

# Indice

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>I GRANDI AMBIENTI PER LA RAPPRESENTAZIONE MUSICALE</b> | <b>1</b>  |
| 1.1      | Sale per la musica . . . . .                              | 1         |
| 1.2      | Teatri d'opera . . . . .                                  | 10        |
| 1.3      | Teatri di prosa . . . . .                                 | 11        |
| 1.4      | L'opera e il teatro all'italiana . . . . .                | 12        |
| 1.5      | Il teatro d'opera europeo . . . . .                       | 13        |
| 1.6      | Requisiti acustici per i teatri d'opera . . . . .         | 14        |
| 1.7      | L'auditorium 'Cesare Pollini' . . . . .                   | 17        |
| <b>2</b> | <b>ACUSTICA ARCHITETTONICA E PARAMETRI ENERGETICI</b>     | <b>23</b> |
| 2.1      | Considerazioni preliminari . . . . .                      | 23        |
| 2.2      | La buona ricezione . . . . .                              | 24        |
| 2.3      | Alcuni criteri di progettazione acustica . . . . .        | 26        |
| <b>3</b> | <b>STRUMENTI, TECNICHE DI MISURA E SOFTWARE</b>           | <b>39</b> |
| 3.1      | Tecniche di misura . . . . .                              | 39        |
| 3.1.1    | Metodo della risposta integrata all'impulso . . . . .     | 39        |
| 3.1.2    | Strumentazione di misura . . . . .                        | 40        |
| 3.2      | Software utilizzati: DIRAC . . . . .                      | 41        |
| 3.3      | Posizioni di misura . . . . .                             | 42        |
| 3.3.1    | Prima campagna di misure . . . . .                        | 44        |
| 3.3.2    | Seconda campagna di misure . . . . .                      | 44        |
| <b>4</b> | <b>ELABORAZIONE MISURE ACUSTICHE OGGETTIVE</b>            | <b>47</b> |
| 4.1      | Chiarezza a 80 ms, $C_{80}$ . . . . .                     | 47        |
| 4.1.1    | Sorgente 01 . . . . .                                     | 47        |
| 4.1.2    | Sorgente 02 . . . . .                                     | 53        |
| 4.1.3    | Analisi dei valori . . . . .                              | 54        |
| 4.2      | Definizione, $D_{50}$ . . . . .                           | 58        |
| 4.2.1    | Sorgente 01 . . . . .                                     | 59        |
| 4.2.2    | Sorgente 02 . . . . .                                     | 60        |
| 4.2.3    | Analisi dei valori . . . . .                              | 69        |
| 4.3      | Tempo centrale, $t_s$ . . . . .                           | 70        |
| 4.3.1    | Sorgente 01 . . . . .                                     | 70        |
| 4.3.2    | Sorgente 02 . . . . .                                     | 71        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.3.3    | Analisi dei valori . . . . .   | 80         |
| 4.4      | Early Decay Time, EDT . . . . .  | 81         |
| 4.4.1    | Sorgente 01 . . . . .  | 81         |
| 4.4.2    | Sorgente 02 . . . . .  | 82         |
| 4.4.3    | Analisi dei valori . . . . .   | 87         |
| 4.5      | Tempo di riverberazione, $T_{10}$ . . . . .                                | 91         |
| 4.5.1    | Sorgente 01 . . . . .  | 91         |
| 4.5.2    | Sorgente 02 . . . . .  | 92         |
| 4.5.3    | Analisi dei valori . . . . .   | 97         |
| 4.6      | Tempo di riverberazione, $T_{20}$ . . . . .                                | 97         |
| 4.6.1    | Sorgente 01 . . . . .  | 97         |
| 4.6.2    | Sorgente 02 . . . . .  | 102        |
| 4.6.3    | Analisi dei valori . . . . .   | 107        |
| 4.7      | Tempo di riverberazione, $T_{30}$ . . . . .                                | 107        |
| 4.7.1    | Sorgente 01 . . . . .  | 107        |
| 4.7.2    | Sorgente 02 . . . . .  | 112        |
| 4.7.3    | Analisi dei valori . . . . .   | 117        |
| 4.8      | Analisi del tempo di riverberazione . . . . .                              | 122        |
| 4.8.1    | Confronto fra i metodi di misura . . . . .                                 | 122        |
| 4.8.2    | Confronto con i valori di letteratura . . . . .                            | 122        |
| 4.9      | Rapporto dei bassi, $BR$ . . . . .   | 122        |
| 4.9.1    | Andamento del parametro . . . . .  | 122        |
