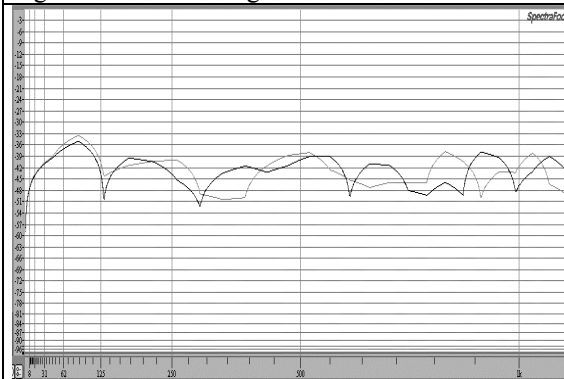


Fig. 5.48: 70ms dal segnale diretto.

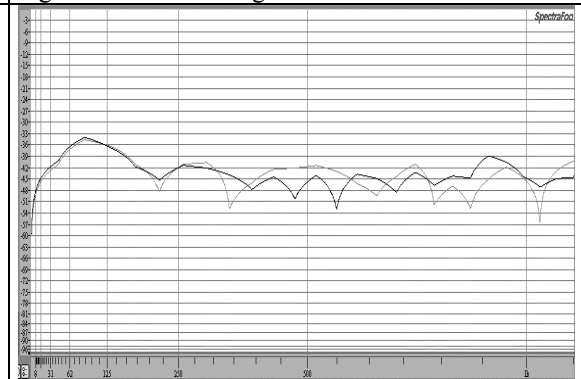


Fig. 5.49: 80ms dal segnale diretto.

5.6 Punti di coerenza nelle frequenze di picco (orchestra-platea).

Dopo una breve ma approfondita analisi delle frequenze di picco riscontrate negli spettrogrammi esposti dalla Fig.5.2 a Fig.49, quindi n°48 spettrogrammi che si sviluppano entro una gamma che va da 40 Hz a 1 kHz, si nota che vi sono delle frequenze che si ripetono costantemente e cio' unicamente attraverso l'osservazione dei picchi che si ripetono nel tempo, senza per ora, tenere in conto il livello di intensita'. Le frequenze che tendono a ripetersi sono circa ventidue, appartenenti come si puo' notare, a due multipli fondamentali che sono il 43 Hz e lo 86 Hz; pur essendo in rapporto di ottava sara' importante tenerle divise, come si vedra' in seguito. Esponiamo adesso tramite la Tab.5.1 le frequenze trovate negli spettrogrammi delle pagine precedenti.

Frequenze relative al 43 Hz	Frequenze relative al 86 Hz
43	86
129	172
215	258
301	344
387	430
473	516

Tab. 5.1: frequenze di picco entro la gamma dei 516 Hz

Ovviamente la frequenza del 43 Hz rientra in tutte le frequenze relative allo 86 Hz, ma in base alle ipotesi fatte in questo studio, queste sono derivanti da ambienti accoppiati aventi delle dimensioni molto simili e apparentemente legate alle frequenze di cui alla Tab.5.1 (per facilita' di lettura, considerando la mole dei dati, si e' preferito inserire le frequenze rientranti nella gamma 40 Hz ÷ 516 Hz).

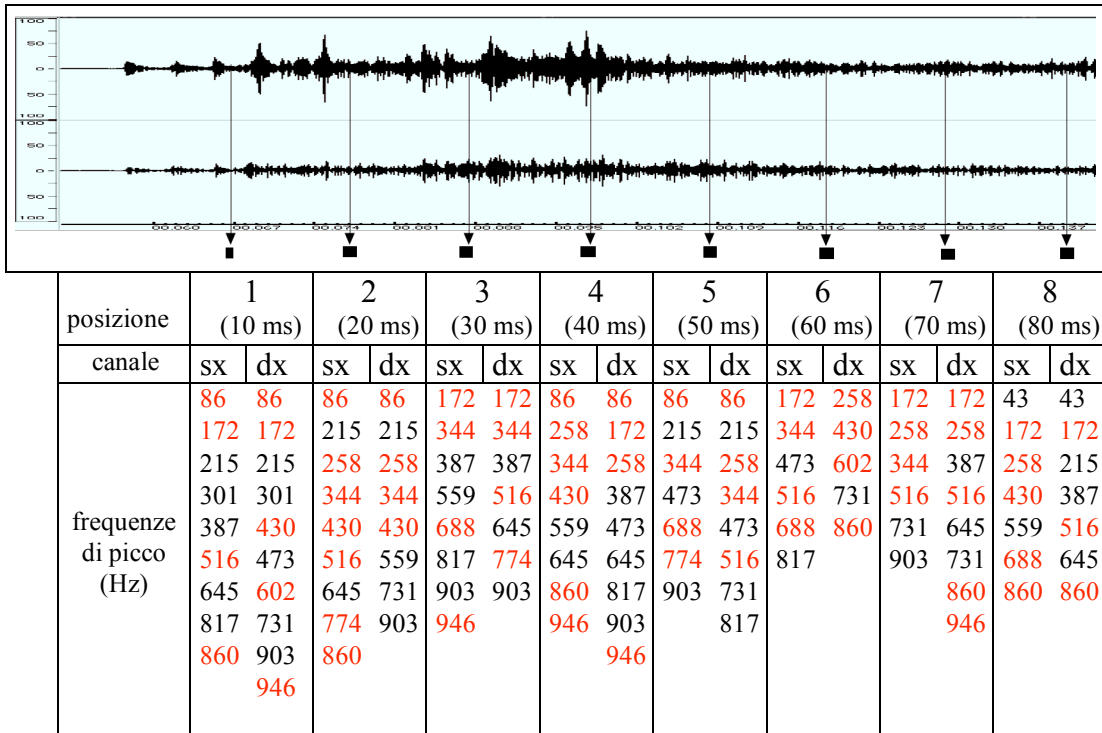
Come si nota nella maggior parte degli spettrogrammi delle figure che vanno da Fig.5.2 a Fig.5.49, e quindi in n°48 spettrogrammi relativi al sistema sorgente-ricevitore, buca d'orchestra-platea rispettivamente (ed estrapolando solamente quelle frequenze con le intensita' piu' elevate), vi sono molte piu' frequenze relative allo 86 Hz che non al 43 Hz ma soprattutto, la cui *fondamentale* (1° frequenza di picco piu' bassa con cui inizia uno

spettrogramma, fattore questo, di indiscutibile importanza), e' un multiplo dello 86 Hz. In generale si puo' ammettere che le frequenze relative al 43 Hz (multipli dispari, in quanto quelli pari potrebbero appartenere allo 86 Hz), si presentano sia come *fondamentali* che come maggioranza percentuale, solamente nelle ultime scansioni temporali relative ai 70 ms e 80 ms, come si nota negli spettrogrammi (5.5.3), (5.5.4) e (5.5.7) inerente il sistema sorgente-ricevitore, orchestra-platea 01, 03 e 05 (sorgenti poste in buca ma al di sotto dell'arco scenico e non dello stage come le altre sorgenti orchestra-platea 06, 08 e 10). Cio' avviene perche' le riflessioni derivanti dal soffitto, relative ai tempi anzidetti, tendono a produrre riflessioni aventi frequenze di picco relative ai multipli dispari del 43 Hz. Quindi e' necessario fare una ulteriore differenziazione per il ricevitore posto in platea: le sorgenti sotto l'arco scenico essendo piu' vicine alle riflessioni provenienti dal soffitto e oltretutto, non trovandosi sotto lo stage, (nelle prime riflessioni successive) riescono ad influenzare il ricevitore posto in platea attraverso le riflessioni provenienti dalla copertura, mentre le sorgenti che rimangono sotto lo stage, conservano l'influenza che la buca stessa imprime allo spettro.

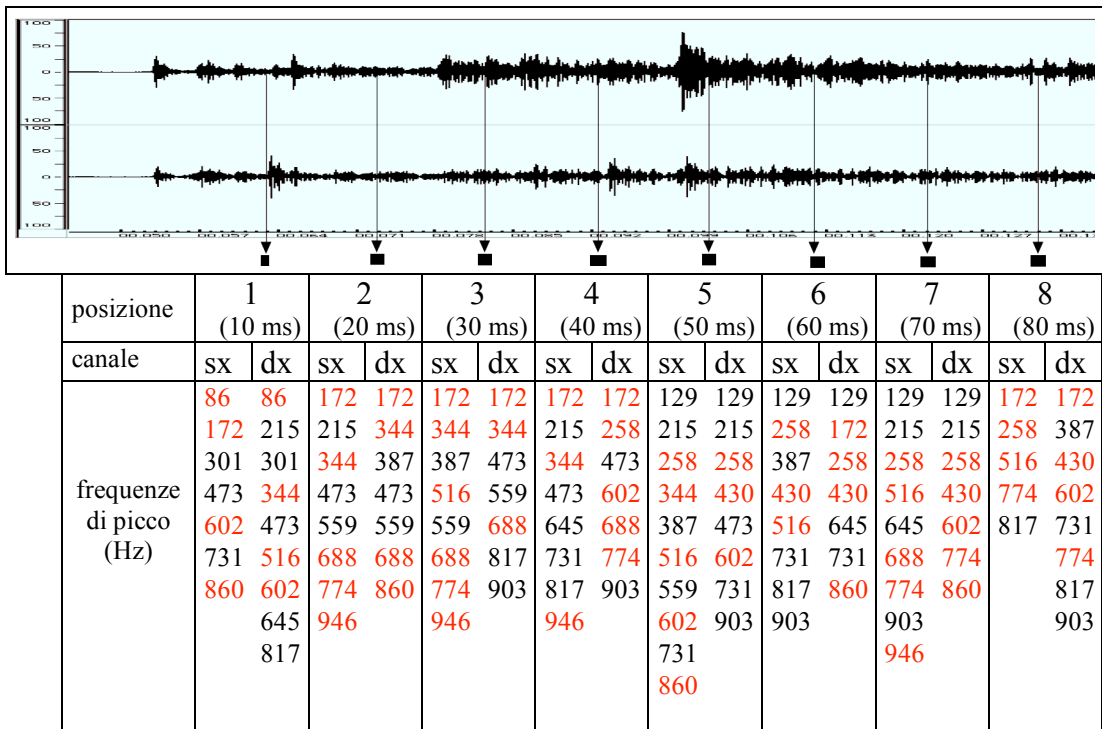
5.7 Presentazione delle tavole relative al sistema sorgente-ricevitore: orchestra-galleria.

Coerentemente, come nel paragrafo (5.5), verranno presentati i risultati della lettura in frequenza della risposta all'impulso del sistema sorgente-ricevitore relativo alla sorgente posta nella buca d'orchestra (in n°6 punti differenti) e il ricevente posto in galleria o meglio nel 3° ordine dei palchetti.

5.7.1 orchestra-galleria 1



5.7.2 orchestra-galleria 3



5.7.3 Spettrogrammi: orchestra-galleria 1

- Tempo di arrivo dell'impulso diretto (t_d) = 57,4ms (2532pt)

- Sorgente: buca orchestrale 1
- Ricevente (testa artificiale binaurale; sx: nero; dx: grigio): Palco 3° ordine

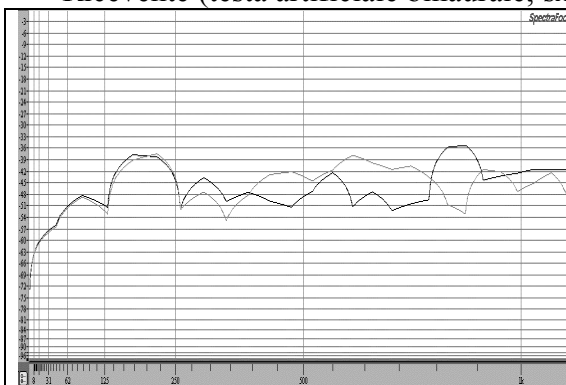


Fig. 5.50: 10 ms dal segnale diretto.

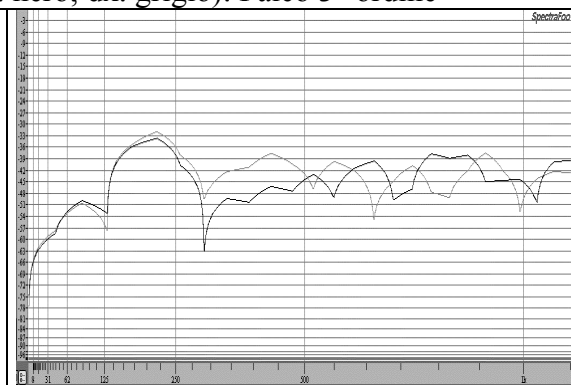


Fig. 5.51: 20 ms dal segnale diretto

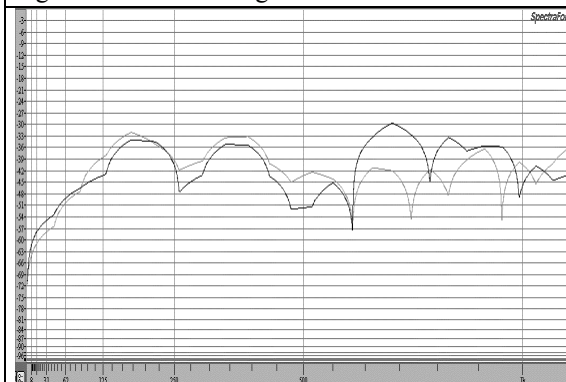


Fig. 5.52: 30 ms dal segnale diretto.

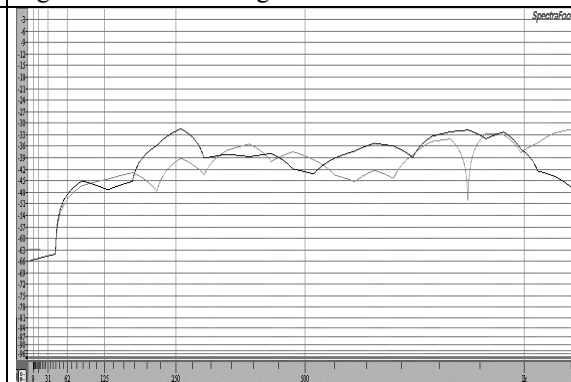


Fig. 5.53: 40 ms dal segnale diretto.

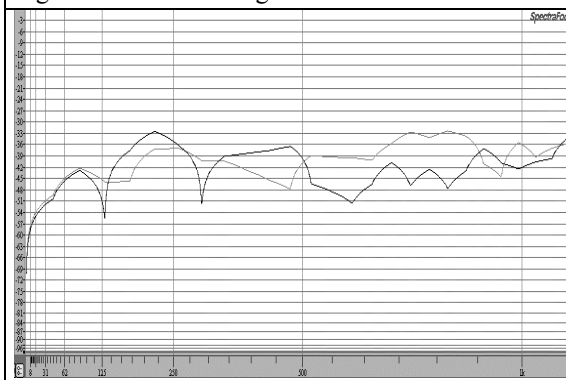


Fig. 5.54: 50 ms dal segnale diretto.

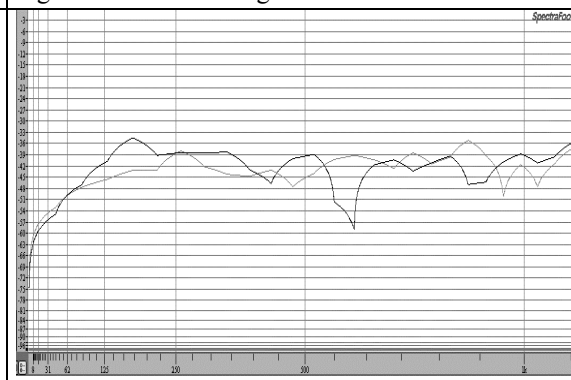


Fig. 5.55: 60 ms dal segnale diretto.

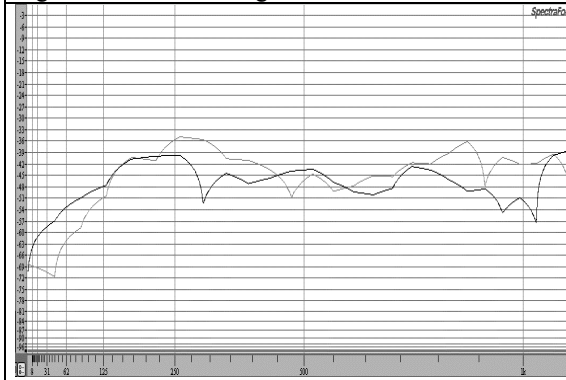


Fig. 5.56: 70 ms dal segnale diretto.

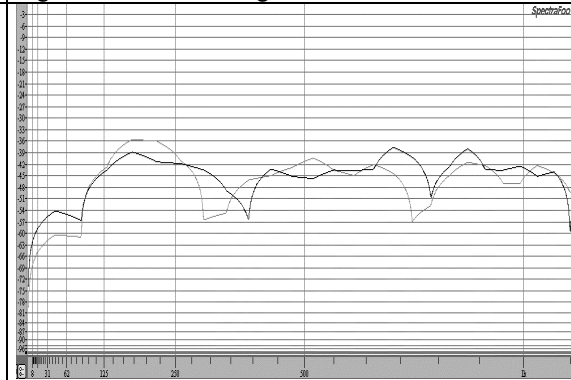


Fig. 5.56: 80 ms dal segnale diretto.

5.7.4 Spettrogrammi: orchestra-galleria 3

- Tempo di arrivo dell'impulso diretto (t_d) = 52,8ms (2332pt)
- Sorgente: buca orchestrale 3
- Ricevente (testa artificiale binaurale; sx: nero; dx: grigio): Palco 3° ordine

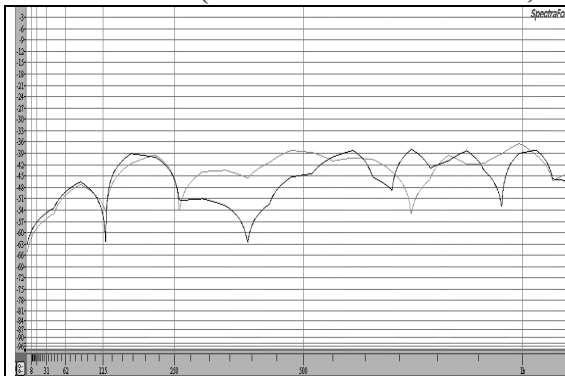


Fig. 5.57: 10ms dal segnale diretto.

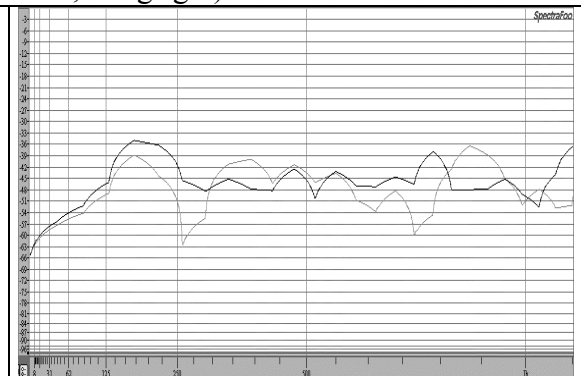


Fig. 5.58: 20ms dal segnale diretto.

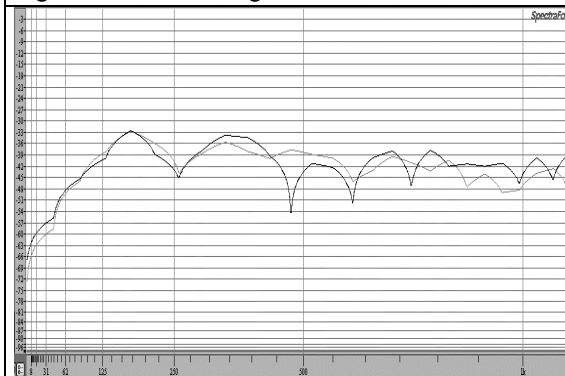


Fig. 5.59: 30ms dal segnale diretto.

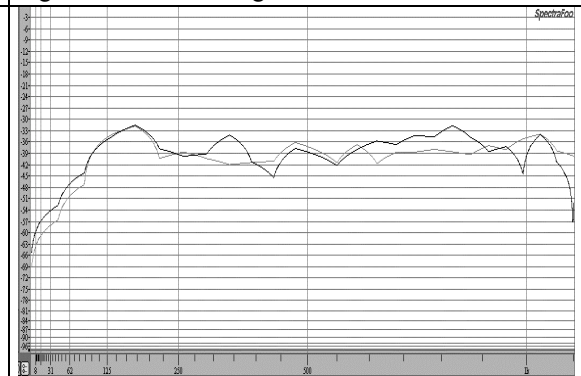


Fig. 5.60: 40ms dal segnale diretto.

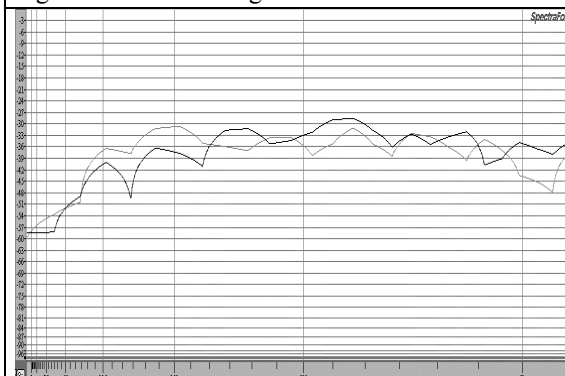


Fig. 5.61: 50ms dal segnale diretto.

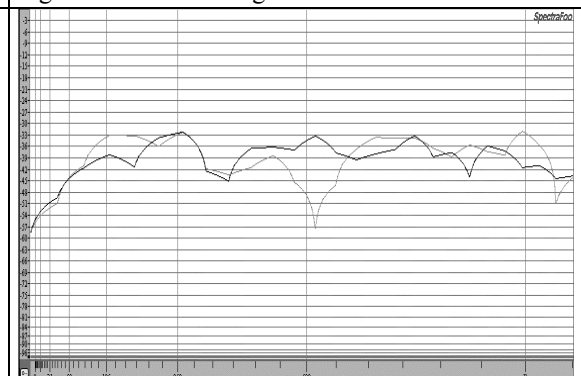


Fig. 5.62: 60ms dal segnale diretto.

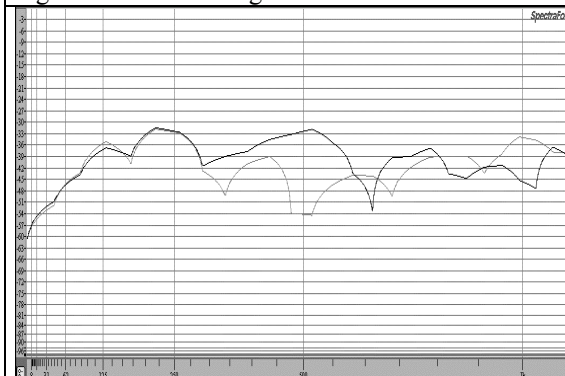


Fig. 5.63: 70ms dal segnale diretto.

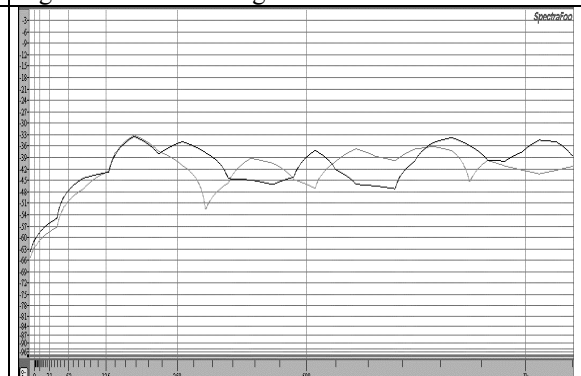
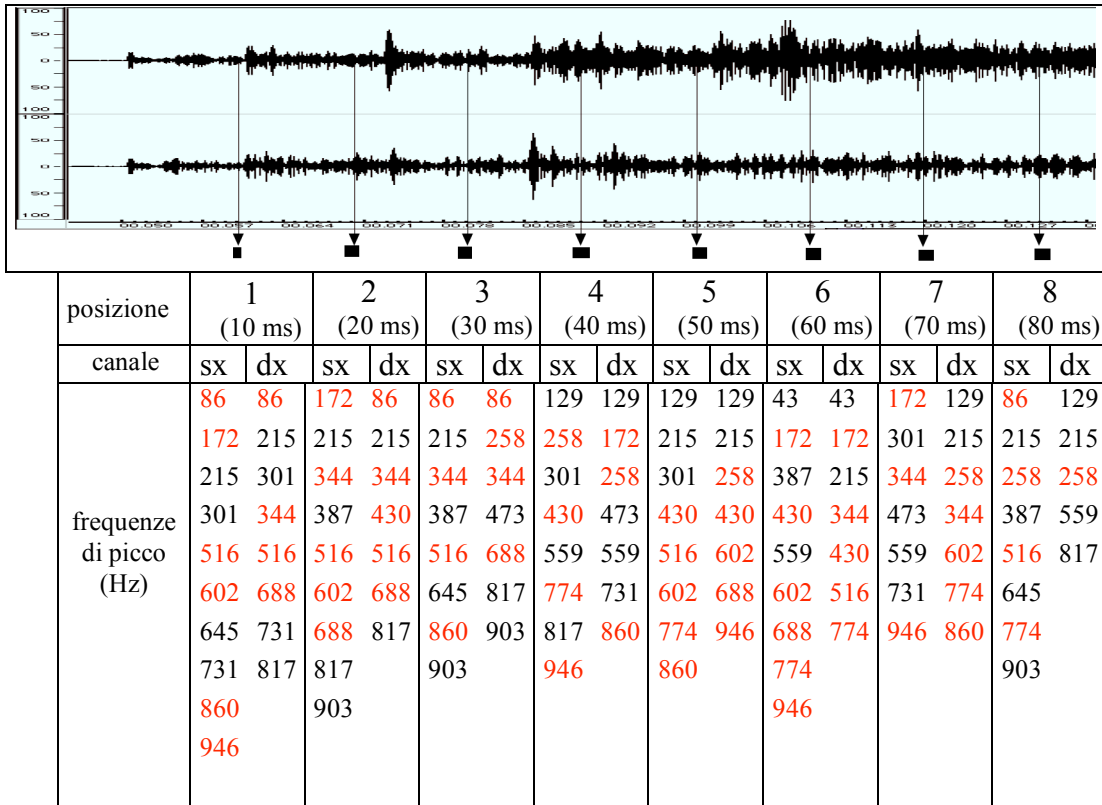
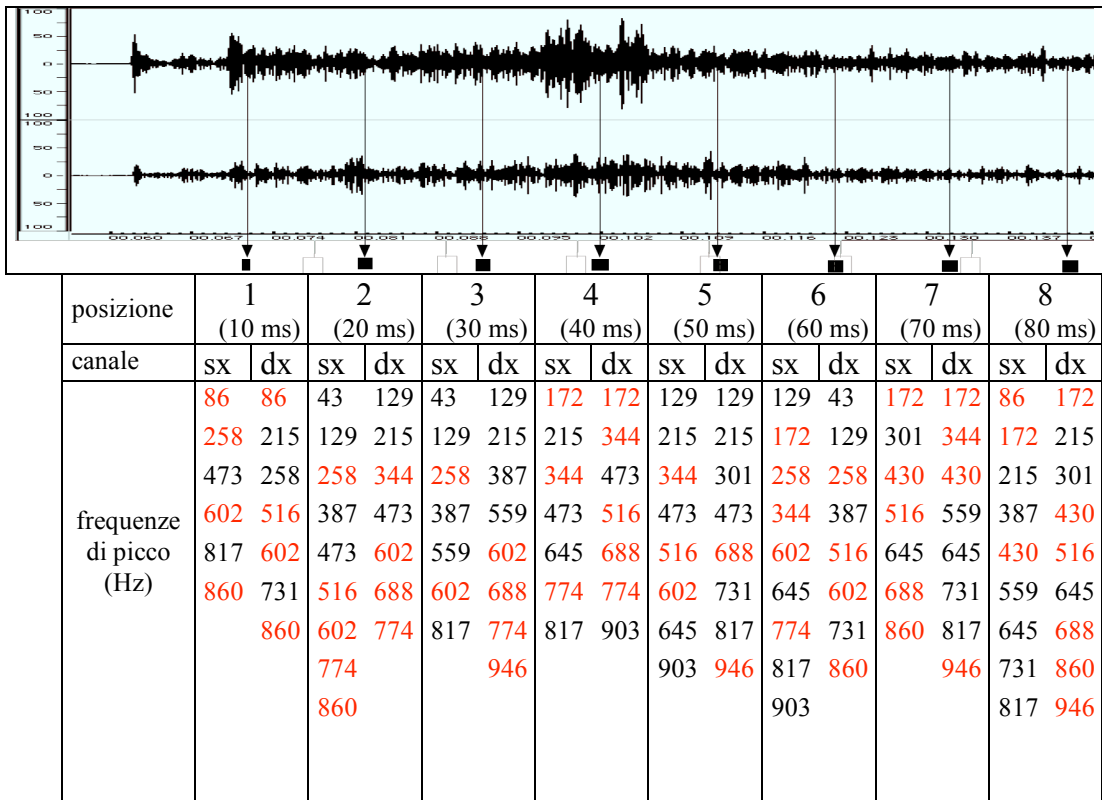


Fig. 5.64: 80ms dal segnale diretto.

5.7.5 orchestra-galleria 5



5.7.6 orchestra-galleria 6



5.7.7 Spettrogrammi: orchestra-galleria 5

- Tempo di arrivo dell'impulso diretto (t_d) = 50,2ms (2216pt)
- Sorgente: buca orchestrale 5
- Ricevente (testa artificiale binaurale; sx: nero; dx: grigio): Palco 3° ordine

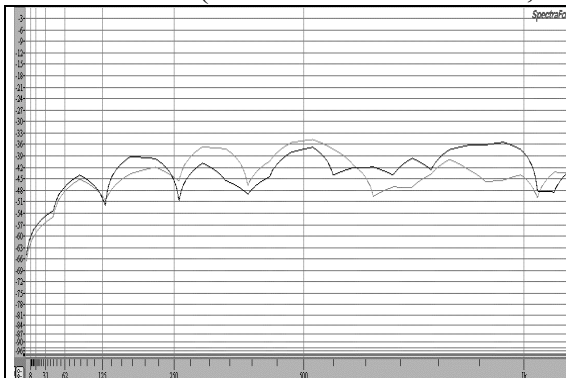


Fig. 5.64: 10ms dal segnale diretto.

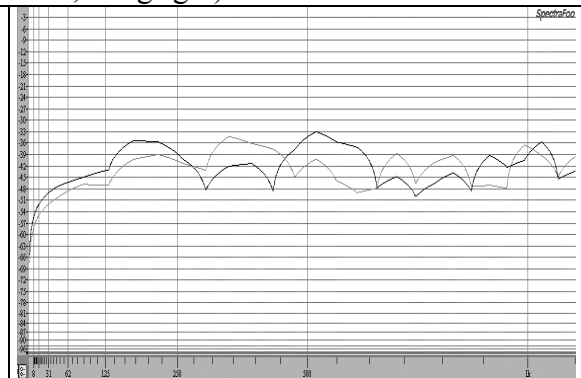


Fig. 5.65: 20ms dal segnale diretto.

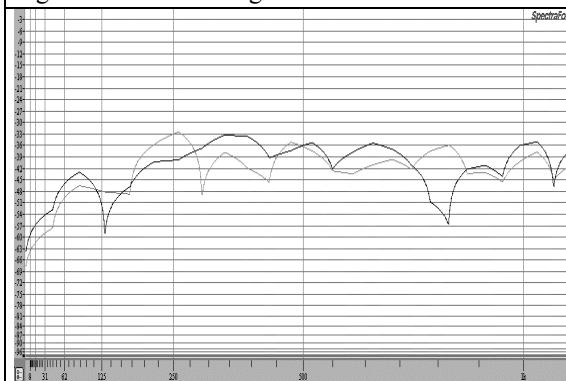


Fig. 5.66: 30ms dal segnale diretto.

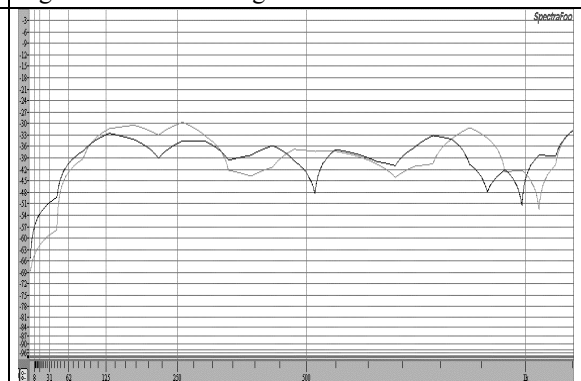


Fig. 5.67: 40ms dal segnale diretto.

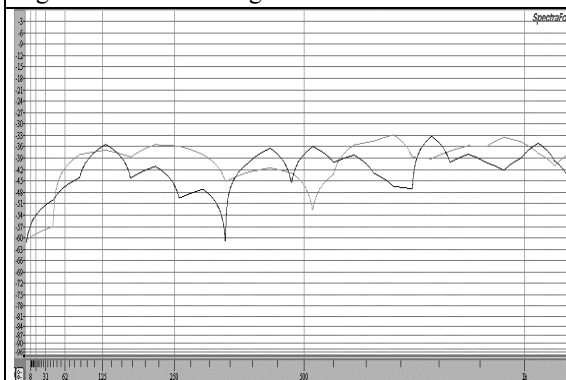


Fig. 5.68: 50ms dal segnale diretto.

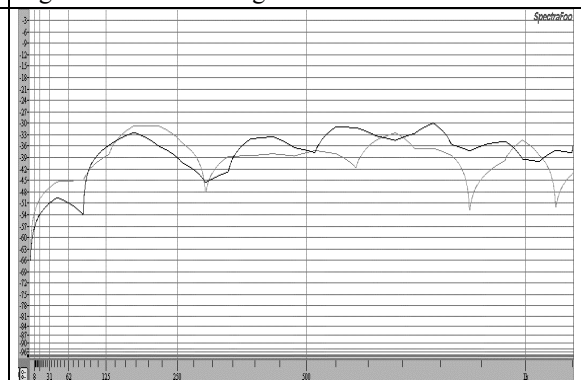


Fig. 5.69: 60ms dal segnale diretto.

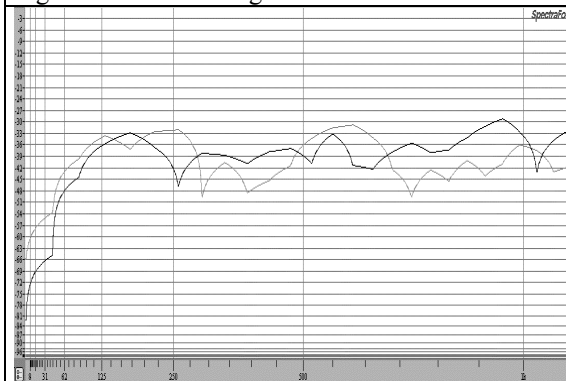


Fig. 5.70: 70ms dal segnale diretto.

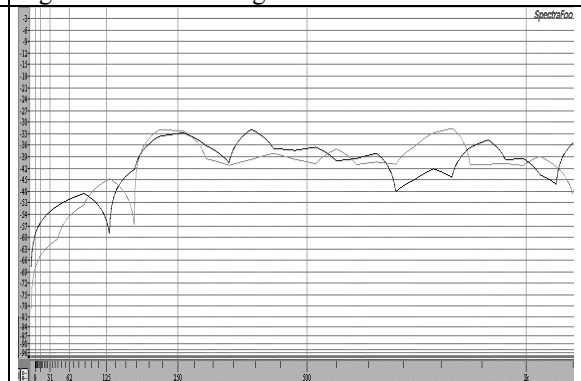


Fig. 5.71: 80ms dal segnale diretto.

5.7.8 Spettrogrammi: orchestra-galleria 6

- Tempo di arrivo dell'impulso diretto (t_d) = 61,8ms (2728pt)
- Sorgente: buca orchestrale 6
- Ricevente (testa artificiale binaurale; sx: nero; dx: grigio): Palco 3° ordine

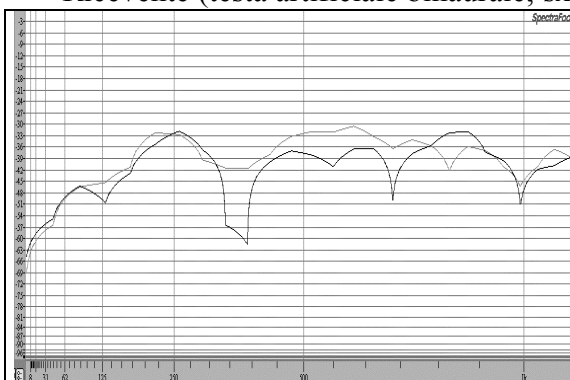


Fig. 5.72: 10ms dal segnale diretto.

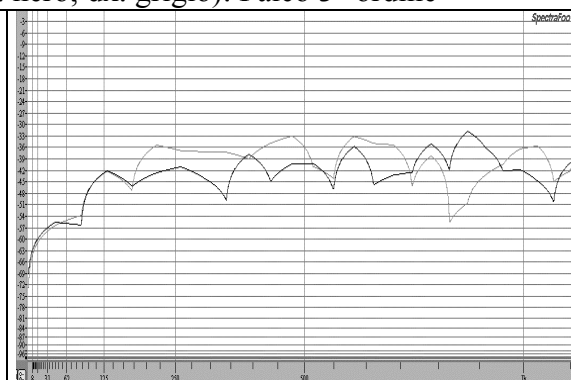


Fig. 5.73: 20ms dal segnale diretto.

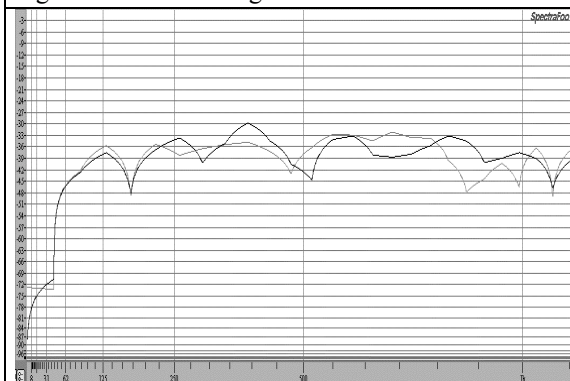


Fig. 5.74: 30ms dal segnale diretto.

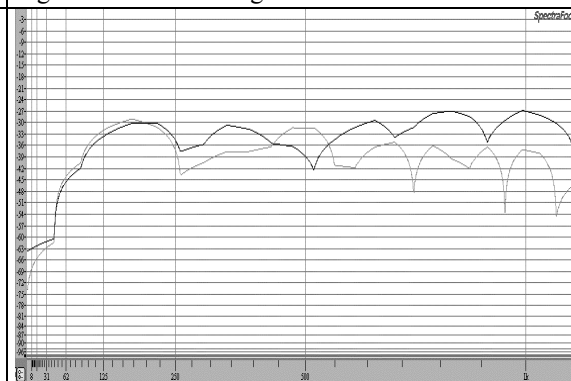


Fig. 5.75: 40ms dal segnale diretto.

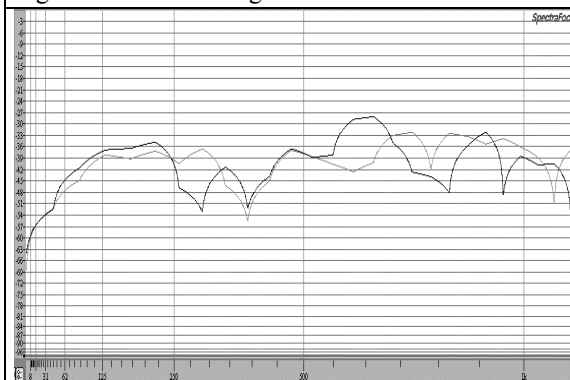


Fig. 5.76: 50ms dal segnale diretto.

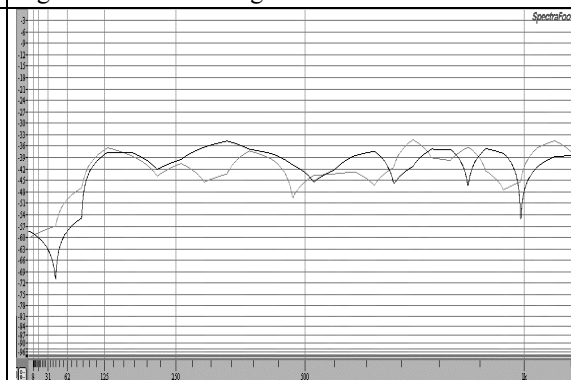


Fig. 5.77: 60ms dal segnale diretto.

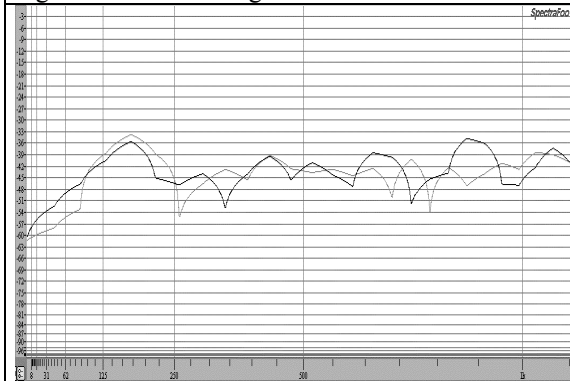


Fig. 5.78: 70ms dal segnale diretto.

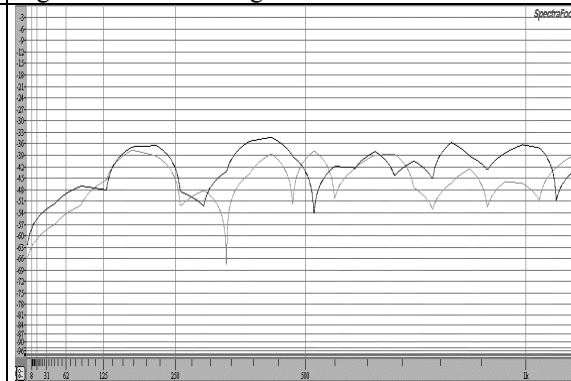
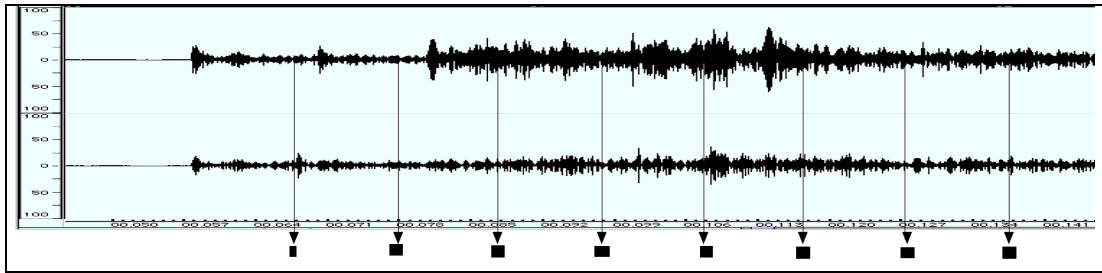


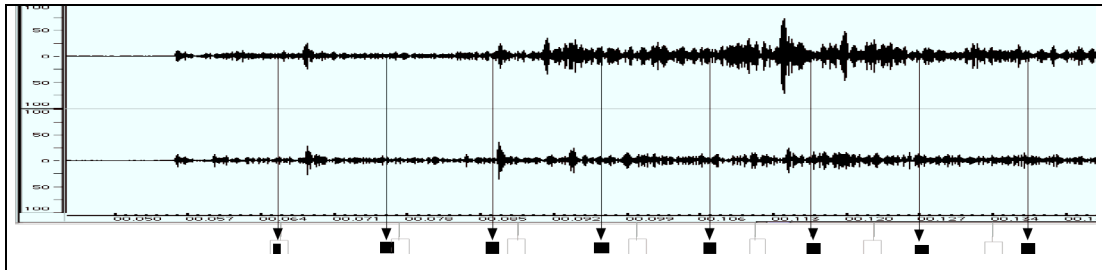
Fig. 5.79: 80ms dal segnale diretto.

5.7.9 orchestra-galleria 8



posizione	1 (10 ms)		2 (20 ms)		3 (30 ms)		4 (40 ms)		5 (50 ms)		6 (60 ms)		7 (70 ms)		8 (80 ms)	
canale	sx	dx	sx	dx	sx	dx	sx	dx	sx	dx	sx	dx	sx	dx	sx	dx
frequenze di picco (Hz)	86	86	43	43	172	129	172	215	172	215	215	86	129	86	86	86
	258	215	215	215	344	172	215	344	258	258	344	215	215	215	215	215
	387	258	430	344	559	258	301	430	387	430	430	344	301	301	301	301
	516	473	559	473	731	344	430	602	430	602	473	473	387	387	344	344
	602	516	645	516	903	473	559	688	602	688	516	645	516	559	473	430
	731	645	774	645		559	688	731	688	817	602	731	688	688	645	516
	860	817	817	817		731	731	774	860	860	688	903	860	774	817	688
			860	860		774	860	860		946	903		860		817	
						946	946								903	

5.7.10 orchestra-galleria 10



posizione	1 (10 ms)		2 (20 ms)		3 (30 ms)		4 (40 ms)		5 (50 ms)		6 (60 ms)		7 (70 ms)		8 (80 ms)	
canale	sx	dx	sx	dx	sx	dx	sx	dx	sx	dx	sx	dx	sx	dx	sx	dx
frequenze di picco (Hz)	86	86	129	129	172	258	172	172	172	86	172	215	129	129	215	172
	172	258	215	215	301	344	301	215	215	215	215	258	215	215	344	258
	258	301	301	430	473	430	473	258	301	344	258	344	258	387	516	387
	301	473	387	559	602	559	559	344	430	430	344	430	387	430	559	602
	473	645	516	688	688	688	688	473	516	559	430	516	516	559	645	645
	602	774	688	817	817	903	860	602	602	774	559	645	559	731	774	817
	903	946	817				903	688	645	817	688	688	645	903	817	860
	946		903				817		774	903	860	860	731		946	
									903		946		774			

5.7.11 Spettrogrammi: orchestra-galleria 8

- Tempo di arrivo dell'impulso diretto (t_d) = 57,8ms (2550pt)
- Sorgente: buca orchestrale 8
- Ricevente (testa artificiale binaurale; sx: nero; dx: grigio): Palco 3° ordine

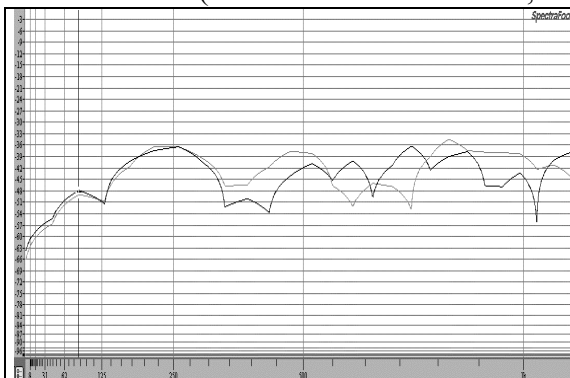


Fig. 5.80: 10ms dal segnale diretto.

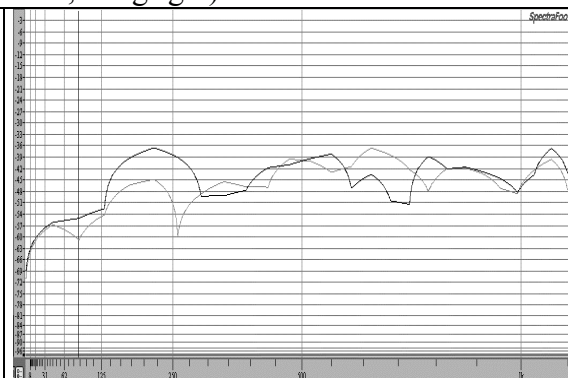


Fig. 5.81: 20ms dal segnale diretto.

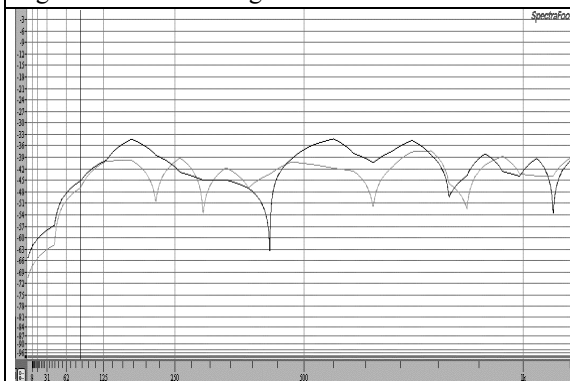


Fig. 5.82: 30ms dal segnale diretto.

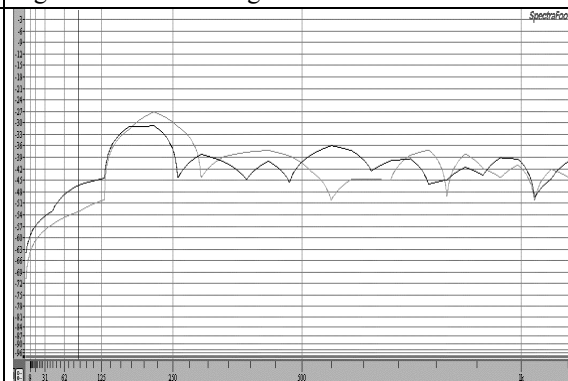


Fig. 5.83: 40ms dal segnale diretto.

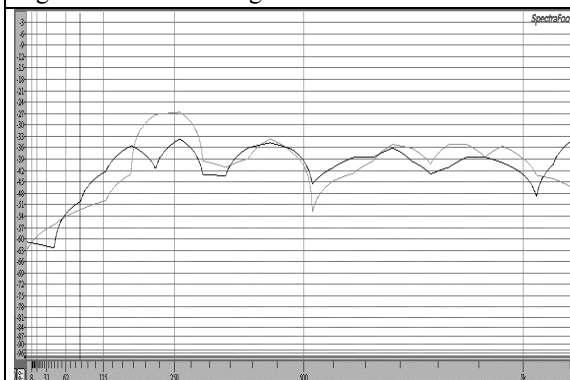


Fig. 5.84: 50ms dal segnale diretto.