| 4.9.2    | Confronto con i valori di letteratura . . . . .                            | 127        |
| 4.10     | Vivezza, $T_{med}$ . . . . .   | 127        |
| 4.10.1   | Andamento del parametro . . . . .  | 127        |
| 4.10.2   | Confronto con i valori di letteratura . . . . .                            | 127        |
| 4.11     | Coefficiente di correlazione<br>mutua interaurale, $IACC_{0,80}$ . . . . . | 127        |
| 4.11.1   | Sorgente 01 . . . . .  | 132        |
| 4.11.2   | Sorgente 02 . . . . .  | 133        |
| 4.11.3   | Analisi dei valori . . . . .   | 138        |
| 4.12     | Tabelle riassuntive . . . . .  | 143        |
| 4.12.1   | $T_{30}$ . . . . .   | 146        |
| 4.12.2   | $C_{80}$ . . . . .   | 146        |
| 4.12.3   | $D_{50}$ . . . . .   | 146        |
| 4.12.4   | $IACC_{0,80}$ . . . . .  | 147        |
| <b>5</b> | <b>TEST SOGGETTIVI IN PLATEA</b> . . . . .                                 | <b>149</b> |
| 5.1      | Il test . . . . .  | 149        |
| 5.1.1    | Utilizzo dei test . . . . .  | 149        |
| 5.1.2    | Difficoltà nell'utilizzo dei test . . . . .                                | 151        |
| 5.2      | Analisi dei test . . . . .   | 151        |
| 5.2.1    | Test compilati da non musicisti . . . . .                                  | 152        |
| 5.2.2    | Test compilati da musicisti . . . . .                                      | 154        |
| 5.2.3    | Commenti nei test . . . . .  | 154        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.2.4    | Confronto tra i risultati delle due categorie di pubblico . . . .                         | 155        |
| 5.3      | Relazione fra parametri oggettivi e soggettivi . . . . .                                  | 156        |
| <b>6</b> | <b>ACUSTICA DEL PALCOSCENICO</b>  | <b>159</b> |
| 6.1      | Studi condotti da A.C.Gade . . . . .  | 159        |
| 6.1.1    | Approccio sperimentale: spazio acustico reale e simulazioni .                             | 160        |
| 6.1.2    | Esperimenti di laboratorio con solisti e gruppi di musicisti . .                          | 161        |
| 6.1.3    | Esperimenti sul campo e sintesi dei risultati . . . . .                                   | 163        |
| 6.2      | Studi recenti . . . . .   | 166        |
| <b>7</b> | <b>MISURE ACUSTICHE SUL PALCOSCENICO</b>  | <b>169</b> |
| 7.1      | Support, $ST_{early}$ . . . . .   | 169        |
| 7.1.1    | Andamento del parametro nei punti sorgente . . . . .                                      | 169        |
| 7.1.2    | Andamento delle medie del parametro fra i punti di misura nei<br>punti sorgente . . . . . | 177        |
| 7.1.3    | Confronto con i valori di letteratura . . . . .   | 179        |
| 7.2      | Support, $ST_{late}$ . . . . .  | 179        |
| 7.2.1    | Andamento del parametro nei punti sorgente . . . . .                                      | 179        |
| 7.2.2    | Andamento delle medie del parametro fra i punti di misura nei<br>punti sorgente . . . . . | 187        |
| 7.2.3    | Confronto con i valori di letteratura . . . . .   | 189        |
| 7.3      | Tempo di riverberazione, $T_{30}$ . . . . .   | 189        |
| 7.3.1    | Andamento in frequenza . . . . .  | 189        |
| 7.3.2    | Confronto con i valori di letteratura . . . . .   | 190        |
| 7.4      | Early Decay Time, EDT . . . . .   | 190        |
| 7.4.1    | Andamento in frequenza . . . . .  | 193        |
| 7.4.2    | Confronto con i valori di letteratura . . . . .   | 193        |
| 7.5      | EDTF . . . . .  | 197        |
| 7.5.1    | Confronto con i valori di letteratura . . . . .   | 197        |
| 7.6      | Considerazioni sui risultati . . . . .  | 198        |
| <b>8</b> | <b>ANALISI DATI ACUSTICI SOGGETTIVI SUL PALCOSCENICO</b>                                  | <b>199</b> |
| 8.1      | Il test . . . . .   | 199        |
| 8.2      | Analisi dei test . . . . .  | 200        |
| 8.2.1    | Test compilati dai componenti dell'orchestra . . . . .                                    | 200        |
| 8.2.2    | Test compilati dai cameristi . . . . .  | 201        |
| 8.2.3    | Commenti nei test . . . . .   | 203        |
| 8.3      | Considerazioni . . . . .  | 203        |
|          | <b>Conclusioni</b>  | <b>205</b> |
|          | <b>Bibliografia</b>   | <b>209</b> |