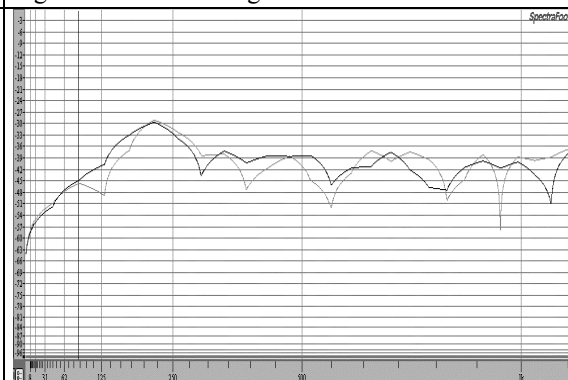


Fig. 5.85: 60ms dal segnale diretto.

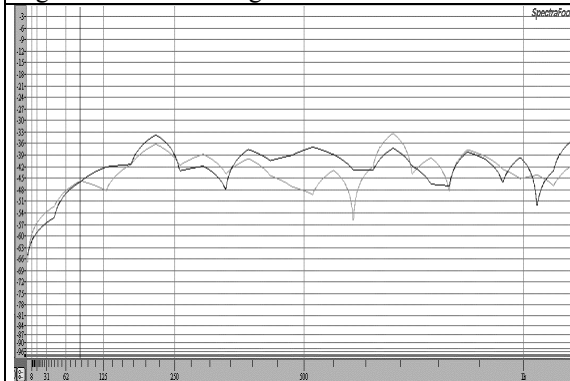


Fig. 5.86: 70ms dal segnale diretto.

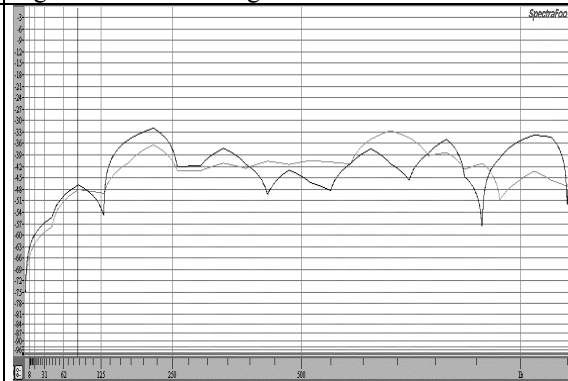


Fig. 5.87: 80ms dal segnale diretto.

5.7.12 Spettrogrammi: orchestra-galleria 10

- Tempo di arrivo dell'impulso diretto (t_d) = 55,7ms (2457pt)
- Sorgente: buca orchestrale 10
- Ricevente (testa artificiale binaurale; sx: nero; dx: grigio): Palco 3° ordine

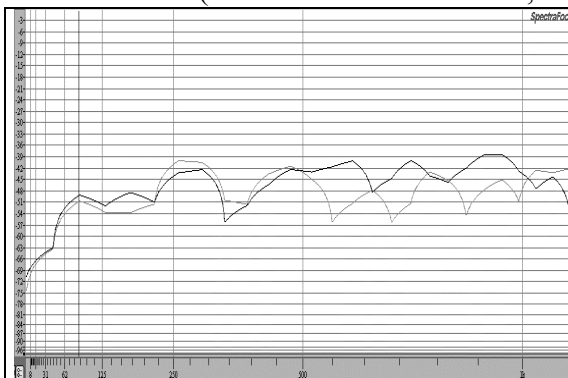


Fig. 5.88: 10ms dal segnale diretto.

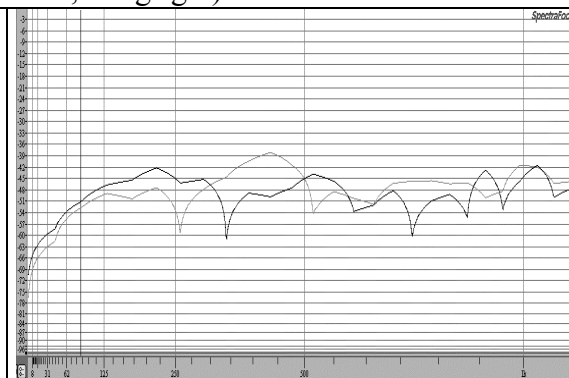


Fig. 5.89: 20ms dal segnale diretto.

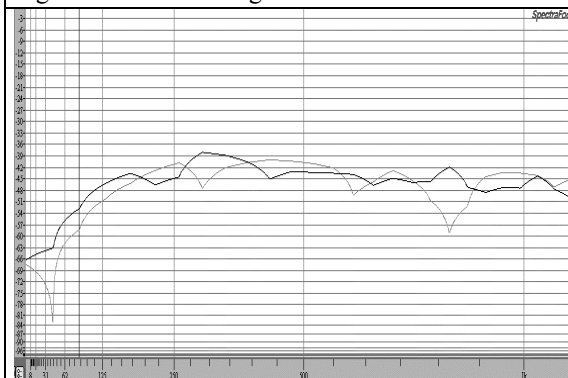


Fig. 5.90: 30ms dal segnale diretto.

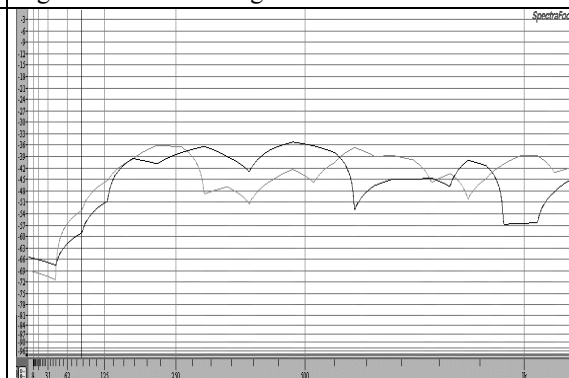


Fig. 5.91: 40ms dal segnale diretto.

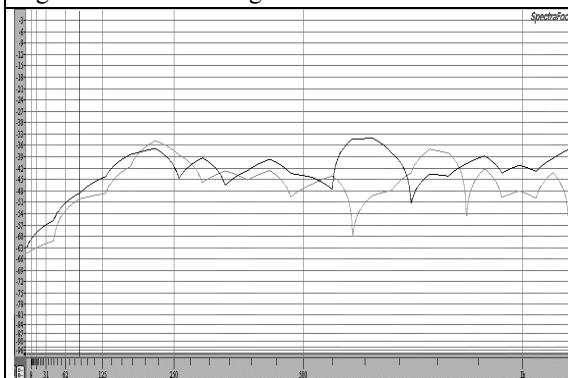


Fig. 5.92: 50ms dal segnale diretto.

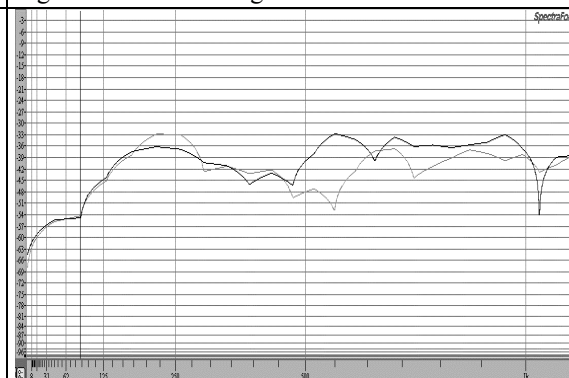


Fig. 5.93: 60ms dal segnale diretto.

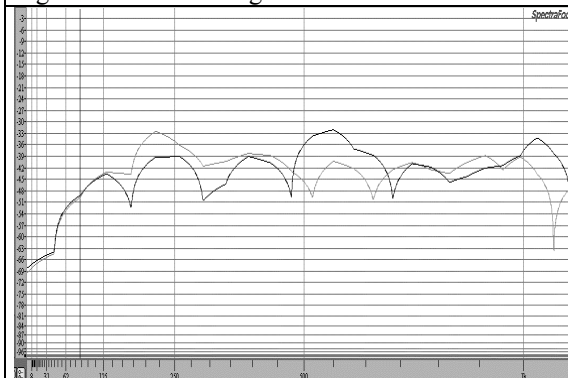


Fig. 5.94: 70ms dal segnale diretto.

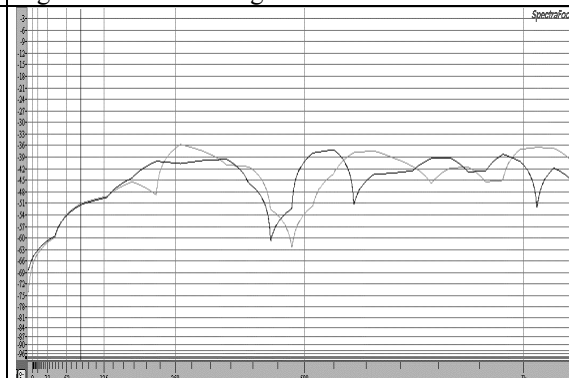


Fig. 5.95: 80ms dal segnale diretto.

5.8 Punti di coerenza nelle frequenze di picco (orchestra-galleria).

Per una corretta lettura in frequenza della risposta all'impulso, secondo questo studio, e' necessario il simultaneo raffronto fra la R.I. (con annessa tabella sottostante) e gli spettrogrammi relativi. Infatti, dato che nella tabella della R.I. non e' possibile inserire i dati connessi all'intensita' in dB dei vari L.P.A. (Livelli di Picco Ambientale), si consiglia il contemporaneo raffronto con gli spettri che possiedono le informazioni mancanti in tabella circa l'intensita'; di contro pero' non sono immediati nella lettura della frequenza ed e' per questo che sono state inserite le tabelle riassuntive delle frequenze di picco.

Rimane verificata la premessa fatta al paragrafo (5.6), ovvero che le frequenze di picco, per questo sistema sorgente-ricevitore (orchestra-galleria), provocate dalle riflessioni nell'ambiente, sono sia per maggioranza percentuale che per frequenze *fondamentali*, relative ai multipli del 43 Hz (mentre le altre, orchestra-platea, erano relative alla frequenza dello 86 Hz). Cio' e' desumibile dal fatto che nei palchetti (punto in cui e' posto il ricevitore), l'influenza della copertura e' immediatamente percepita dal ricevitore (e non come succedeva con il ricevitore in platea, che percepiva tale influenza dopo circa 50-60 ms); di conseguenza si puo' affermare che la dipendenza dal 43 Hz nella R.I e' provocata dalla copertura; ancora non si puo' dedurre se dalla forma o dalle dimensioni o da entrambi gli elementi, ma in base ai risultati della R.I. cio' e' sufficientemente chiaro come si dimostrera' nel paragrafo successivo. Non sono note, almeno fino a questo punto, differenziazioni fra le sorgenti allocate sotto l'arco scenico e quelle sotto lo stage.

5.9 Analisi e discussione dei dati finora riportati.

Il punto di riferimento piu' importante fino ad adesso e' rappresentato sicuramente dai due sottomultipli delle frequenze registrate dalla risposta all'impulso, ovvero la frequenza sottomultipla del 43 Hz e dello 86 Hz; infatti almeno per quanto riguarda la lettura fino ai primi 80 ms degli spettri, non compaiono frequenze al di fuori dei precedenti sottomultipli. La cosa e' abbastanza plausibile dato che le dimensioni del teatro presentano molte coincidenze, comunemente al pensiero dell'epoca in cui e' stato costruito l'edificio (1860), ma tale tema verra' qui solo accennato dato che l'esame geometrico dei volumi del teatro e' presente nel Paragrafo 2.2. Posso dire pero' che la coincidenza piu' evidente e' rappresentata dalla buca d'orchestra che presenta una altezza pari a 2 m (la lunghezza e la larghezza non sono cosi' rilevanti in quanto essendo molto piu' estese in proporzione, non sono recepite dalla R.I. perche' il modo assiale derivante dai 2 m dell'altezza, e' molto piu' forte d'intensita' rispetto agli altri due). Volendo quindi, trovare il modo assiale relativo, usando quindi la formula (5.3), dato che ci interessa solamente il modo assiale, si avra' :

$$f_n = \frac{c}{2} \left(\frac{n_x}{l_x} \right) = 86 \text{ Hz} \quad (5.3)$$

per $n_x = 1$ e $c = 344 \text{ m s}^{-1}$, e i modi successivi e quindi per $n_x = 2, 3, \dots 6$; renderanno le frequenze relative $f_2 = 172 \text{ Hz}$, $f_3 = 258 \text{ Hz}$, $f_6 = 516 \text{ Hz}$. Non credo si possa parlare di coincidenza, ma di dati piuttosto sicuri, derivanti dal modo assiale della buca sotto il palcoscenico. A cio' si aggiunge anche l'altezza massima dell'arco scenico che, in base ai disegni, risulta essere pari a 14 m, quindi riapplicando la (5.3), si avra':

$$f_n = \frac{c}{2} \left(\frac{n_x}{l_x} \right) = 12,29 \text{ Hz} \quad (5.3)$$

per $n_x = 1$ e $c = 344 \text{ m s}^{-1}$, ma per $n_x = 7$, la corrispondente frequenza sara' uguale a $f_7 = 86,03 \text{ Hz}$; dunque siamo di fronte a due ambienti accoppiati (buca sottostante arco

scenico e buca sottostante lo stage) che pur avendo dimensioni differenti, queste però sono multiple l'una dell'altra; ovviamente la prima è rappresentata dal 1° modo e la seconda dimensione, essendo un multiplo, esalta il suo 7° modo. Ci si potrebbe chiedere perché i precedenti modi non siano evidenziati dalla risposta all'impulso ma dato che la sweepata sinusoidale delle misurazioni, parte dalla frequenza di 40 Hz, come riportato nel Paragrafo (2.4) del Capitolo 2, i primi tre modi non sono stati neanche registrati dai ricevitori; i successivi tre modi e più precisamente il 4°, 5° e 6° non sono perché è il 7° modo provocato dalle dimensioni dell'arco scenico (86 Hz) che entra in risonanza a sua volta con il 1° modo della buca (86 Hz), perché molto forte da un punto di vista dell'intensità, mascherando quindi i modi intermedi.

In ultimo si esaminerà la possibile corresponsione del raggio della copertura, in rapporto sia alla lettura in frequenza della R.I. che alla teoria modale. Sappiamo dal Paragrafo (2.2) che il raggio della curva del soffitto è pari a circa 24m e quindi applicando nuovamente la (5.3), si avrà:

$$f_n = \frac{c}{2} \left(\frac{n_x}{l_x} \right) = 7,16 \text{ Hz} \quad (5.3)$$

per $n_x = 1$ e $c = 344 \text{ m s}^{-1}$, ma per $n_x = 6$, la corrispondente frequenza sarà uguale a:

$$f_6 = 43 \text{ Hz},$$

la quale frequenza è perfettamente corrispondente al sottomultiplo dei livelli di picco riscontrati come maggioranza percentuale dal ricevitore posto nei palchetti del 3° ordine, per il quale si era ipotizzato l'influenza spettrale della copertura, nonché per il ricevitore posto in platea, ma in questo caso solamente per le prime riflessioni successive, ovvero quelle riflessioni che arrivano dopo i 70-80 ms dato che in platea il contributo acustico della copertura arriva spostato nel tempo, come appunto è stato dimostrato.

6.0 Asimmetria di assorbimento e teoria modale

6.1 Distribuzione asimmetrica dell'assorbimento all'interno di un ambiente

Quando le pareti di un ambiente hanno una distribuzione dell'assorbimento non uniforme, non e' possibile, una volta che la sorgente e' stata spenta, assumere che tutti i raggi sonori perdano la stessa quantita' di energia nello stesso intervallo di tempo [35].

La quantita' acustica principale all'interno di questo processo di decadimento e' il totale ammontare di energia che rimane nell'ambiente e la sua variazione nel tempo, ovvero:

$$D = \frac{10 \lg \left(\frac{E_0}{E} \right)}{t} \quad (6.1)$$

dove, D quantita' di decadimento per unita' di tempo t in dB; t e' l'intervallo di tempo del decadimento sonoro; E_0 rappresenta l'energia iniziale; E l'energia rimasta quando la sorgente sonora cessa.

Inoltre si sa che ogni riflessione sonora generata da una collisione del suono diretto, il livello della media densita' energetica sonora, e quindi anche il livello di pressione sonora, subisce una perdita uguale a

$$-10 \lg(1 - \bar{\alpha}) \quad (6.2)$$

dove $\bar{\alpha}$ rappresenta la media energetica del coefficiente di assorbimento ai confini dell'ambiente. Così se la media numerica delle riflessioni in funzione del tempo e' N , il tasso di decadimento del livello di pressione sonora sara':

$$D = -10 N \lg(1 - \bar{\alpha}) \quad (6.3)$$

chiamando $\bar{a}$ con il termine $\bar{a} = -\ln(1 - \bar{\alpha})$, Arau [35] deduce la seguente equazione:

$$\bar{a} = \frac{D}{10} \frac{1}{N} \frac{1}{\lg e} \quad (6.4)$$

dalla quale egli puo' descrivere $\bar{a}$ come il tasso di decadimento medio del coefficiente di assorbimento dell'ambiente.

Saltando qualche passaggio dato che non e' questa la sede per la sua dimostrazione; l'autore afferma che sapendo che il decadimento sonoro e' il risultato delle riflessioni multiple, simultanee e sequenziali sulla superficie di uno spazio chiuso, ammettendo inoltre che cio' avviene di preferenza fra coppie di pareti parallele e che le riflessioni simultanee sono prodotte generalmente da pareti perpendicolari adiacenti fra loro, stabilisce il coefficiente di cui sopra in tre direzioni fra coppie di pareti parallele:

$$\bar{a} = (\bar{a}_x)^{x/S} (\bar{a}_y)^{y/S} (\bar{a}_z)^{z/S} \quad (6.5)$$

dove $\bar{a}_x$ e' il tasso di decadimento medio del coefficiente di assorbimento nella direzione 1; $\bar{a}_y$ e' il tasso di decadimento medio del coefficiente di assorbimento nella direzione 2 e infine $\bar{a}_z$ il tasso di decadimento medio del coefficiente di assorbimento nella direzione 3; $\bar{\alpha}_x$ e' la media energetica dell'assorbimento nelle aree x; e cosi' per le rimanenti aree y e z ; conseguentemente $S = x + y + z$.

La (6.5) rappresenta un area pesata geometricamente e non pesata aritmeticamente come possiamo trovare nella formula di Eyring o Sabine sul T_{60} , inoltre e' facilmente dimostrabile che nel caso ci si trovi di fronte ad uno spazio isotropico e omogeneo nell'assorbimento, uno spazio sabinico per intenderci, la formula diventa coincidente con quella di Sabine; ma per uno spazio anisotropico e non omogeneo tale formula offre dei vantaggi come la simmetricita' dei valori distributivi del decadimento del campo sonoro. Per brevit  si rappresentano i passi piu' importanti della formula di Arau, e da qui si giunge alla rappresentazione della formula per la determinazione del riverbero per un campo sonoro anisotropico e non omogeneo, che a parere mio rappresenta la maggior parte dei casi in ambito teatrale; forse una distinzione la possiamo fare per

quegli spazi molto grandi ($V \geq 15000 \text{ m}^3$, ad esempio) e altamente assorbenti, tipici pero' non delle architetture europee. Uno stadio al chiuso puo' essere rappresentato come uno spazio isotropico, ma difficilmente questo potra' essere accostato ad un teatro all'italiana da un punto di vista acustico; vediamo comunque la trattazione della equazione da parte di Arau [35]:

$$T = \left[\frac{0,161V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}_x)} \right]^{x/S} \left[\frac{0,161V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}_y)} \right]^{y/S} \left[\frac{0,161V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}_z)} \right]^{z/S} \quad (6.6)$$

tale formula risulta come vedremo in seguito, la piu' coincidente fra il calcolo teorico e il calcolo del T_{60} direttamente sul posto in esame. Supponendo infatti, un campo perfettamente diffuso in tutte le pareti delimitanti i confini dello spazio, ovvero quando $\bar{\alpha}_x = \bar{\alpha}_y = \bar{\alpha}_z = \bar{\alpha}$, ed introducendo tale valore nella formula (6.6), si otterra' la formula di Eyring:

$$T = \frac{0,161V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (6.7)$$

Nella tabella seguente (Tab.6.1) si riportano i valori relativi ai tempi di riverbero calcolati prima teoricamente con varie formule (Arau, Eyring, Fitzroy) e poi la misurazione fatta direttamente nello spazio relativo.

caso	Tempo di riverbero				Forma	Volume m^3
	Arau	Eyring	Fitzroy	Misurato		
	s	s	s	s		
1	0.606	0.599	0.613*	0.66	Rettangolare	389.42
2	0.75*	0.66	1.02	0.84	Rettangolare	5022.88
3	1.122*	1.108	1.121	1.16	Rettangolare	3717
4	2.49.*	1.62	3.89	2.4	Rettangolare	1218
5	5.9*	4.32	8.32	6	Rettangolare	11656
6	1.58*	1.55	1.68	1.57	Rettangolare	100.71
7	0.95*	0.9	1.02	0.96	Non-rettng.	2240
8	1.44*	1.37	1.57	1.47	Non-rettng.	10352
10	6.26*	5.96	6.73	6.3	Non-rettng.	81000
12	1.81*	1.8	1.84	1.81	Non-rettng.	87480

Tab.6.1. T_{60} calcolato in 10 differenti casi di ambiente di diversa forma e volume. L'asterisco corrisponde al valore che piu' si avvicina al tempo di riverbero misurato nell'ambiente; l'asterisco corrisponde al valore ottenuto dalla formula teorica che piu' si avvicina al valore reale.

Come si puo' notare sono dieci i casi di calcolo del tempo di riverbero per ambienti sia di piccola dimensione che di grande dimensione; la forma varia da quella rettangolare, al ferro di cavallo ecc. Inoltre, controllando il segno asterisco accanto ad ogni tempo, si evince che su dieci casi, solamente uno si avvicina alla formula di Fitzroy, gli altri nove tempi invece, sono piu' vicini alla formula di Arau; quindi cio' ci serve per dimostrare non tanto l'accuratezza di calcolo ma innanzitutto che le sale di ascolto genericamente dette, alle quali si puo' far affluire sia i teatri che gli auditoria, non hanno un campo sonoro diffuso omogeneamente, ma piu' in generale si puo' dedurre che l'asimmetria di assorbimento all'interno di uno spazio rappresenta quasi una regola. Inoltre cio' e' anche rilevabile attraverso l'osservazione delle curve di decadimento del tempo di riverbero, dove si puo' notare con sufficiente chiarezza che tali curve non sono quasi mai rappresentate da una singola pendenza, ma ne hanno almeno due, e spesso anche tre differenti pendenze, dovute ai differenti tassi di decadimento che si generano per la maggior parte lungo le tre direttrici spaziali di ogni ambiente: x , y , z .

6.2 Ulteriori approfondimenti

Volendo fare una ulteriore specifica circa il comportamento dell'energia sonora all'interno di un grande ambiente (intendendo per grande ambiente quell'ambiente che sta fra, ad esempio, una sala di uno studio di registrazione e i cosiddetti macro ambienti come i giganteschi auditorium da decine di migliaia di spettatori; estremi esclusi), come potrebbe essere un teatro all'italiana, anche se all'interno di questa categoria ci sono delle discrete differenze volumetriche come ad esempio fra il Teatro della Pergola di Firenze (1000 spettatori circa) e il Teatro alla Scala di Milano (3000 spettatori circa). Cio' nonostante possono classificarsi, acusticamente parlando, come facenti parte della

stessa categoria in quanto architettonicamente sono strutture simili (platea con palchi), i materiali usati sono molto simili (cemento, legno, stucchi) ed inoltre possono essere considerati ambienti semi-riverberanti, non comunque assorbenti. Ora che e' stato specificato il concetto di grande ambiente, per cio' che concerne questo studio, cerchiamo di applicare quindi le caratteristiche acustiche legate a tali spazi.

6.2.1 Campo perfettamente diffuso e/o campo con asimmetria d'assorbimento

Parlando di grandi ambienti si associa l'idea del campo perfettamente diffuso anche se come si sa, il concetto di isotropia in campo acustico e' piu' che altro teorico. La teoria del campo diffuso si applica al di sopra della cosiddetta frequenza di Schroeder [33] , che come si sa, risulta essere:

$$f_s \approx \frac{5400}{\sqrt{(V\langle\delta_n\rangle)}} \text{ Hz} \approx 2000\sqrt{\frac{T}{V}} \quad (6.8)$$

dove, T = tempo di riverbero; V = volume dell'ambiente; δ = costante di smorzamento; le parentesi ad angolo si riferiscono alla media dei valori. Al di sotto di tale frequenza vige la teoria modale mentre al di sopra, il campo si considera perfettamente diffuso. A questa ultima affermazione si giunge perche' essendo troppo elevata la densita' dei modi:

$$\frac{dN}{df} = \frac{4\pi f^2 V}{c^3} \quad (6.9)$$

(che rappresenta il numero di frequenze di risonanza all'interno di una banda unitaria intorno alla frequenza f , dato un ambiente di un certo volume V , dove la densita' modale cresce con il quadrato della frequenza), le frequenze (al di sopra della (6.8)) essendo di un numero elevato, vengono considerate facenti parte di un campo isotropico. Questa implicazione, secondo me, rientra in un concetto ideale ma non molto pratico in quanto

sempre secondo la (6.8), dovrei considerare uguali due spazi aventi lo stesso volume V e non la forma (un ambiente cubico avra' la stessa diffusione di un ambiente a forma parallelepipedica, a parita' di assorbimento, quando invece sappiamo ed e' facile appurarlo che questo non puo' avvenire).

Inoltre tornando agli ambienti esaminati in questo studio, ovvero i teatri all'italiana, si possono presentare numerosi casi inerenti l'asimmetria d'assorbimento; il palcoscenico, la fossa orchestrale, i palchetti, la platea, l'arco scenico ecc. sono tutti elementi architettonici che rimandano al concetto di *spazi accoppiati*, che come e' noto producono un assorbimento differenziato. Prendiamo in esame un piccolo esempio: la fossa orchestrale che generalmente ha una parte scoperta ed una parte sotto il palcoscenico, quest'ultima mediamente ha una altezza di 2 metri mentre sia la larghezza che la lunghezza sono molto variabili da teatro a teatro. Secondo lo studio fatto nel capitolo precedente, risulta che la dimensione minore della fossa d'orchestra (l'altezza) ha una notevole importanza per cio' che riguarda il suo campo di frequenze relativo ai modi e che riesce a mantenere quasi inalterata per tutte le risposte all'interno del teatro. Cio' che si vuol dire attraverso questo studio e' che il teatro all'italiana come involucro presenta notevoli asimmetrie d'assorbimento e di conseguenza risonanze evidenziabili anche al di sopra della (6.8) e secondo me, pur essendo ineccepibile il fatto che al di sopra di detto limite, la densita' modale cresce moltissimo, puo' essere altrettanto vero che i modi mantengono una loro ampiezza (relativa alla intensita' spettrale della sorgente coniugata alla risposta che quest'ultima riceve dalle caratteristiche formali dell'ambiente nonche' dai differenti tipi di materiali impiegati). La (6.8) secondo me, e' un punto di riferimento ma non puo' rappresentare un limite assoluto, prova ne e' il fatto che si basa sul T_{60} sabinico che, come sappiamo e' riferibile solamente ad un campo perfettamente diffuso. Se parliamo di campo diffuso dovuto alla casualita' dell'incidenza

dei raggi sonori in un ambiente, non si deve dimenticare il fatto che l'intensita' acustica dei raggi sonori viene mantenuta e grazie a questo la moltitudine dei modi viene mascherata dai modi principali con una intensita' maggiore (sia dovuta alla sorgente che dalla risposta dell'ambiente). In ultimo vorrei sottolineare che il primo articolo pubblicato da Schroeder [36], inerente sempre la (6.8), riporta una formula leggermente differente, come:

$$f_s \approx 4000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (6.10)$$

il che significa che se un ambiente ha una frequenza di taglio di 40 Hz secondo la (6.8), questa, secondo la (6.10) sara' uguale a 80 Hz, ovvero il doppio.

6.3 Forma e volume di uno spazio

Attraverso la lettura di un articolo relativo all'esame della forma di uno spazio [37], gli autori hanno condotto degli studi molto interessanti, circa l'importanza della forma in relazione alla distribuzione del percorso dei raggi sonori. Tali risultati sono stati poi comparati con quelli ottenuti attraverso una simulazione mediante *ray-tracing* e come loro stessi riportano: *it is shown that the distribution is strictly connected to the shape of the enclosure* [37], ci dimostrano quanto sia essenziale la forma per una corretta distribuzione dei raggi sonori.

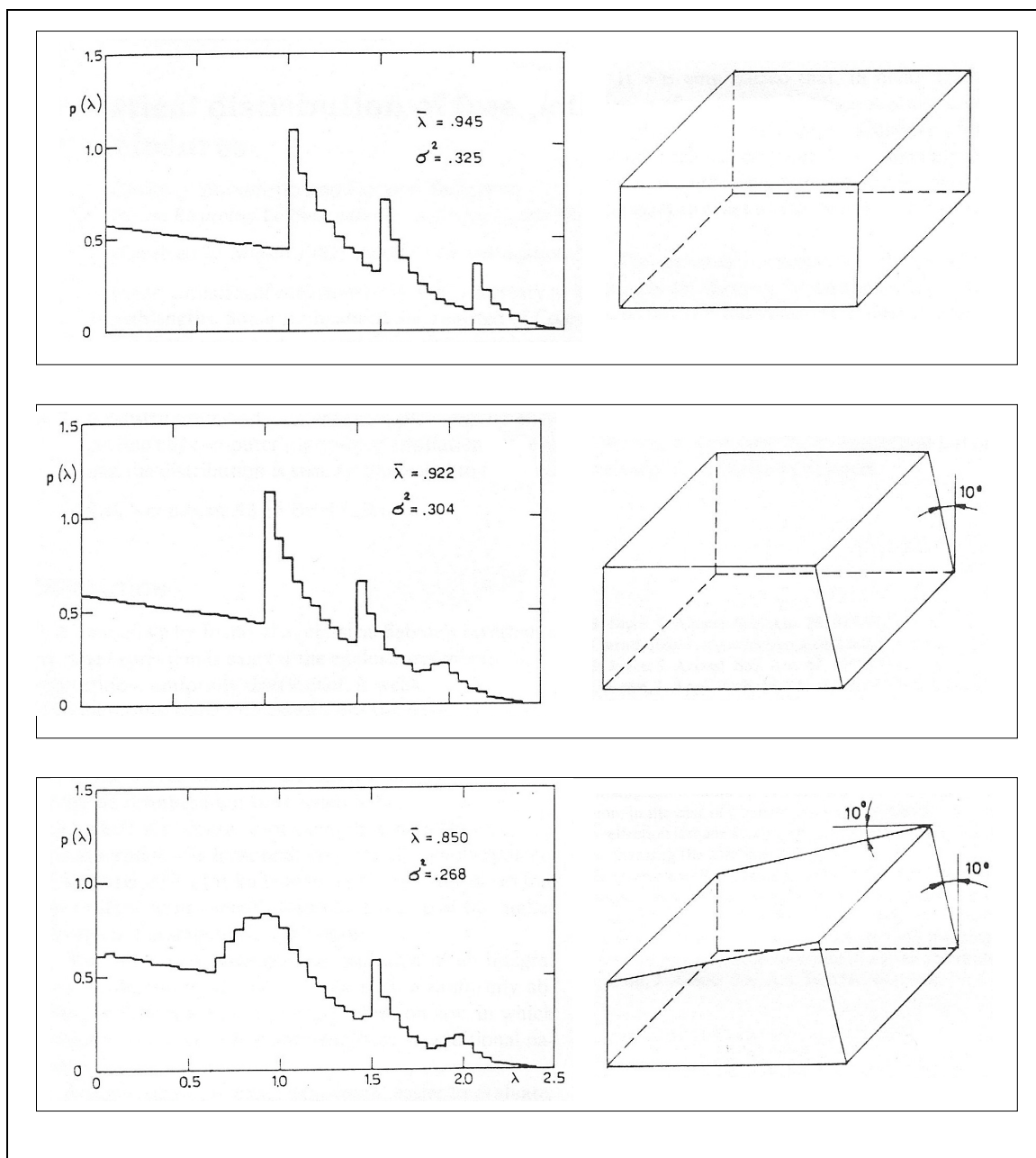


Fig.6.1. Istogrammi ottenuti attraverso la simulazione al computer relativi al percorso dei raggi; come si può notare dalla differenza dei tre grafici, la forma è un elemento determinante per la distribuzione statistica del percorso dei raggi. [37].

La prova sperimentale che hanno fatto consiste nell'esame di un ambiente a sezione rettangolare, un altro delle stesse dimensioni ma con una parete inclinata di 10° , ed un terzo con una ulteriore parete inclinata degli stessi gradi (Fig.6.1). Attraverso questa semplice variante la distribuzione del percorso dei raggi è cambiata considerevolmente. Al di là della ricerca specifica fatta dagli autori e della quale si rimanda all'articolo

stesso per un approfondimento, il fatto importante riguarda che la considerazione dell'assorbimento uniforme e/o della distribuzione uniforme all'interno di un ambiente e' ideale e che da un punto di vista progettuale la forma rappresenta il primo passo verso un corretto ascolto.

6.4 Conclusioni

Dalle teorie e dalle prove sperimentali di Arau [35], si evincono secondo me, alcuni concetti fondamentali: a) l'asimmetria di assorbimento esiste non solo per i piccoli ambienti ma anche per quelli ritenuti grandi, come auditoria e teatri d'opera principalmente; b) il campo acustico omogeneamente diffuso appartiene piu' che altro ad una base teorica, e quando presente viene riferito a delle macro-architetture che a livello dimensionale hanno ben poco a che fare con i teatri d'opera classici, ed infine c) anche per forme non rettangolari, esiste una differenziazione del coefficiente d'assorbimento o meglio tasso di decadimento, lungo le tre direttrici spaziali.

7.0 Correlazione del parametro *EDT* con l'analisi in frequenza

7.1 Due differenti interpretazioni del parametro *EDT*

Attraverso una analisi piu' accurata di questo parametro, con il proposito quindi di interpretare il comportamento dei raggi sonori fra sorgente e ricevente, si possono avere maggiori informazioni per cio' che riguarda la correzione acustica di uno spazio. Inoltre, quando ci si trova ad operare in teatri del passato dove la salvaguardia del patrimonio storico e' preponderante, diventa significativa la conoscenza approfondita del comportamento dell'energia acustica per meglio localizzare il tipo di intervento.

Percio' si propone uno studio esteso di alcuni parametri temporali, come l'*EDT*, interpretando tale parametro, come punto di raccordo fra il dominio temporale, il dominio della frequenza e la geometria dello spazio (intendendo quest'ultima come il campo di interazione fra sorgente, ricevente e lo spazio intermedio). Quindi, verra' presa in considerazione la durata nel tempo del primo decadimento (lettura di tipo tradizionale), ma anche un tipo di lettura in frequenza dello stesso parametro.

7.2 Il decadimento temporale piu' lungo associato ad una frequenza

L'*EDT* che rappresenta il tempo di decadimento dei primi 10 dB del tempo di riverbero T_{60} , e quindi l'inclinazione iniziale della curva di smorzamento dell'impulso, si dimostra correlato alla percezione del riverbero e cio' e' stato confermato da molti ricercatori ma principalmente da Gade attraverso numerose misurazioni di risposte all'impulso binaurali eseguite in molte sale [22]. Non solo, ma proprio in quanto fortemente influenzabile dalle prime riflessioni, l'*EDT*, e' molto sensibile ai dettagli della geometria

dello spazio. Inoltre il livello di decadimento $L(t)$ nelle registrazioni sperimentali, non decade in modo lineare ma contiene fluttuazioni pseudo-casuali dovute alle complicate interferenze del decadimento dei modi normali, quindi l'inclinazione iniziale della curva e' largamente correlata alla media delle costanti di smorzamento dei modi propri dell'ambiente eccitati dall'impulso¹ [23].

7.3 EDT per singole frequenze (EDT_f)

In base a questa premessa (cioe' che l'EDT e' molto sensibile ai dettagli della geometria dello spazio, e l'inclinazione iniziale della curva e' largamente correlata alla media delle costanti di smorzamento dei modi propri dell'ambiente eccitati dall'impulso), si e' scelto di analizzare il parametro di cui sopra estrapolando da ogni risposta all'impulso, la banda in frequenza che presenta un tempo di decadimento piu' lungo, ricercando successivamente, una correlazione con lo spazio in cui avviene il processo impulso/ricezione e/o con altre cause che possano giustificare un tale decadimento; dato che il processo di decadimento, come si sa, e' funzione dei differenti ritardi, riferiti a loro volta a differenti frequenze interagenti con la geometria (attraverso la lunghezza d'onda relativa) e i materiali di cui e' costituito lo spazio in esame. Il processo di primo decadimento e' subordinato maggiormente dalla geometria dello spazio [23] mentre il riverbero T_{60} e' condizionato dai materiali componenti lo spazio stesso; quindi questi due fattori (geometria e materiali componenti) influenzano le riflessioni secondo due procedure differenti: la geometria dello spazio in esame, influenza il dominio delle frequenze [23]; i materiali (in rapporto al loro coefficiente di assorbimento), influenzano

¹ "Usually, the level $L(t)$ in the experimental decay curves does not fall in a strictly linear way but contains random fluctuations which are due to complicated interferences between decaying normal modes" pag 256; "...the EDT which is anyway a more reliable indicator of the subjective impression of reverberance than Sabine's reverberation

la durata temporale del decadimento e quindi esercitano una influenza nel dominio del tempo.

Cio' premesso, se ne deduce che, a parita' di assorbimento, la banda di frequenza con il tempo di decadimento piu' lungo, e' originata, di conseguenza, da un decadimento piu' lento e cio' perche' alcune risonanze provocate da frequenze interagenti con lo spazio e la sua geometria, protraggono il tempo di decadimento di alcune frequenze rispetto alle altre.

Di regola sono le frequenze piu' basse a mostrare una durata maggiore nel tempo nelle risposte all'impulso e cio' e' vero in generale come linea di tendenza, ma quando una banda di frequenza piu' elevata presenta un tempo di decadimento piu' lungo rispetto alla precedente (ovvero quando si interrompe la linea generale di tendenza che investe in modo inversamente proporzionale l'altezza della frequenza con la durata nel tempo del decadimento, i.e. $63 \text{ Hz} = 1.2 \text{ s}$ e $250 \text{ Hz} = 1.8 \text{ s}$), allora si deduce che all'interno del sistema sia presente un fenomeno che inverte la linea di tendenza di cui sopra; quindi, in questo caso, attraverso una attenta analisi della geometria dell'involucro architettonico correlata ai tempi di primo decadimento, si cercano le possibili cause che giustificano tali effetti.

Va precisato pero' che si e' scelto di escludere la banda relativa al 31.5 Hz dalle bande di frequenza delle risposte all'impulso, e questo, perche' essendo una banda di frequenza troppo bassa, e' soggetta a errori accidentali e/o strumentali di misurazione difficilmente predicibili, nonostante che le risposte all'impulso siano state rilevate con le piu' moderne tecniche nonche' con le migliori attrezzature richieste dalla normativa in campo acustico.

time...since the initial slope is closely related to the average damping constant of all excited normal modes" pag. 259;

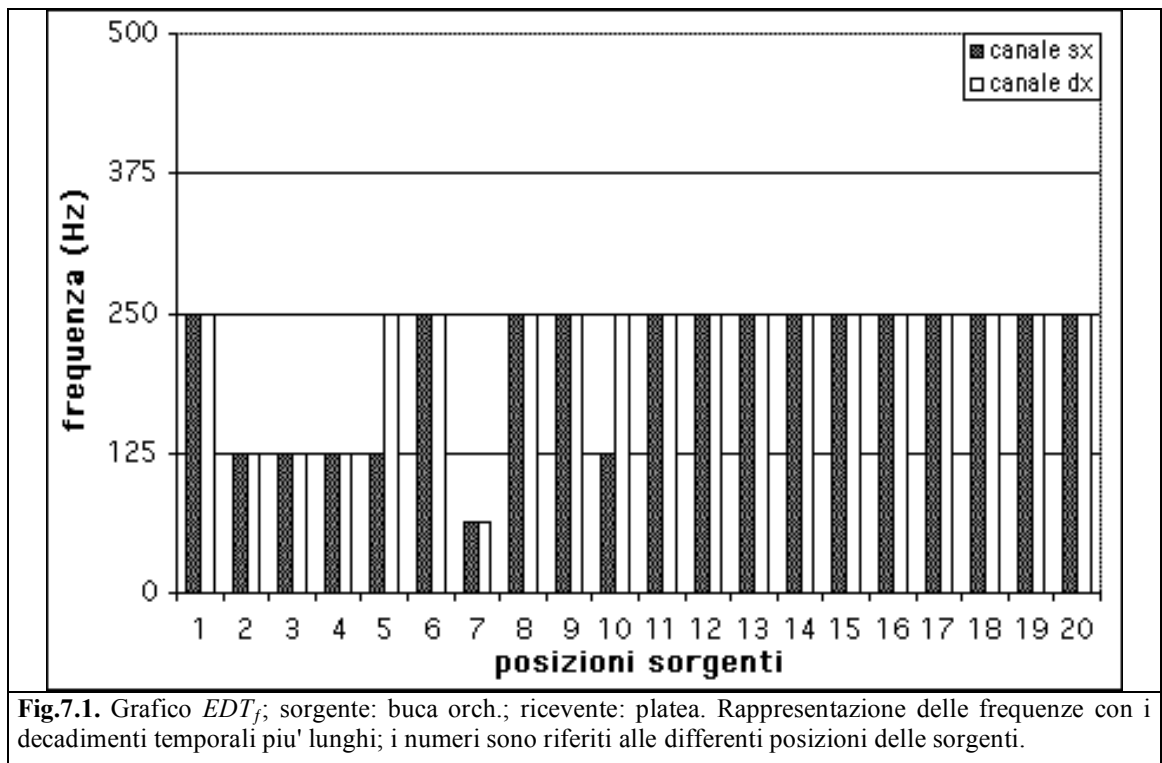
7.4 Analisi e discussione dei grafici EDT_f

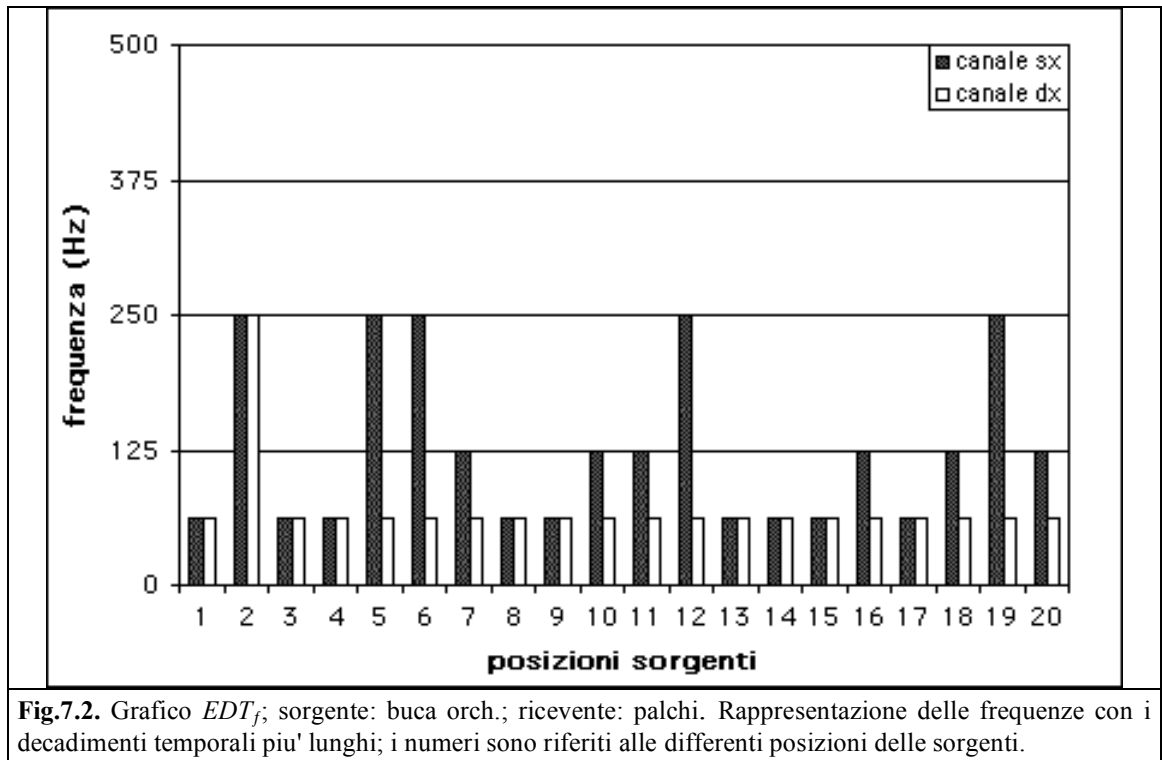
Innanzitutto e' da notare la differente risposta che viene ricevuta in platea (Fig 7.1) rispetto ai palchi superiori (Fig.7.2): nella platea il suono ricevuto e' piu' compatto da un punto di vista binaurale, in quanto nonostante vi sia del ritardo fra la ricezione del suono da parte dei due padiglioni auricolari dx e sx (tale ritardo rappresentato dalla $IACC$ non e' da confondere con l' EDT_f che invece rappresenta *il piu' lungo decadimento temporale associato ad una frequenza*), le frequenze con il piu' lungo decadimento coincidono con il segnale ricevuto dai due orecchi. Nel grafico di Fig.7.1 infatti, sia l'orecchio sx che l'orecchio dx ricevono la stessa frequenza con il piu' lungo ritardo temporale (circa il 90%), mentre nel grafico di Fig. 7.2 (ricevente nei palchetti), alcune frequenze con il piu' lungo decadimento temporale si diversificano da un orecchio all'altro (circa il 50%), non solo ma le frequenze ricevute in platea sono mediamente intorno al 250 Hz mentre invece quelle ricevute nei palchi superiori, si aggirano mediamente al 63 Hz; si vedranno, attraverso questo studio sperimentale, le possibili cause ipotizzabili.

Se si esaminassero alcune dimensioni metriche come per esempio, l'altezza da pavimento del palchetto ricevente (situato nel 3° ordine), e l'altezza fra quest'ultimo e il plafond, che sono rispettivamente pari a 8m e 6,5m; si potrebbe formulare l'ipotesi che proprio in riferimento a queste distanze, l'influenza delle prime riflessioni provenienti dal plafond e' piu' condizionante, in quanto la distanza e' piu' breve di circa 1,5m; anche se la differenza non e' notevole, questa e' sufficiente ad influenzare l' EDT e di conseguenza la percezione che un soggetto ha delle prime riflessioni.

da "Room Acoustics"; Kuttruff, H.; 4th Edition, Spon Press, 2000.

In base al diagramma di Fig.7.2, risulta evidente la corrispondenza fra la banda in frequenza del 63 Hz e il plafond da cui provengono le prime riflessioni con il piu' lungo ritardo, infatti facendo la percentuale delle riflessioni relative alle bande in frequenza del grafico in Fig.7.2, si avra':





Percentuale delle riflessioni relative alla banda in frequenza del 63 Hz = 70%.

Percentuale delle riflessioni relative alla banda in frequenza del 125 Hz = 15%.

Percentuale delle riflessioni relative alla banda in frequenza del 250 Hz = 15%.

Risulta quindi indubbio che la frequenza dominante che viene proiettata dal plafond sui palchi attraverso le riflessioni, e' proprio il 63 Hz; e da una analisi geometrica del plafond in base ai disegni, il raggio di curvatura risulta essere di 24m circa; vediamo adesso se esiste qualche relazione, in base alla formula (4.1), fra il raggio di curvatura della copertura e la banda di frequenza del 63 Hz. La frequenza relativa al 9° modo e quindi per $n_x = 9$ e per $l_x = 24m$ della formula (4.1), considerando solamente i modi assiali (dato che in una circonferenza gli altri due modi, tangenziali e obliqui non hanno praticamente rilevanza) ed una velocita' $c = 344ms^{-1}$; sara':

$$f_9 = \underline{64,5 \text{ Hz.}}$$

E' necessario a questo punto fare una analisi del risultato (vedi Tab.7.1): i primi 5 modi ($n_1 = 7,1$ Hz; $n_2 = 14,3$ Hz; $n_3 = 21,5$ Hz; $n_4 = 28,6$ Hz e $n_5 = 35,8$ Hz) non sono interpretabili attraverso la R.I. dato che questa ha come frequenza di partenza (vedi paragrafo 2.4) $\omega_l = 40$ Hz.

Il 6°, il 7° e l'8° modo ($n_6 = 43,0$ Hz; $n_7 = 50,1$; $n_8 = 57,3$ Hz) non sono, per altro verso, rilevabili dalla lettura in banda d'ottava analizzata dal computer che passa dalla frequenza del 31,5 Hz (che pero' e' stata scartata fin dall'inizio) alla frequenza del 63 Hz; quindi non rimane altro che il 9° modo riportato in Tab.7.1 ad essere rilavato, e quindi pur essendoci uno scarto di circa 1,5 Hz, si puo' affermare che la lettura in frequenza del parametro EDT, trova dei riscontri con l'analisi modale nonche' dalla lettura in frequenza della Risposta all'Impulso. Inoltre, l'ipotesi che nei palchi del 3° ordine del teatro vi siano maggiormente riflessioni provenienti dalla copertura, viene rafforzata dalla lettura in frequenza della R.I. presentata nel (Capitolo 5), dove sono maggiormente presenti frequenze multiple del 43 Hz (sorgente: buca d'orch.; ricevente: palchi 3° ordine). Infatti come si puo' notare, il 6° modo e' praticamente coincidente ($n_6 = 43$ Hz) e quindi l'ipotesi puo' dirsi confermata.

1°	7,1 Hz	I primi 5 modi sono da ritenersi non rilevanti in quanto non registrati dalla R.I. che ha come frequenza di partenza $\omega_l = 40$ Hz (vedi paragrafo 2.4).
2°	14,3 Hz	
3°	21,5 Hz	
4°	28,6 Hz	
5°	35,8 Hz	
6°	43,0 Hz	Questi modi, non sono importanti in quanto non rilevabili dalla banda d'ottava analizzata dal computer, che passa dalla frequenza del 31,5 Hz (che pero' e' stata scartata fin dall'inizio) alla frequenza del 63 Hz.
7°	50,1 Hz	
8°	57,3 Hz	
9°	64,5 Hz	Questo e' il 1° modo rilevabile dal computer e, seppur con uno scarto di 1,5 Hz (rientrante comunque nella larghezza di banda del 63 Hz), il risultato puo' considerarsi verificato e corrispondente alle frequenze del grafico di Fig.7.2.
Tab.7.1. Descrizione dei modi relativi al raggio della copertura del teatro.		

Si veda adesso il grafico di Fig.7.1 relativo ai ricevitori in platea (sorgente in buca d'orchestra):

Percentuale delle riflessioni relative alla banda in frequenza del 63 Hz = 5%.

Percentuale delle riflessioni relative alla banda in frequenza del 125 Hz = 25%.

Percentuale delle riflessioni relative alla banda in frequenza del 250 Hz = 70%.

Risulta quindi, che la banda della frequenza dominante e' quella relativa al 250 Hz; si deve ora indagare quale potrebbe essere l'elemento architettonico che attraverso le sue dimensioni e' in grado di condizionare temporalmente la durata del decadimento della frequenza suddetta. In base alle misure riportate nel sottoparagrafo (2.2.3), si nota che l'altezza della buca d'orchestra e' pari a 2m circa, quindi riapplicando la (4.1) solamente per i modi assiali si trova che per $n_x = 3$ e per $l_x = 2m$ e per una velocita' $c = 344ms^{-1}$, il risultato e' uguale a:

$$f_3 = \underline{258 \text{ Hz}}$$

In base a questo risultato si deduce che fra la frequenza dominante del grafico in Fig.7.1 ovvero il 250 Hz ed il 3° modo cioe' $f_3 = 258 \text{ Hz}$, puo' esserci una correlazione; attraverso la seguente tabella (Tab.7.2) si verifichera' il perche'.

1°	86 Hz	Questi modi, non sono importanti in quanto non rilevabili dalla banda d'ottava analizzata dal computer, che passa dalla frequenza del 63 Hz alla frequenza del 125 Hz, entrambe troppo lontane rispetto a questi due modi.
2°	172 Hz	
3°	258 Hz	Questo e' il 1° modo rilevabile dal computer e, anche con uno scarto di 8 Hz (che rientra nella larghezza di banda del 250 Hz), il risultato puo' considerarsi verificato e corrispondente alle frequenze rilevate nel grafico di Fig.7.1.
Tab.7.2. Descrizione dei modi relativi all'altezza della buca d'orchestra.		

Quindi, in base alla Tab. 7.2, l'ipotesi iniziale in base alla quale l'EDT, puo' essere anche interpretato come un descrittore modale, risulta verificata, e cio' in base anche ai risultati presentati nel Cap.5.0 relativo alla lettura in frequenza della R.I..

Inoltre se si volesse definire ulteriormente il campo dello stesso grafico (Fig.7.1), si nota che la media percentuale della prima fila di sorgenti (1÷5), ha una media differente rispetto alla media generale prima calcolata, infatti la prima fila essendo stata posta nella parte scoperta della buca e quindi immediatamente sopra l'arco scenico risente dell'influenza di quest'ultimo che ha un'altezza come detto prima di 14m circa (vedi sottoparagrafo 2.2.2); quindi sempre applicando la formula modale (4.1), sfruttando solamente i modi assiali per compararli con l'altezza, si avra':

per $n_x = 10$ e per $l_x = 14\text{m}$:

$$f_{10} = \underline{122,9 \text{ Hz.}}$$

C'e' uno scarto di 2,1 Hz ma il risultato puo' essere considerato verificato; vediamo il perche' attraverso la Tab.7.3 seguente.

1°	12,2 Hz	I primi 3 modi sono da ritenersi non rilevanti in quanto non registrati dalla R.I. che ha come frequenza di partenza $\omega_l = 40\text{Hz}$ (vedi paragrafo 2.4).
2°	24,5 Hz	
3°	36,8 Hz	
4°	49,1 Hz	
5°	61,4 Hz	Questi modi, non sono importanti (a parte il 5° modo che poteva essere rilevato dalla banda d'ottava del 63 Hz) in quanto non rilevabili dalla banda d'ottava analizzata dal computer, che passa dalla frequenza del 31,5 Hz (che pero' e' stata scartata fin dall'inizio) alla frequenza del 63 Hz e da questa direttamente al 125 Hz.
6°	73,7 Hz	
7°	86,0 Hz	
8°	98,2 Hz	
9°	110,5 Hz	
10°	122,8 Hz	Questo e' il 2° modo rilevabile dal computer e, seppur con uno scarto di 2,2 Hz (rientrante comunque nella larghezza di banda del 125 Hz), il risultato puo' considerarsi verificato e corrispondente alle frequenze del grafico di Fig.7.2.

Tab.7.3. Descrizione dei modi relativi all'altezza dell'arco scenico.

N.B.: l'ipotesi relativa all'arco scenico e quindi alla Tab.7.3, non e' pienamente verificata in quanto dovrebbe essere il 5° modo (61,4 Hz) ad essere rilevato per primo,

invece e' stato rilevato il 10° modo (122,8 Hz), che nonostante tutto e' legato da un rapporto d'ottava in quanto e' il doppio del valore ($61,4 \times 2 = 122,8$ Hz) e quindi non molto distante in termini di acustica musicale.

Quindi, in base a questi risultati che verificano l'ipotesi di relazione fra raggio di curvatura del plafond e le riflessioni da esso uscenti in direzione dei palchetti, ma anche le ipotesi riguardanti il sottopalco dove risiede l'orchestra nonche' la risposta dell'arco scenico; si traccia un'analisi riassuntiva derivante dall'ipotetica validita' del parametro EDT_f , variante sperimentale del piu' noto *EDT*, per l'indagine dei modi propri come ipotizzato dal Kuttruff [4], e di conseguenza l'indagine nel campo delle frequenze, della miglior risposta che puo' essere chiesta ad un Teatro d'Opera, dato che la sua funzione e' quella di diffondere nel miglior modo un sistema legato da leggi note com'e' appunto il sistema armonico musicale: le riflessioni ricevute dai palchi sono influenzate maggiormente dal plafond e cio' e' verificabile da un punto di vista geometrico, modale e infine anche attraverso le risposte all'impulso binaurali; tramite la variante del parametro *EDT*.

Le riflessioni ricevute in platea dalle sorgenti poste in buca, sono fortemente condizionate dal luogo in cui vi e' la sorgente, a differenza delle riflessioni ricevute nei palchi le quali sono piu' condizionate dalla copertura del teatro. Per quanto riguarda invece l'influenza dell'arco scenico, si rimanda la verifica a successive misurazioni mirate a tale elemento.

7.5 Conclusioni

La verifica del parametro *EDT* attraverso la lettura in frequenza per mezzo del decadimento temporale piu' lungo (EDT_f), puo' considerarsi confermata per quanto

riguarda questo studio, dimostrandosi utile se non altro per avere maggiori dettagli circa l'influenza che subisce il percorso dei raggi sonori; naturalmente per una maggiore attendibilita' si necessitano altri studi su altri teatri, ma per quanto riguarda questo caso il riscontro che tale parametro e' largamente correlato alla media delle costanti di smorzamento dei modi propri dell'ambiente eccitati dall'impulso, risulta verificato, presentando inoltre, dei punti di coerenza con la lettura in frequenza della R.I., infatti per quanto riguarda il ricevente nei palchi (Fig.7.2), si nota una influenza da parte della copertura, mentre con il ricevente in platea (Fig.7.1), si notano due influenze che si differenziano in base alla 1° fila e alla 2° fila della buca d'orchestra. Le sorgenti nella 1° fila sono subornate dalle riflessioni provenienti dall'arco scenico, mentre le sorgenti nella 2° fila sono subordinate dalle riflessioni, o piu' precisamente dalle onde stazionarie, che si formano nella buca d'orchestra sotto il palcoscenico.

8.0 Conclusioni finali

Il capitolo relativo alle misurazioni acustiche e alla discussione dei dati nel dominio del tempo, ha permesso di riscontrare tre tipologie di problematiche: la prima riguarda il taglio del proscenio avvenuto nella fase di restauro del 1914, che ha provocato uno sbilanciamento dell'intensita' acustica fra orchestra posta in buca e i cantanti situati nel palcoscenico; la seconda si riferisce alla copertura della sala che in base ai dati fin qui raccolti, risulta avere un raggio di curvatura insufficiente e quindi una eccessiva concavita' che produce delle focalizzazioni dei raggi sonori, con conseguente divergenza della direzionalita' fra raggio diretto e raggio riflesso, da un punto di vista binaurale. Infine, la terza problematica riscontrata riguarda l'errata proporzione delle tre direttrici spaziali, soprattutto per cio' che riguarda l'altezza del teatro rispetto alla larghezza e alla lunghezza, infatti, la misura dell'altezza e' superiore alle altre due dimensioni, aumentando da una parte la divergenza della direzionalita' di cui sopra, dall'altra l'insorgenza del fenomeno di *flutter eco*.

Per quanto riguarda poi le proporzioni dell'involucro architettonico, si e' svolto un ulteriore studio mirato alla ricerca delle migliori dimensioni spaziali da un punto di vista acustico e, in special modo, per cio' che riguarda la migliore diffusione della energia sonora. Attraverso la teoria modale in correlazione con i principi base della acustica musicale e quindi attraverso la struttura armonica del sistema tonale, si sono ricercati i migliori rapporti spaziali per un ambiente, successivamente questi sono stati confrontati con i rapporti di altri ricercatori tra cui Beranek, ottenendo dei buoni risultati riscontrabili oggettivamente.

Lo studio della lettura in frequenza della risposta all'impulso (R.I.) e in special modo di 24 risposte posizionate in vari punti del palcoscenico e della buca d'orchestra, ha messo in evidenza due costanti numeriche relative alle frequenze ricevute, attraverso poi l'evoluzione temporale, si e' visto che tali costanti si comportano come dei sottomultipli delle frequenze piu' alte. Questo studio si e' dimostrato particolarmente incoraggiante in quanto rappresenta un modo innovativo di interpretare le R.I., indicando delle corrispondenze puntuali con la teoria modale e quindi con gli elementi architettonici componenti l'involucro teatrale, permettendo inoltre una analisi minuziosa del percorso dei raggi sonori, e delle influenze che questi subiscono durante il loro tragitto; cosi' da favorire eventuali correzioni da eseguire in fase di restauro. Inoltre, tali risultati hanno confermato le problematiche precedentemente evidenziate.

La teoria dei modi applicata a grandi ambienti e, in questo caso ad un teatro, si e' dimostrata di notevole efficacia, e percio' si sono ricercate le possibili motivazioni servendosi del concetto dell'asimmetria di assorbimento proposto da Arau [35], che e' in contrasto con la teoria del campo uniformemente diffuso su cui si basa la teoria di Schroeder [33] inerente la frequenza di taglio per grandi ambienti.

Per quanto poi concerne la lettura in frequenza della R.I. in correlazione con il parametro temporale EDT , si sono trovati alcuni importanti collegamenti. La lettura in frequenza dell' EDT , attraverso il parametro sperimentale sviluppato in questa tesi come EDT_f , ha dimostrato di essere particolarmente importante, rilevando interessanti riscontri non solo con la R.I. in frequenza, ma anche con la teoria dei modi,

confermando ulteriormente i concetti sviluppati da altri autori [22-23] circa il legame del parametro *EDT* con la geometria degli spazi.

Le Appendici poste alla fine di questo studio dimostrano come l'eccessiva concavità della copertura, di pari passo con l'eccessiva altezza alla quale è posta, trovi conferma attraverso l'applicazione di un metodo grafico costruito su base geometrica. Successivamente, la simulazione di una nuova copertura, concepita con un raggio di curvatura più ampio e con un posizionamento più basso rispetto alla stessa, ha provato che la distribuzione dei raggi simulati ha ottimizzato notevolmente la loro diffusione, confermando quindi l'ipotesi iniziale.

Nell'Appendice II si è cercato di capire, a livello geometrico, ciò che non è rilevabile attraverso la R.I., ovvero la presenza del fenomeno del *flutter eco* in alcune zone della platea. Infatti, attraverso tale metodo, chiamato dell'*iperbole limite*, è stata delimitata la zona in cui è udibile il *flutter eco*.

Nell'Appendice III, per mezzo del bilanciamento delle intensità ricevute dal canale destro e sinistro, si è notato un fenomeno di alternanza intensimetrica fra i due canali, oltretutto presente solo nel ricevitore in platea. Tramite un ulteriore metodo grafico, si è potuto constatare che tale alternanza è dovuta alla concavità eccessiva del soffitto del teatro: ad una altezza pari a circa 12m dal pavimento ($r/2 = 12m$) tende, infatti, a divergere la direzione dei raggi sonori.

Appendice I

Il comportamento delle prime riflessioni uscenti dalla copertura, attraverso un'analisi geometrica del loro percorso

Ricordando che il raggio sonoro che colpisce una superficie solida viene riflesso da questa attraverso quel processo conosciuto in ottica come la legge della riflessione, si riporta brevemente la notazione in forma vettoriale [23]:

$$u' = u - 2(un) \cdot n \quad (\text{A.I.1})$$

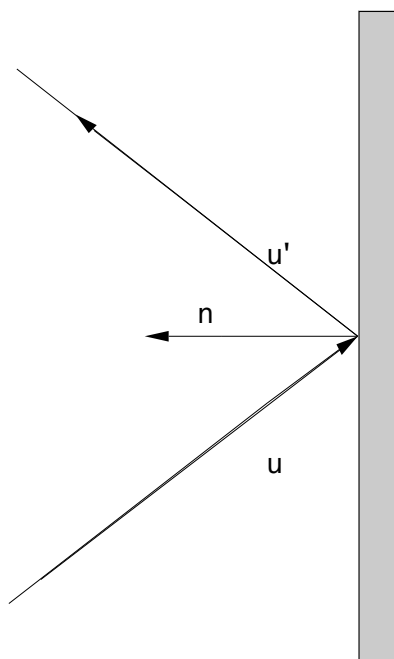


Fig.AI.0. Rappresentazione dei vettori dell'equazione A.I.1

Attraverso la visualizzazione del percorso dei raggi sonori secondo un'analisi di tipo geometrico, si cercherà di capire il loro comportamento per mezzo delle riflessioni provenienti dalla copertura; inoltre viene proposta una simulazione di quest'ultima con due tipi di varianti rispetto all'attuale: un raggio di curvatura raddoppiato per attenuare la concavità, dai 24m di raggio dello stato di fatto ai 48m di raggio dello stato

simulato, e un abbassamento della stessa di circa 1,3m al colmo, mantenendo inalterato il punto d'imposta.

Partendo dallo stato attuale si può osservare dai raggi uscenti da qualsiasi sorgente, che la concavità della copertura tende a concentrare i fasci dei raggi in zone ben delimitate lasciandone scoperte, di conseguenza, altre. Se si osservano le Figg.AI.1-2 che rappresentano le sorgenti poste nella 1° e 2° fila del palcoscenico, si nota che le prime riflessioni tendono a colpire due parti del teatro¹, lo spicchio di volta adiacente all'arco scenico indirizza i raggi fra il loggione ed il 4° ordine di palchi, mentre il secondo spicchio di volta dirige i raggi fra il 2° e 3° ordine di palchi.

Se invece esaminiamo la Fig.AI.3, si può rilevare che il primo spicchio di volta dirige i raggi verso il loggione, mentre il secondo dirige il percorso dei raggi fra il 3° e 4° ordine di palchi; osservando inoltre la 4° fila delle sorgenti su palcoscenico (Fig.AI.4), si rileva che i due fasci di raggi provenienti dai due spicchi di volta sono ulteriormente saliti, infatti dal primo si nota che i raggi colpiscono la spalla opposta della volta e dal secondo spicchio invece si dirigono verso il 4° ordine di palchi. Volendo approfondire le riflessioni relative alla Fig.AI.4, va innanzitutto detto che il raggio incidente che colpisce la parte iniziale della volta e il raggio riflesso che colpisce il lato opposto della stessa, rappresenta una anomalia circa la corretta distribuzione dell'energia acustica; nella pratica i cantanti che si situeranno oltre la metà del palcoscenico, saranno difficilmente udibili o per lo meno lo saranno solo in alcune zone del teatro.

Un discorso diverso va fatto per le sorgenti presenti nella 1° fila della buca d'orchestra (Fig.AI.5), infatti queste, dovutamente alla minor distanza dal centro delle

¹ Cio' è dovuto, come si può osservare dalla sezione, dall'inclinazione differente degli spicchi della volta di copertura, il raggio di curvatura è lo stesso ma non l'inclinazione degli spicchi, provocando così due concentrazioni distinte dei raggi sonori.

circonferenze della copertura, producono un fascio di raggi meglio distribuito, anche se le riflessioni del 2° ordine (linea tratteggiata in figura), mostrano un andamento caotico e poco diffusivo e come si vedra' nell'Appendice II, tendente alla formazione di *eco* di tipo *flutter*.

Per quanto riguarda invece le simulazioni del soffitto posto ad una altezza di colmo minore rispetto al pavimento, ma soprattutto con un raggio di curvatura piu' ampio, tali simulazioni, almeno a livello geometrico, si sono dimostrate piu' diffondenti nei confronti delle riflessioni, soprattutto per quanto riguarda la sorgente posta in buca d'orchestra (Fig.AI.8) che risulta essere senza concentrazioni di raggi ma anzi, questi risultano essere ben distribuiti all'interno di tutta la sala.

In conclusione di questa analisi si puo' affermare che le ipotesi iniziali circa l'eccessiva concavita' della copertura e l'eccessiva altezza di questa, soprattutto rispetto alla larghezza del teatro, sono confermate anche dall'analisi geometrica del percorso dei raggi; la copertura simulata di cui alle Figg.AI.7-8, si dimostra molto piu' diffusiva rispetto a quella attuale, lasciando meno zone del teatro scoperte da un punto di vista della percorrenza dei raggi. Si dimostra verificata quindi attraverso questo semplice schema di simulazione la tesi prima menzionata, riguardo al raggio di curvatura troppo corto e allo stesso tempo l'eccesso in altezza della copertura.

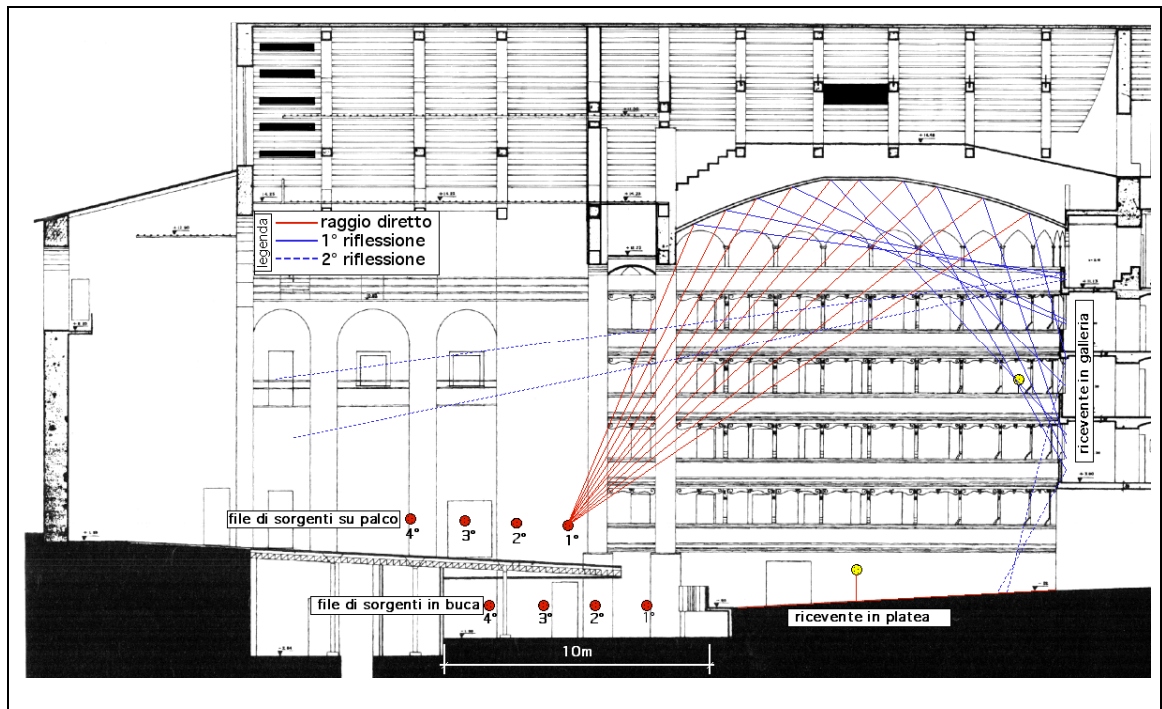


Fig.AI.1. Sezione longitudinale del Teatro Nuovo: rappresentazione delle prime riflessioni provenienti dalla copertura attraverso la sorgente posta nella 1° fila del palcoscenico.

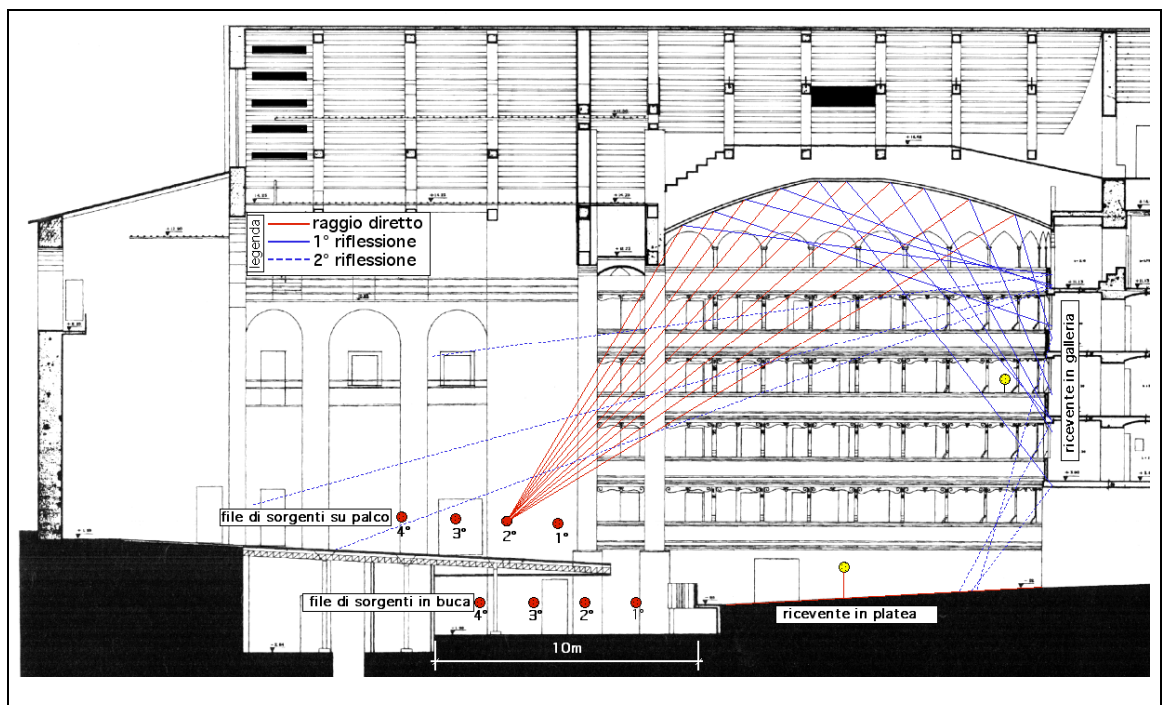


Fig.AI.2. Sezione longitudinale del Teatro Nuovo: rappresentazione delle prime riflessioni provenienti dalla copertura attraverso la sorgente posta nella 2° fila del palcoscenico.

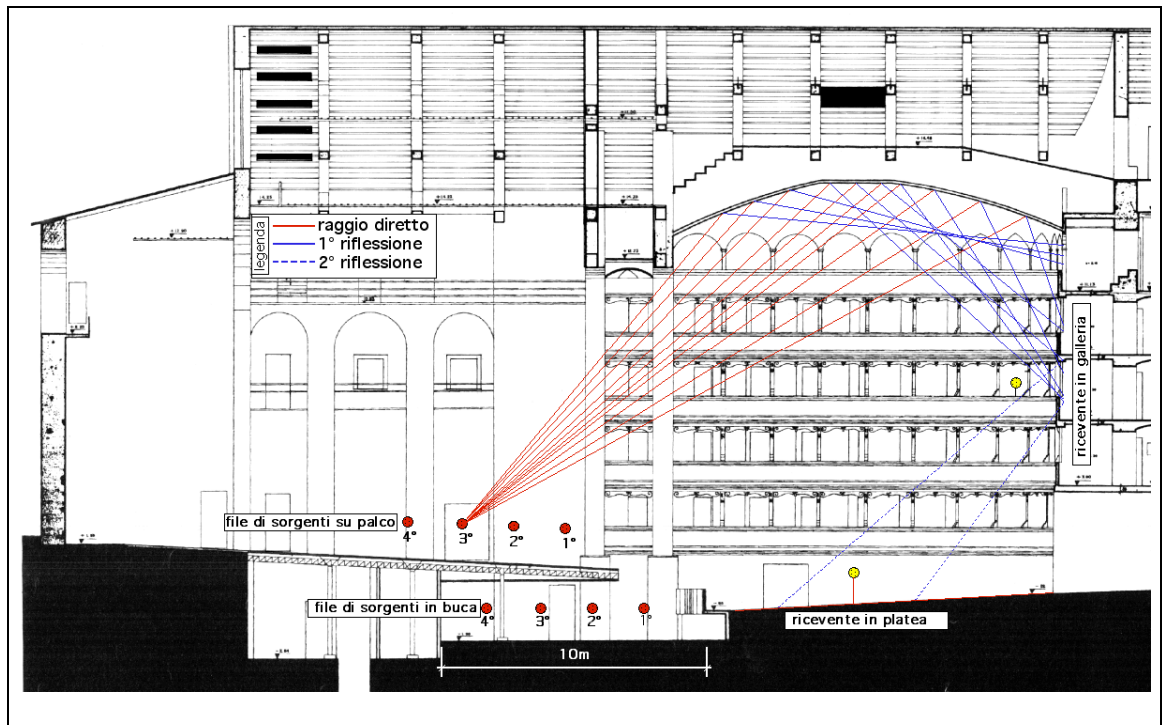


Fig.AI.3. Sezione longitudinale del Teatro Nuovo: rappresentazione delle prime riflessioni provenienti dalla copertura attraverso la sorgente posta nella 3° fila del palcoscenico.

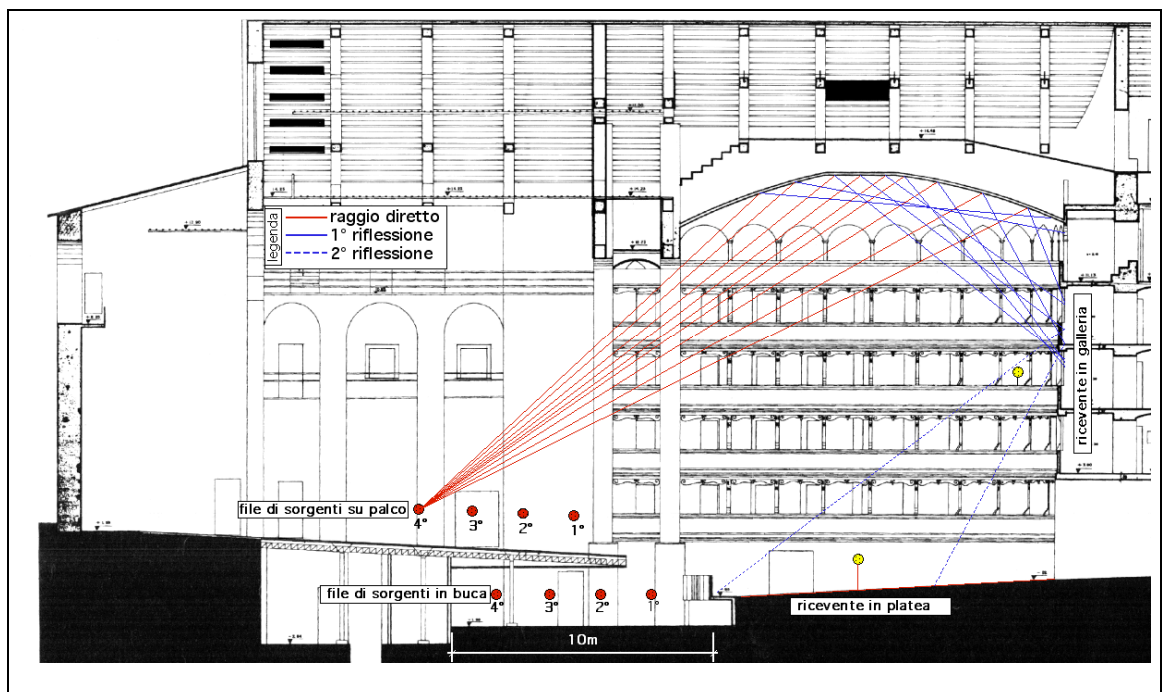


Fig.AI.4. Sezione longitudinale del Teatro Nuovo: rappresentazione delle prime riflessioni provenienti dalla copertura attraverso la sorgente posta nella 4° fila del palcoscenico.

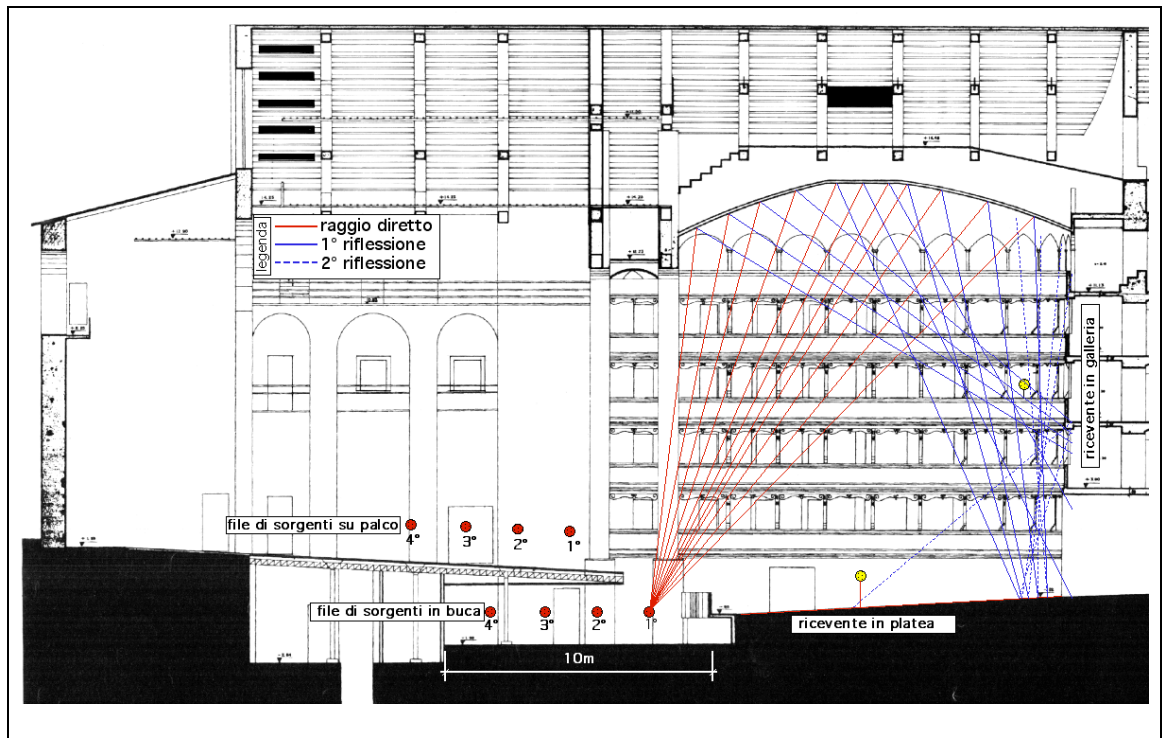


Fig.AI.5. Sezione longitudinale del Teatro Nuovo: rappresentazione delle prime riflessioni provenienti dalla copertura attraverso la sorgente posta nella 1° fila della buca d'orchestra.

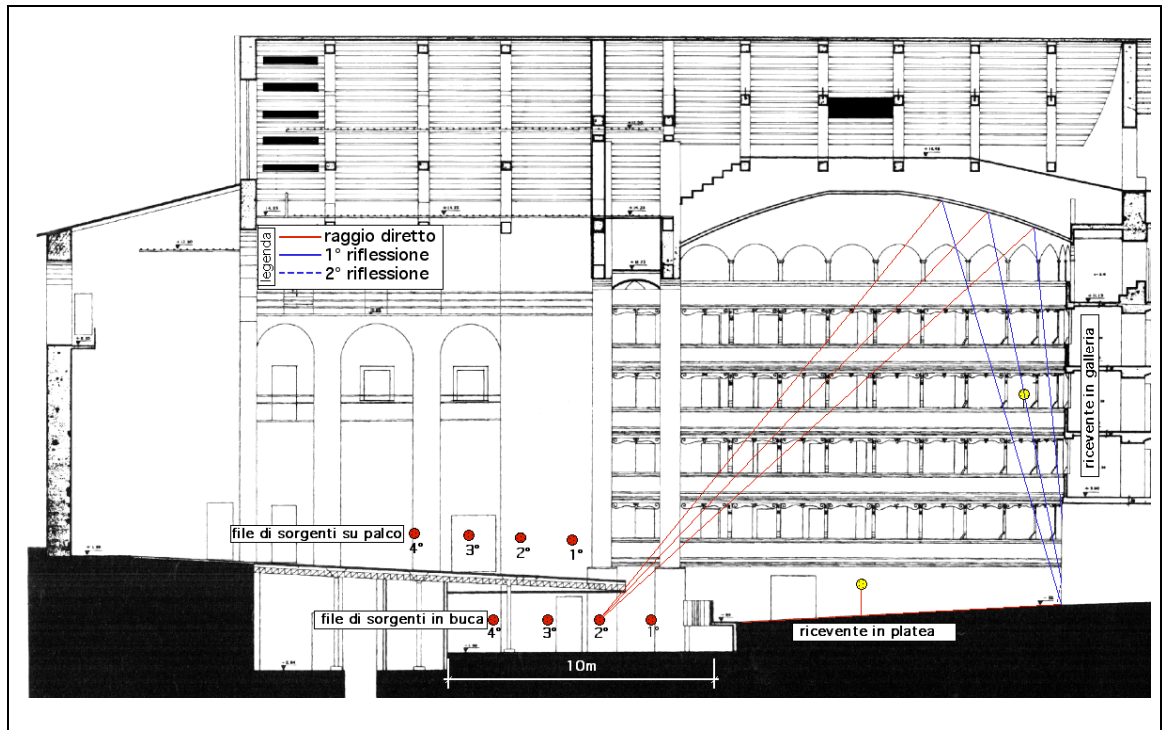


Fig.AI.6. Sezione longitudinale del Teatro Nuovo: rappresentazione delle prime riflessioni provenienti dalla copertura attraverso la sorgente posta nella 2° fila della buca d'orchestra.

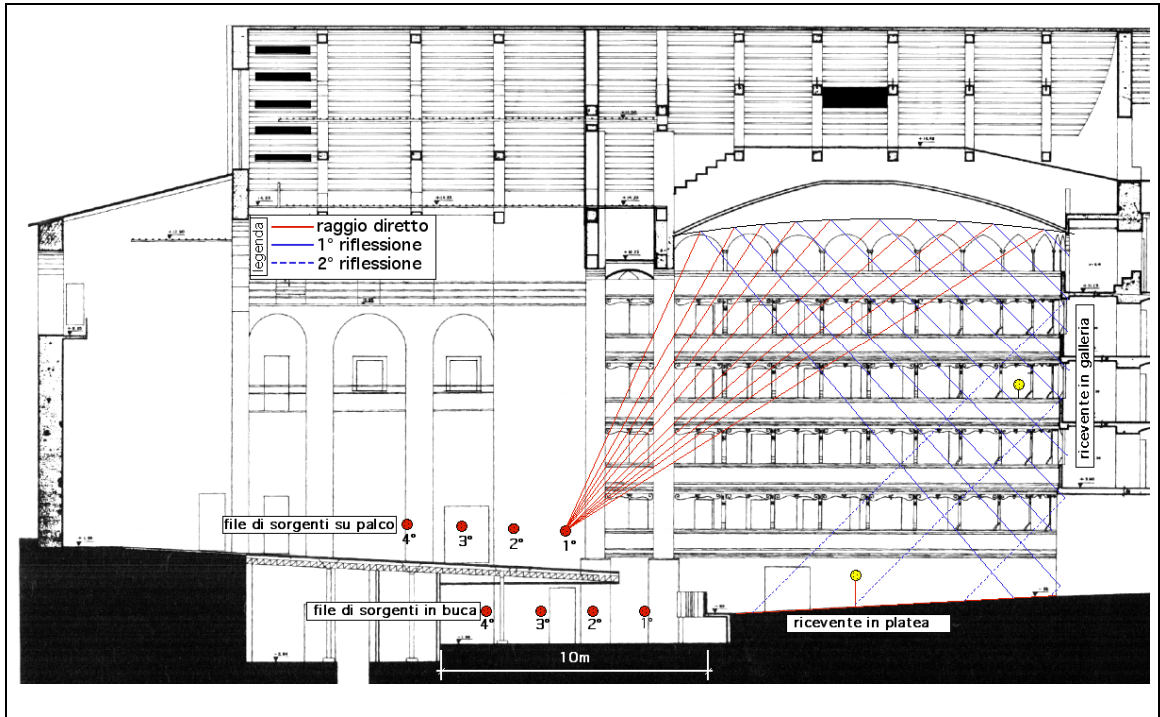


Fig.AI.7. Sezione longitudinale del Teatro Nuovo: rappresentazione delle prime riflessioni provenienti dalla simulazione di una nuova copertura attraverso la sorgente posta nella 1° fila del palcoscenico.

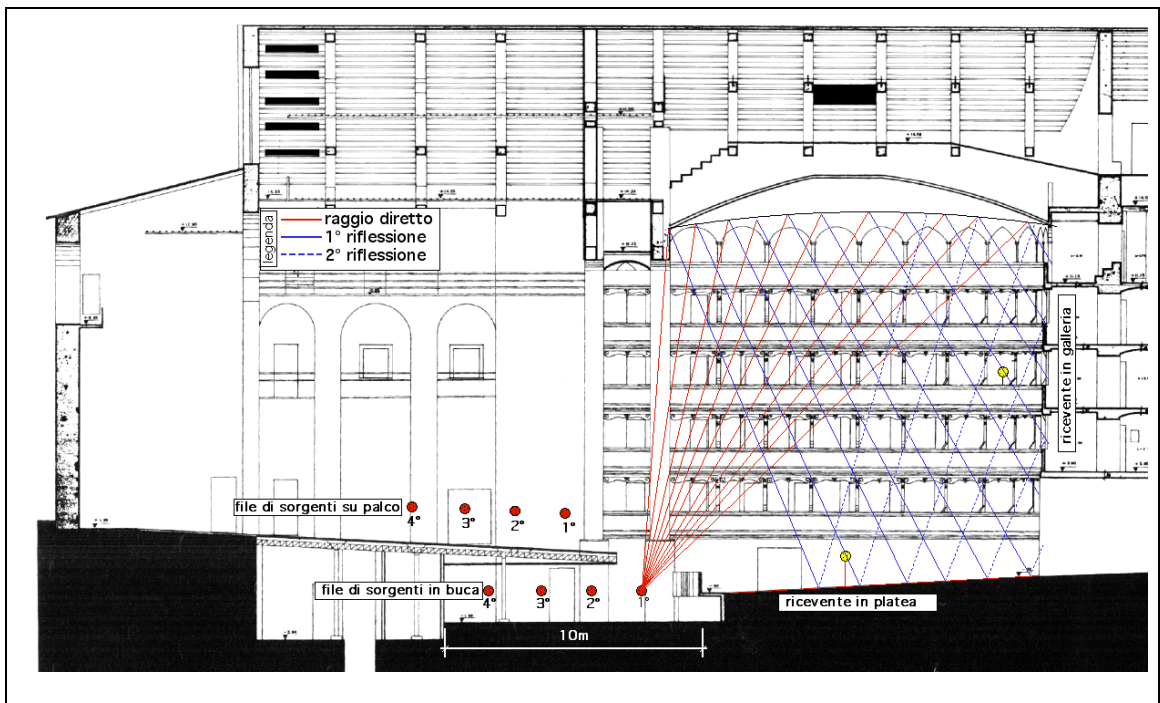


Fig.AI.8. Sezione longitudinale del Teatro Nuovo: rappresentazione delle prime riflessioni provenienti dalla simulazione di una nuova copertura attraverso la sorgente posta nella 1° fila della buca d'orchestra.

Appendice II

Determinazione della zona d'eco all'interno del Teatro Nuovo. Costruzione dell'iperbole limite.

Attraverso i metodi grafici per la determinazione delle zone d'eco dovute a pareti curve [39], si distinguono due casi a seconda che la sorgente sonora si trovi o no nel centro di curvatura; ed inoltre si suole distinguere in altri 3 sottogruppi, 1) quando il raggio incidente nella superficie sia uguale a 17m, 2) sia minore di 17m oppure 3) sia maggiore di 17m; nel caso in esame la sorgente non e' nel centro di curvatura e i raggi sono generalmente appartenenti al 3° sottogruppo, negli altri casi non si e' rilevato il problema di eco.

Attraverso la Fig.AII.1, si descrivera' questo semplice e chiaro metodo grafico per la determinazione delle eventuali zone d'eco all'interno del Teatro Nuovo: condotto dalla sorgente S il raggio incidente alla superficie in un punto qualsiasi P , si determini la tangente t (in alternativa si ribalti specularmente la retta $\overline{SP}$ in $\overline{PQ}$, attraverso il raggio $\overline{cP}$ condotto in P), nella retta $\overline{SP}$ si inserisca il punto K posto a 17 m da S . Per K si condurra' allora la parallela alla bisettrice dell'angolo formato dal raggio incidente $r1$ e dal raggio riflesso $r2$, fino ad incontrare il prolungamento di $r2$ in K' ; si congiunga ora il punto K' con S e dalla meta' del segmento $K'S$ si innalzi la perpendicolare allo stesso, sino ad incontrare la retta $r2$ nel punto Q . Tale punto appartiene alla curva che delimita la zona d'eco, chiamata anche *iperbole limite*.

Infine per la costruzione di quest'ultima, si procede semplicemente ripetendo l'operazione prima descritta, puntando il raggio incidente in quanti punti si riterranno

necessari (piu' punti si troveranno e piu' precisa sara' la costruzione dell'iperbole limite). Osservando la Fig.AII.2 ma soprattutto attraverso la Fig.AII.3, si nota che la zona relativa al *flutter echo* e' delimitata piu' che altro dalla meta' in poi della platea verso il fondo del teatro, comprendendo anche una parte del 1° ordine dei palchetti.

Questo effetto, non propriamente positivo, e' generato piu' intensamente quando la sorgente e' situata nella 1° fila della buca d'orchestra (parte scoperta), in direzione della seconda parte della curvatura del soffitto, e cio' e' dovuto sia alla maggiore distanza ma piu' che altro alla convessita' troppo accentuata. Osservando la Fig.AI.8 dell'Appendice precedente, si e' visto che con una curvatura meno accentuata (portando il raggio della curva da 24m a 48m), non solo si ottiene una migliore distribuzione dell'energia acustica ma si eliminerebbe, molto probabilmente, anche il problema del *flutter eco*.

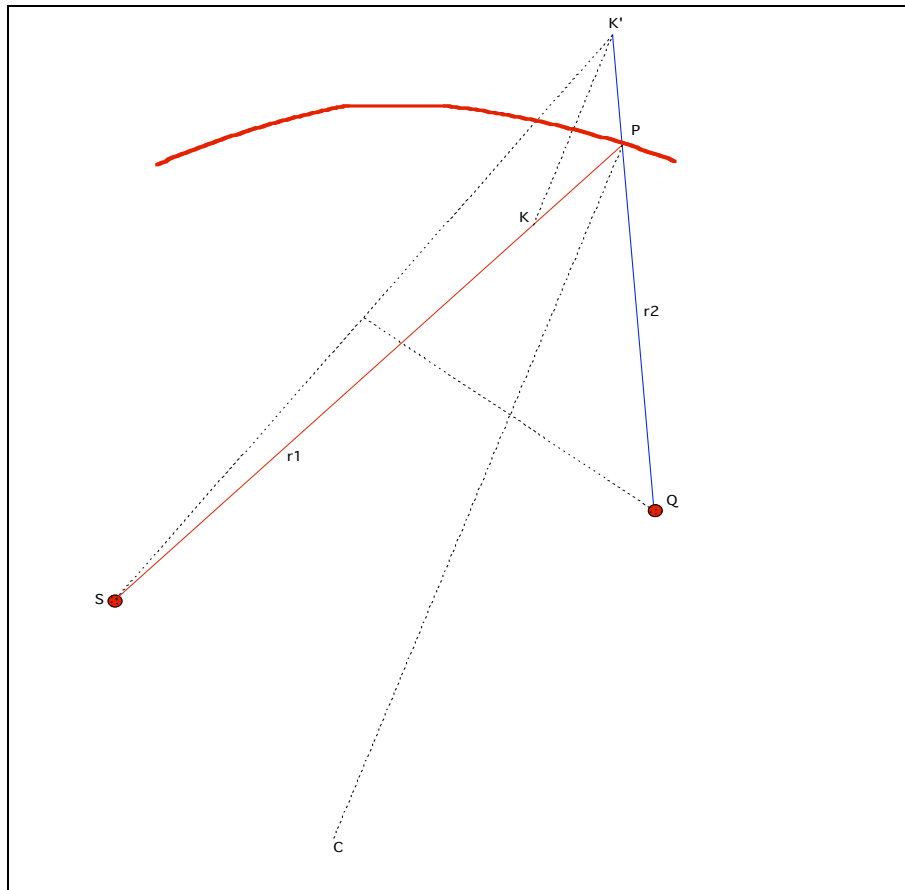


Fig.AII.1. Metodo grafico per l'individuazione per punti dell'iperbole limite delimitante eventuali zone con presenza di eco.

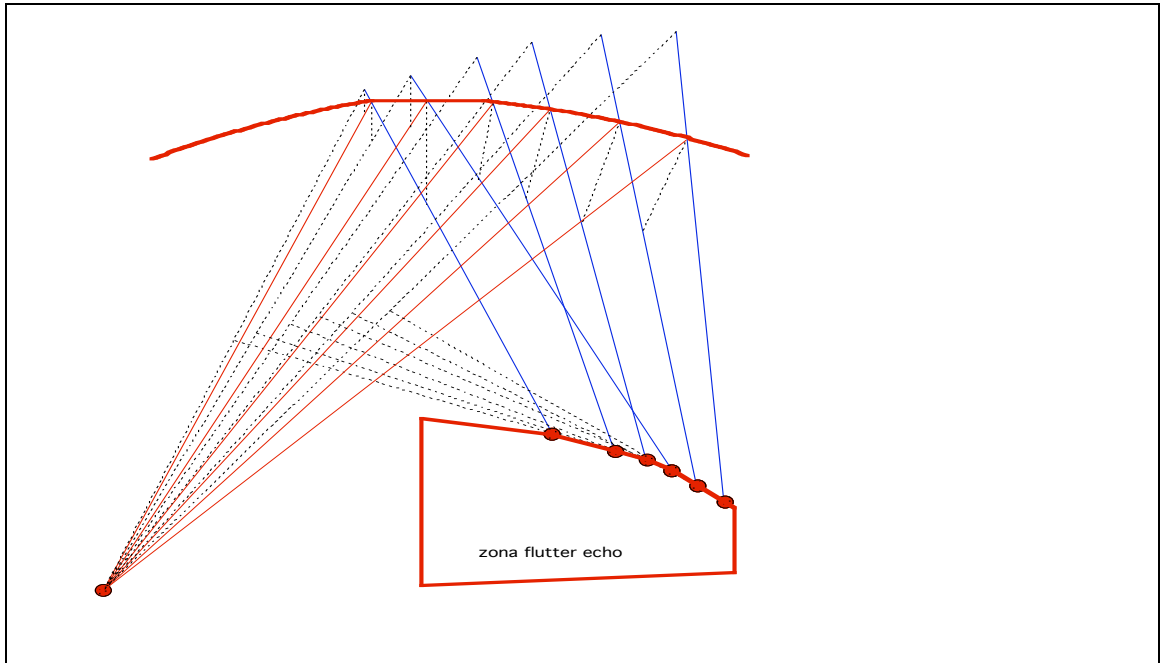


Fig.AII.2. Costruzione dell'iperbole limite per punti. Il numero dei punti e' limitato alla precisione dell'iperbole stessa.

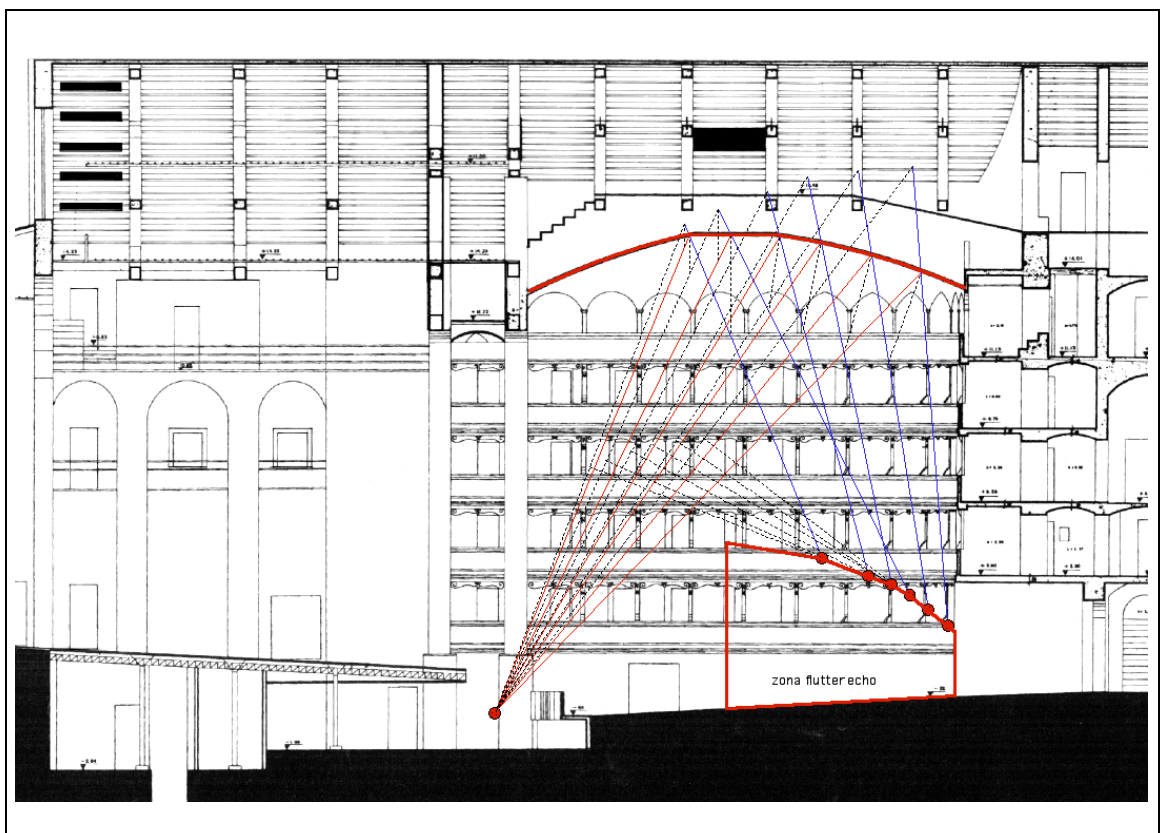


Fig.AII.3. Il metodo grafico dell'iperbole limite applicato al Teatro Nuovo.

Appendice III

Differenza di bilanciamento fra il canale destro e il canale sinistro del ricevente (testa artificiale), in base alla sua posizione

Si e' potuto osservare attraverso l'analisi del bilanciamento dell'intensita' ricevuto dal canale destro e dal canale sinistro della *dummy head* o testa artificiale, che per il ricevente in platea vi e' una alternanza maggiore per quanto riguarda l'ampiezza dell'intensita'. Osservando le Figg.AIII.1-2, ricevente nei palchetti e in platea rispettivamente, e soprattutto la riga centrale delle figure inerente il *Balance*, che per il ricevente nei palchetti, l'intensita' maggiore ricevuta e' per il canale sinistro (colore verde) dato che il posizionamento sia della sorgente che del ricevitore, favoriscono tale situazione. Invece per il ricevente in platea (Fig.AIII.2), l'ampiezza dell'intensita' varia dal canale sinistro a quello destro quasi con una cadenza temporale precisa.

L'ipotesi piu' accreditata per tale comportamento e' quella dovuta al fatto che, come gia' ampiamente detto in precedenza, la curva della copertura del Teatro di Spoleto e' troppo concava e contemporaneamente e' troppo lontana (in questo caso si parla di altezza eccessiva del soffitto) dalla sorgente. Infatti secondo la teoria [23] , si sa che nel caso in cui:

$$S > \frac{r}{2} \quad (\text{AIII.1})$$

dove S rappresenta la distanza della sorgente dalla superficie riflettente ed r e' il raggio della curvatura, si prova che il fascio di raggi sonori uscenti dal soffitto verso la platea subiscono una divergenza di direzione.

Nel caso specifico del Teatro di Spoleto, dove la distanza dalla buca d'orchestra alla copertura varia da un minimo di 15m ad un massimo di 20m circa, e che il raggio della

copertura concava e' di circa 24m, l'ipotesi della divergenza dei raggi e' dimostrata, dato che la distanza S sara' sempre maggiore di $r/2$, e cio' per quanto riguarda l'ascoltatore situato in platea e non per il ricevente situato nei palchetti.

Va pero' precisato che la (A.III.1) e' valida per i raggi uscenti dal centro di curvatura, ma in ogni caso, cio' si verifica anche in taluni casi in cui il fascio di raggi sia spostato dal centro di curvatura, come peraltro si puo' dimostrare attraverso tutte le figure presenti in Appendice III, in cui il ricevente sia posto in platea.

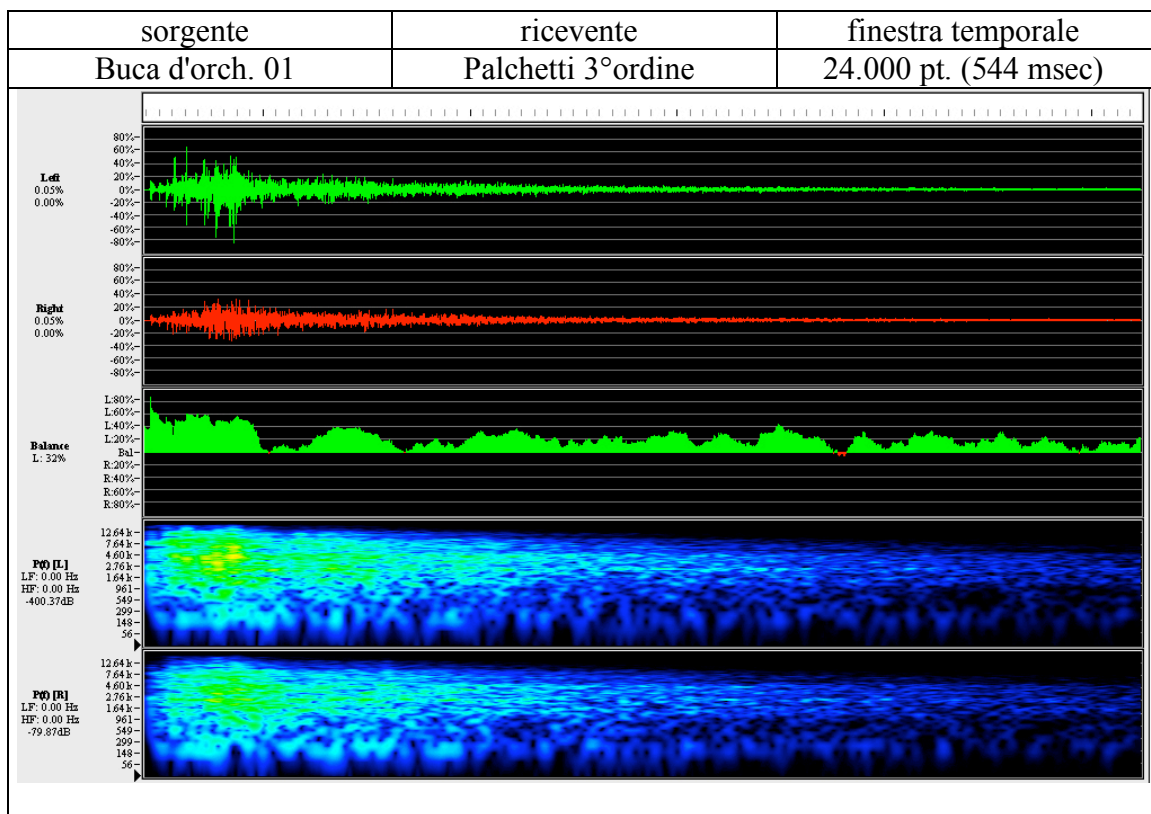


Fig.AIII.1. Immagine della R.I. con il relativo spettrogramma energetico; da notare la riga di centro dove viene rappresentato il bilanciamento dell'intensita' ricevuta dai due canali (verde = sinistro; rosso = destro).

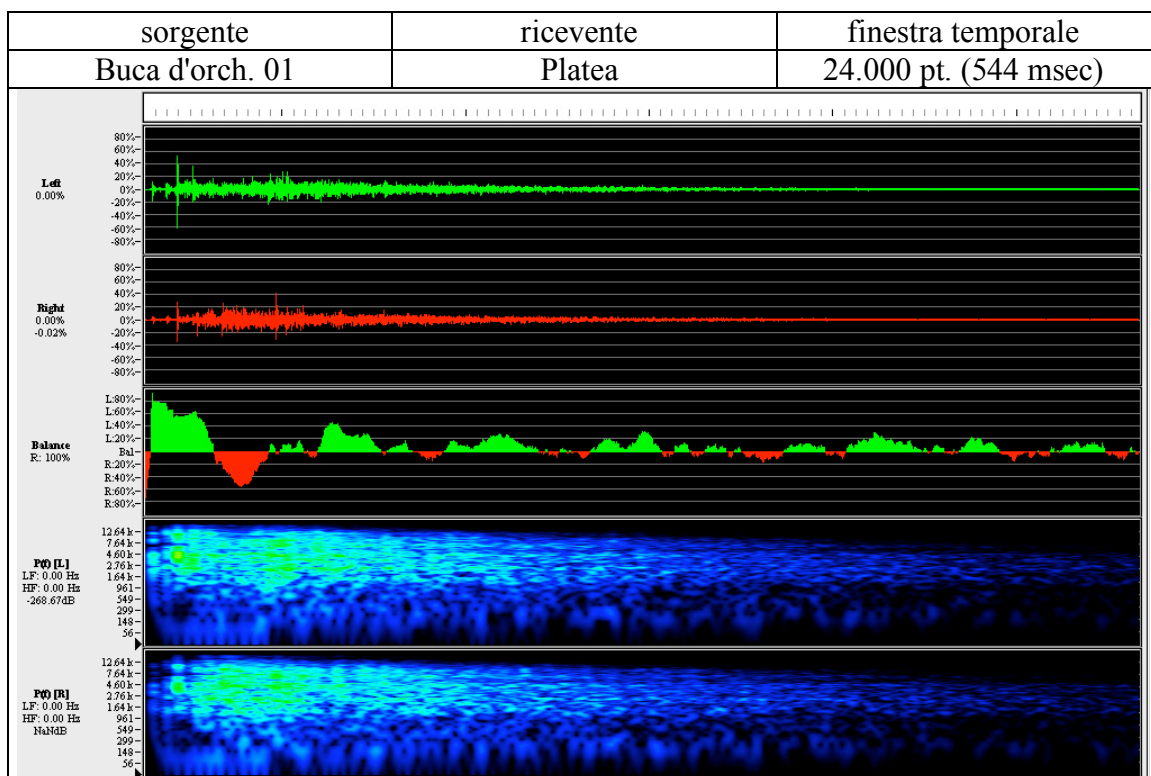


Fig.AIII.2. Immagine della R.I. con il relativo spettrogramma energetico; da notare la riga di centro dove viene rappresentato il bilanciamento dell'intensita' ricevuta dai due canali (verde = sinistro; rosso = destro).

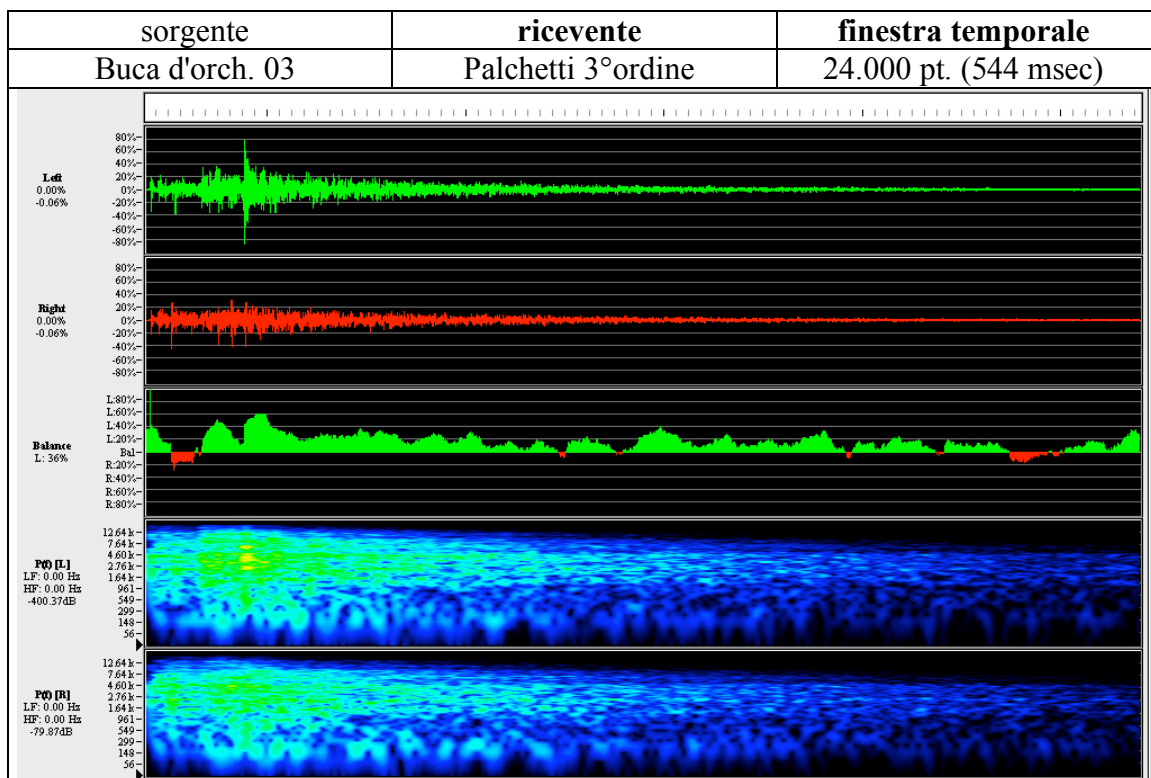


Fig.AIII.3. Immagine della R.I. con il relativo spettrogramma energetico; da notare la riga di centro dove viene rappresentato il bilanciamento dell'intensità ricevuta dai due canali (verde = sinistro; rosso = destro).

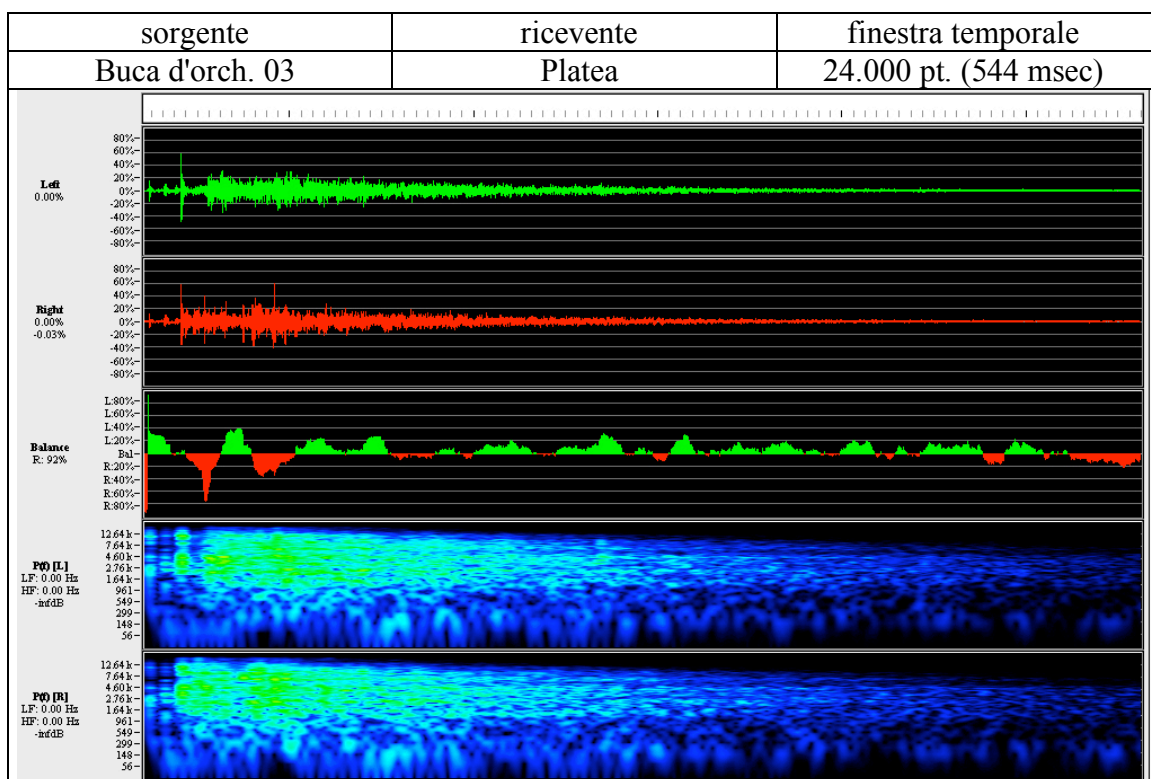


Fig.AIII.4. Immagine della R.I. con il relativo spettrogramma energetico; da notare la riga di centro dove viene rappresentato il bilanciamento dell'intensità ricevuta dai due canali (verde = sinistro; rosso = destro).

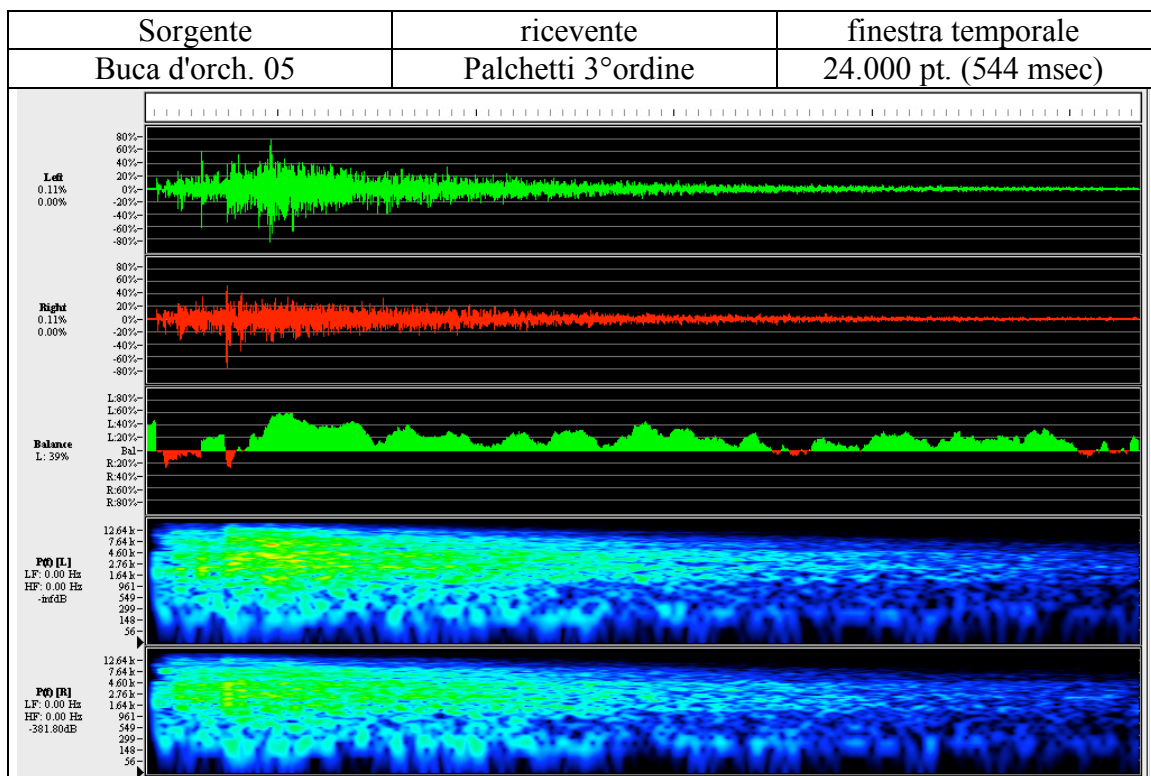


Fig.AIII.5. Immagine della R.I. con il relativo spettrogramma energetico; da notare la riga di centro dove viene rappresentato il bilanciamento dell'intensita' ricevuta dai due canali (verde = sinistro; rosso = destro).

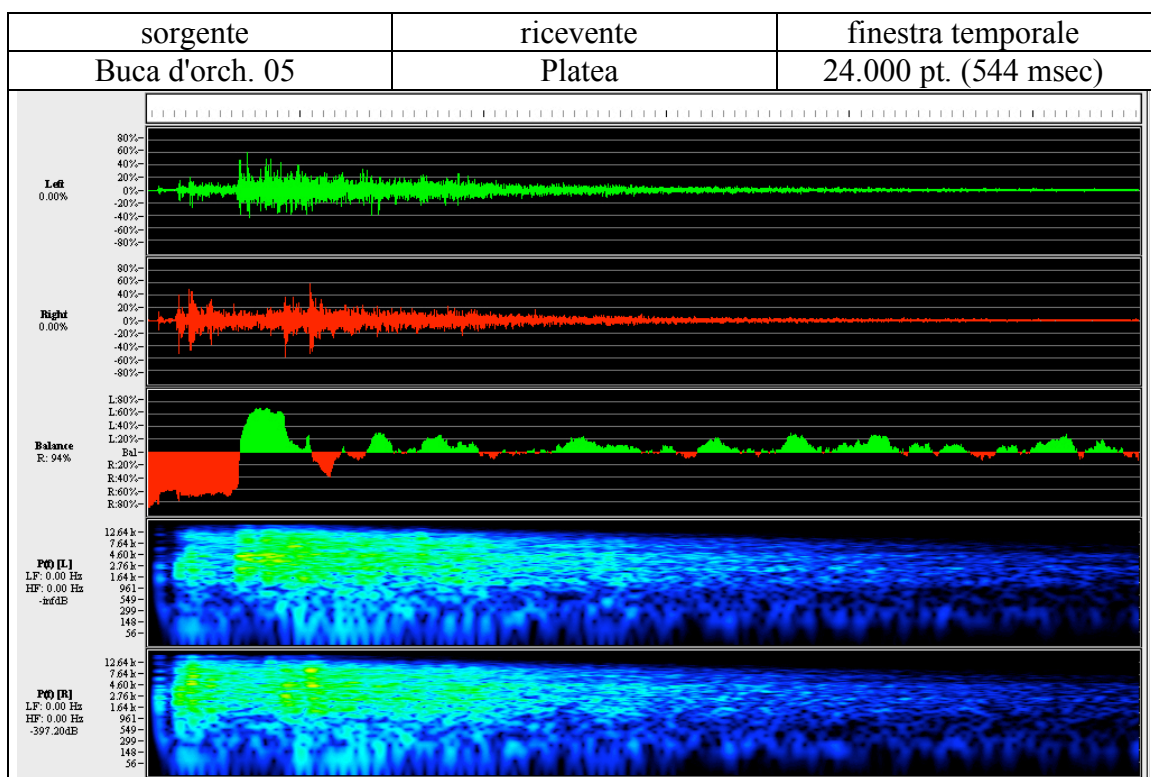


Fig.AIII.6. Immagine della R.I. con il relativo spettrogramma energetico; da notare la riga di centro dove viene rappresentato il bilanciamento dell'intensita' ricevuta dai due canali (verde = sinistro; rosso = destro).

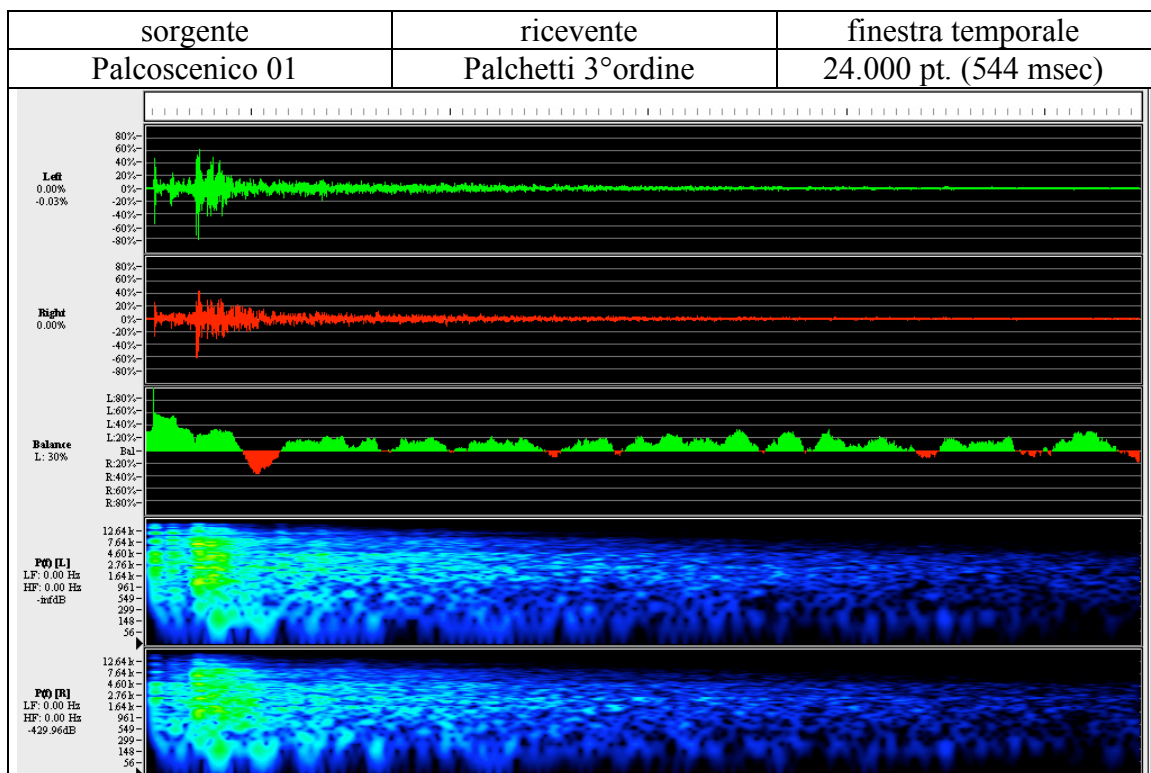


Fig.AIII.7. Immagine della R.I. con il relativo spettrogramma energetico; da notare la riga di centro dove viene rappresentato il bilanciamento dell'intensita' ricevuta dai due canali (verde = sinistro; rosso = destro).

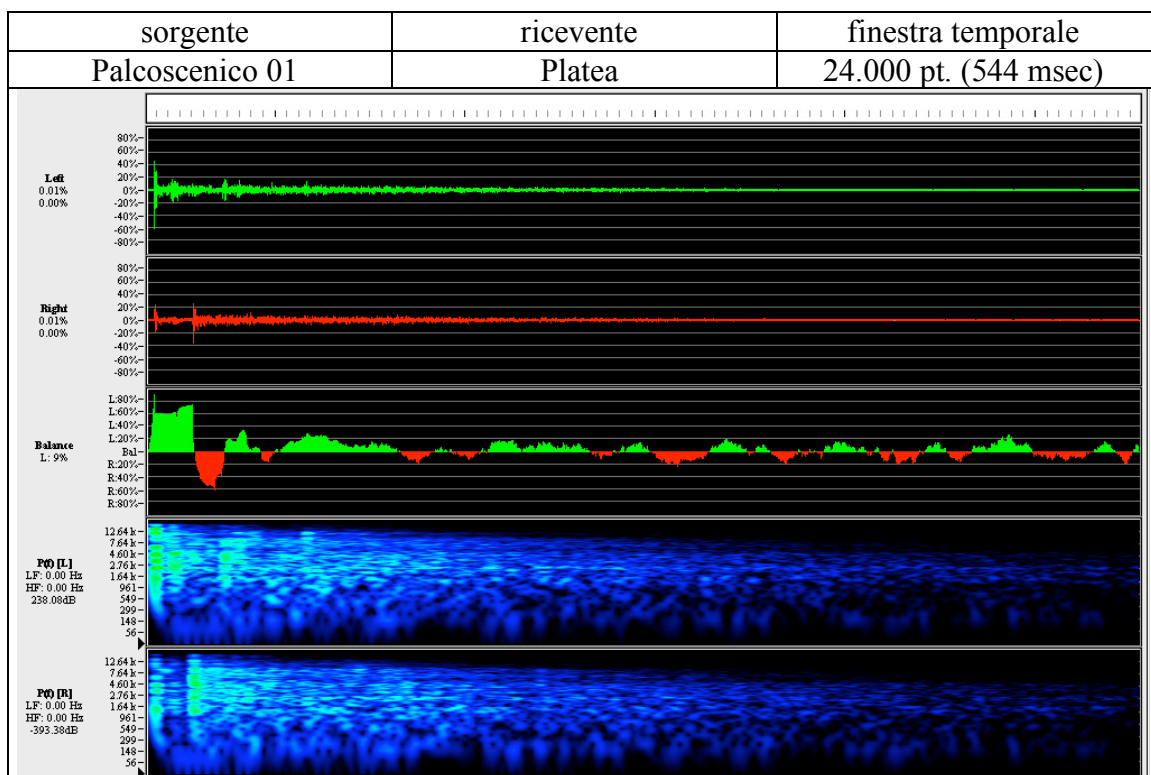


Fig.AIII.8. Immagine della R.I. con il relativo spettrogramma energetico; da notare la riga di centro dove viene rappresentato il bilanciamento dell'intensita' ricevuta dai due canali (verde = sinistro; rosso = destro).

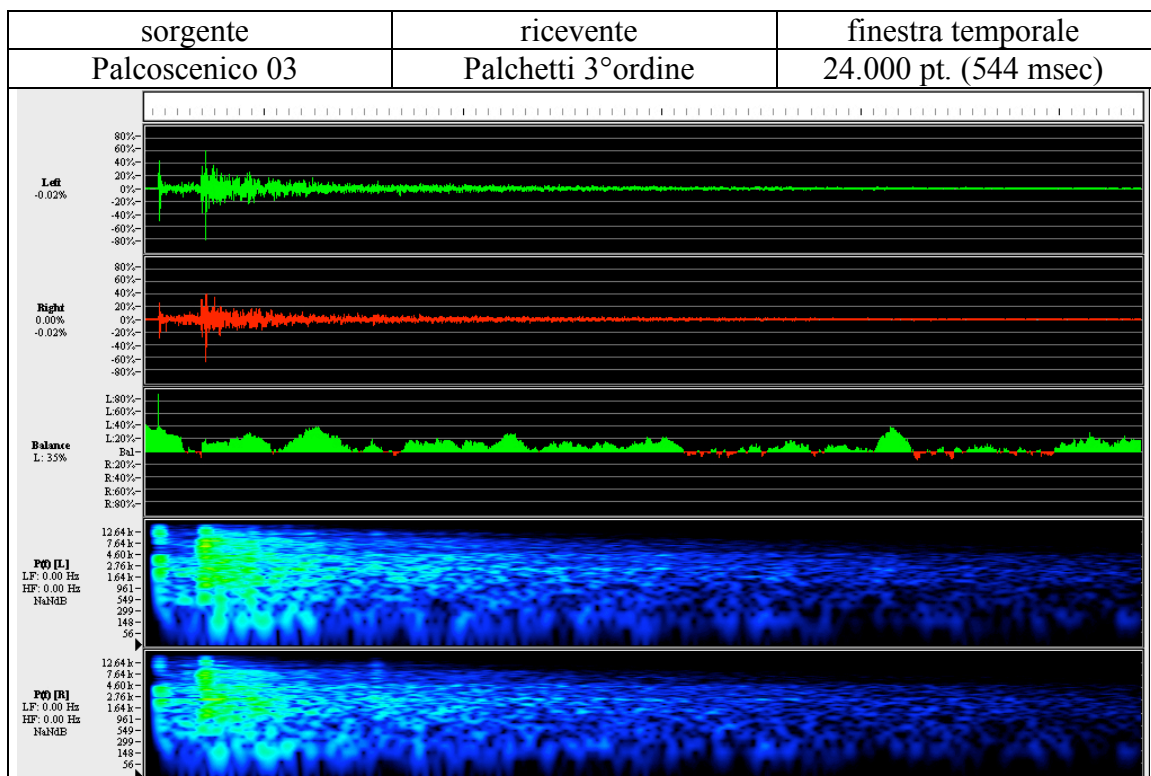


Fig.AIII.9. Immagine della R.I. con il relativo spettrogramma energetico; da notare la riga di centro dove viene rappresentato il bilanciamento dell'intensità ricevuta dai due canali (verde = sinistro; rosso = destro).

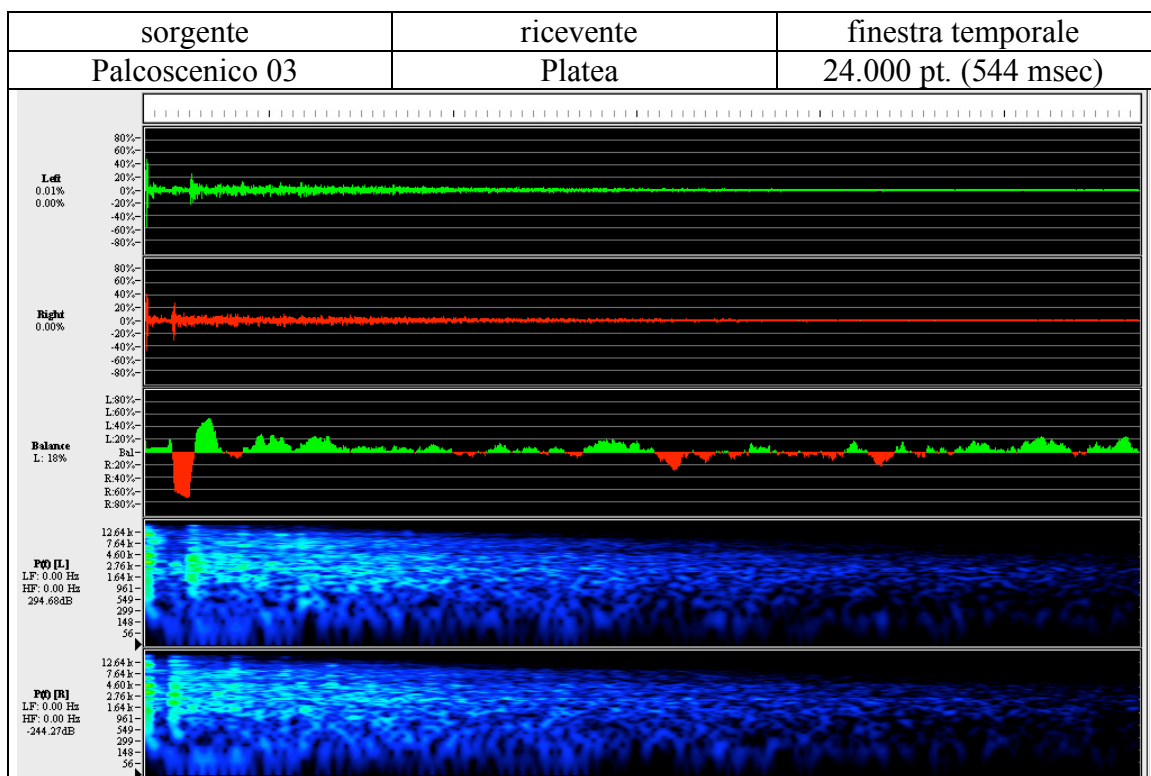


Fig.AIII.10. Immagine della R.I. con il relativo spettrogramma energetico; da notare la riga di centro dove viene rappresentato il bilanciamento dell'intensità ricevuta dai due canali (verde = sinistro; rosso = destro).

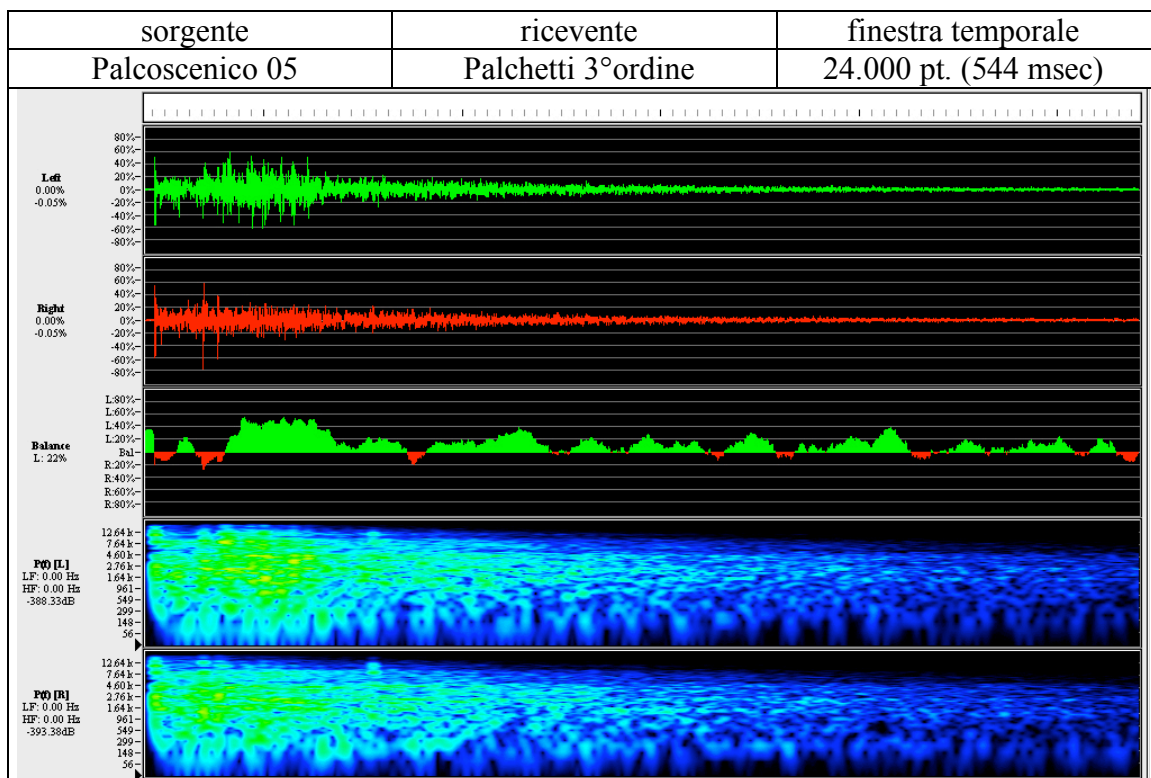


Fig.AIII.11. Immagine della R.I. con il relativo spettrogramma energetico; da notare la riga di centro dove viene rappresentato il bilanciamento dell'intensita' ricevuta dai due canali (verde = sinistro; rosso = destro).

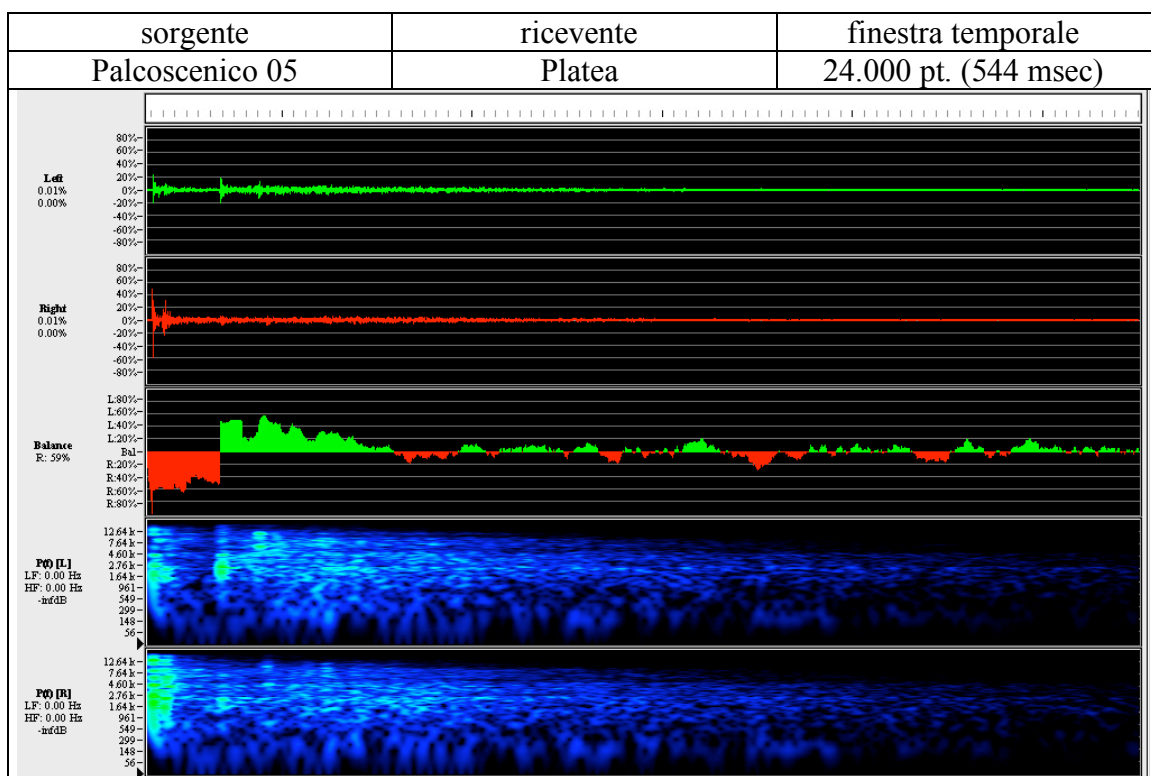


Fig.AIII.12. Immagine della R.I. con il relativo spettrogramma energetico; da notare la riga di centro dove viene rappresentato il bilanciamento dell'intensita' ricevuta dai due canali (verde = sinistro; rosso = destro).

- [1] Alberti, L.B.; *De re aedificatoria*; libro VIII°; tradotto da Bartoli, C.; Venezia; 1565.
- [2] Aristotele; *Problemi di fonazione e di acustica*; da *Problemata*; a cura di Marengi, G.; Napoli; 1962.
- [3] Barbieri, P.; *The acoustics of italian opera houses and auditoriums*; in "Recercare" X, Roma; 1998.
- [4] Ferrario, G., *Saggio sull'architettura teatrale*; in "Storia e descrizione de' principali teatri antichi e moderni", Milano; 1830.
- [5] Carini Motta, F.; *Trattato sopra la struttura de' teatri e scene*; 1676 - Guastalla; riedizione del Polifilo, 1970.
- [6] Bondoni, S.M.; *Teatri storici in Emilia-Romagna*; Catalogo; Bologna; 1982.
- [7] Tamburini E.; *Il luogo teatrale nella trattatistica italiana dell'800: dall'utopia giacobina alla prassi borghese*; Bulzoni Ed. ; Roma; 1984.
- [8] Vitruvio, P.; *I dieci libri dell'architettura* - Libro V°, capitolo 3°; tradotti e commentati da Daniele Barbaro (1567), Ed. Il Polifilo; Milano.
- [9] Zapparoli, A.; *Symmetrie e Architetture*; Bologna; 1997.
- [10] Marchegiani, C.; *La lezione di Raffaele Stern sul Teatro*; in "Opus. Quaderno di storia, architettura, restauro" Vol. VI°; Dip. di Scienze, Storia dell'Architettura e Restauro; Chieti; 1999.
- [11] Bartoli, D.; *Del suono, de' tremori armonici e dell'vdito*; Roma; 1679.
- [12] Kircher, A.; *Musurgia Universalis*; Roma; 1650.
- [13] Degl'Innocenti, P.; *Sviluppo storico-tipologico delle architetture per lo spettacolo*; Dipartimento di Progettazione; Firenze 1995.
- [14] Mezzanotte, G.; *L'architettura della Scala nell'eta' neoclassica*; Il Polifilo; Milano; 1982.
- [15] Barron, M.; *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. E&FN Spon, New York; 1993.
- [16] Beranek, L. L.; *Concert and Opera Halls: How They Sound*. Woodbury: Acoustical Society of America, New York; 1996.
- [17] Beranek, L.L.; *Concert halls and opera houses: Music, Acoustics, and Architecture*; 2nd Edition. Springer-Verlag, New York; 2004.
- [18] ISO/DIS 3382; *Acoustics: Measurement of the Reverberation Time with Reference to Other Acoustical Parameters. International Organization for Standardization*; 1997.
- [19] Pompoli, P., and Prodi, N.; *Guidelines for acoustical measurements inside historical opera house: proceedings and validation*; J. Sound and Vib. 232, 281-301; 2000.
- [20] Farina, A.; *Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique*. Proc. 108th AES Convention, pp 18-22, Paris; 2000.

- [21] Beranek, L. L.; *Subjective rank-orderings and acoustical measurements for fifty-eight concert halls*. *Acustica-Acta Acustica*, 89, 494-508; 2003.
- [22] Gade, A.C.; *Proceedings of the Sabine Centennial Symposium*, Cambridge, Mass., Acoustical Society of America, Woodbury, New York; p. 191; 1994.
- [23] Kuttruff, H.; *Room Acoustics*, 4th Edition – Spon Press, London 2000.
- [24] Barron, M.; *Acoustics of opera house*. Proc. 2nd International Conference on Acoustics and Musical Research, pp 19-21, Ferrara; 1995.
- [25] Cirillo, E.; *Acustica applicata*; McGraw-Hill; Milano; 1997.
- [26] Sepmeyer, L.W.; *Computed frequency and angular distribution of normal modes of vibration in rectangular rooms*; J. Acoust. Soc. Am.; 37; pp. 413-423; 1965.
- [27] Everest, A.; *Manuale di Acustica*; Hoepli; Milano; 2000.
- [28] Beranek & Bolt, Website.
- [29] Bonello, O.J.; *A new criterion for the distribution of normal room modes*; J. Audio Eng. Soc.; pp. 597-606; 1981.
- [30] Righini P. *Il Suono e la teoria delle proporzioni; fondamenti fisico-musicali della consonanza*; Bocca Editori-Milano, 1952.
- [31] Spagnolo, R.; *Manuale di Acustica*; UTET; Torino; 2001.
- [32] Frova, A.; *Fisica nella musica*; Zanichelli; Bologna; 1996.
- [33] Schroeder, M.R.; *The Schroeder frequency revisited*; J. Audio Eng. Soc.; 99; pp. 3240-3241; 1996.
- [34] Cremer L., Muller H.A.; *Principles and Applications of Room Acoustics*, Applied Science, London; 1982.
- [35] Arau-Puchades, H.; *An improved reverberation formula*; *Acustica*; Vol.65, n°4; pp.163-180; 1988.
- [36] Schroeder, M.R.; *Die statistischen parameter der frequenzkurve von großen Räumen*; *Acustica* 4; pp. 594-600; 1954.
- [37] Benedetto, G., Spagnolo, R.; *Statistical distribution of free pathlengths in the acoustics of enclosures*; J. Acoust. Soc. Am.; Vol. 75, n°5; 1984.
- [38] Tafuri, M.; *Teatri e scenografie*; T.C.I.; Milano; 1976.
- [39] Butera, L.; *Architettura Acustica, Teoria e tecnica del controllo del suono nelle costruzioni*; Goerlich; Venezia; 1979.
- [40] Arau, H.; *Abc de la Acustica Arquitectonica*; Ceac; Barcellona; 1999.
- [41] Ando, Y.; *Architectural Acoustics*; Springer; N.Y.; 1998.
- [42] Farina, A.; *Acoustic quality of Theatres*; *Applied Acoustics* 62; 889-916; 2001.
- [43] Barron, M.; *The current status of spatial impression in Concert Halls*; ICA 2004.

- [44] Cesare, M. et altri; *L'acustica variabile vs principi oggettivi dell'acustica degli auditorium*; A.I.A., Ferrara; 2002.
- [45] Cocchi, A.; Farina, A.; Cesare, M.; Tronchin, L.; *A comparison between sound measurement techniques in the Foligno auditorium*; IOA, London, 2002.
- [46] Cesare, M. et altri; *Variable acoustics in a reverberant room: comparison between physical and numerical approaches*; Forum Acusticum; Siviglia; 2002.
- [47] Cocchi, A.; Cesare, M.; Shimokura, R.; *Acoustical qualification of Teatro Nuovo in Spoleto before restoring works*; Acoustical Society of America; N.Y.; 2004.
- [48] Cocchi, A.; Shimokura, R.; Cesare, M.; *Acoustical measurement in Teatro Nuovo (Spoleto), changing sound source position in performance area*; JTD review; Japan; 2005.
- [49] Cocchi, A.; Garai, M.; Tavernelli, C.; *Boxes and sound quality in an italian opera house*; JSV; 232; 2000.
- [50] Semidor, C.; Barlet, A.; *Objective and subjective surveys of opera house*; JSV; 232; 2000.
- [51] Ariba, T.; *Concert Hall design*; IOA; London; 1992

Ringraziamenti:

Innanzitutto, desidero ringraziare il Prof. Alessandro Cocchi per l'incoraggiamento datomi durante lo studio di questa tesi, nonché per le misurazioni nel Teatro di Spoleto; il Prof. Higin Arau dell'Istituto di Acustica di Barcellona e il Prof. Angelo Farina dell'Università di Parma per le cordiali risposte alle mie e-mail; il DIENCA e il Dipartimento di Acustica di Ferrara per le attrezzature messe a disposizione; la Metric Halo di New York per il software fornitomi; la Knowles Electronics di Londra per i microfoni durante la fase iniziale di questo studio; Massimiliano Tonelli dell'Università di Ancona, Ryota Shimokura dell'Università di Kobe; il Dipartimento di Tecnologia Industriale dell'Università di Firenze. Infine, desidero ringraziare tutti coloro che ho dimenticato, ma che in un modo o in un altro mi hanno sostenuto durante le difficili fasi di questo lavoro.