# Capitolo 1

## I GRANDI AMBIENTI PER LA RAPPRESENTAZIONE MUSICALE

### 1.1 Sale per la musica

Appartengono a questa categoria di sale gli auditori ove il pubblico beneficia del concerto fornito da un'orchestra in una determinata area. I requisiti acustici della sala sono strettamente legati alle esigenze degli utilizzatori che si distinguono in esecutori e ascoltatori della musica. La più completa ed approfondita descrizione delle caratteristiche acustiche di una sala è, ancora oggi, quella riportata da Beranek nell'ormai classico testo *Music, Acoustic and Architecture* (1962) [1], in larga parte ripresa nel più recente *Concert and Opera Halls* (1996) [2]. L'originalità del lavoro risiede nel fatto di aver per primo individuato, definito e quantificato una serie di attributi qualitativi dell'acustica di una buona sala da concerto partendo da minuziose inchieste presso i più qualificati direttori d'orchestra e i critici musicali dell'immediato dopoguerra. L'opera di sintesi effettuata dall'autore ha consentito di definire i requisiti essenziali che deve possedere una sala per concerti partendo dalla convinzione che il locale partecipa in modo importante alla intensificazione, diffusione, strutturazione del messaggio musicale, così come la stessa cassa armonica degli strumenti di una orchestra è responsabile della qualità del suono da essi prodotto. Ne scaturisce una serie di attributi qualitativi che una sala deve possedere per soddisfare sia le esigenze di colui che produce la musica sia di colui che l'ascolta. Per il pubblico, ovviamente, la buona acustica di una sala si traduce in termini di un buon ascolto della musica prodotta. Questo lega le qualità di carattere soggettivo di natura psico-acustica a fenomeni fisici di acustica legati alle proprietà del campo sonoro nel punto di ascolto. La trasmissione di energia sonora da un punto sorgente (orchestra) ad un punto ricevente della sala (spettatore) avviene per onde acustiche che pervengono all'ascoltatore sia direttamente dalla sorgente sia per riflessione dalle superfici della sala. Il segnale musicale prodotto dall'orchestra consiste in una combinazione di suoni che variano con continuità o con discontinuità nel tempo, con cadenze ritmiche e non, con variazioni continue di altezza, di timbro, d'intensità tutte organizzate per comunicare un messaggio. Risulta quindi, nel punto di ascolto, un mescolarsi di onde dirette e riflesse che determina la qualità della musi-

ca. Esteticamente più qualificato, il segnale musicale è espressione di un sentimento e di un'idea legata al compositore che ha operato nell'ambito di uno stile musicale. Si pensi alle differenze che caratterizzano ad esempio il Canto Gregoriano da una composizione organistica di Bach, da un concerto per piano di Mozart da una sinfonia di Beethoven. I diversi autori hanno composto le loro opere ricercando, nelle qualità acustiche dell'ambiente, gli effetti espressivi più consoni alla loro sensibilità ed idea compositiva. La sala interviene sul suono musicale prodotto dall'orchestra in diversi modi:

- attenuando l'energia stessa durante la propagazione nell'aria
- alterando lo spettro di emissione dell'onda sonora dopo la riflessione su pareti e soffitto
- aggiungendo al suono l'effetto della riverberazione
- alterando le relazioni temporali e di ampiezza di aliquote di energia sonora che globalmente determinano il suono ricevuto in un determinato posto

Il suono che giunge all' ascoltatore è determinato dall'onda sonora diretta alla quale si sovrappongono le molteplici riflessioni delle pareti laterali e di tutti gli elementi architettonici riflettenti e diffondenti che modificano queste per effetto della particolare forma e costituzione dell'ambiente. Nell'area destinata al pubblico l'ascoltatore lo percepisce soggettivamente mediante il meccanismo di ricezione binaurale ed elaborazione del segnale a livello cerebrale.

Questi processi percettivi sono alla base della vasta gamma di impressioni soggettive che contribuiscono tutte a creare un'immagine sonora di qualità per l'ascoltatore. Appare evidente, quindi, che le qualità acustiche di una sala vista dal pubblico, e quindi i requisiti ai quali la stessa deve rispondere, possono essere espressi solo con termini di tipo qualitativo che descrivono particolari esigenze di tipo percettivo.

Beranek, nell'opera citata, consapevole di questa necessità progettuale, ha definito le qualità in assoluto del suono di natura musicale correlandole con le qualità del suono percepito dall'ascoltatore in sala ed alterato dall'acustica della sala stessa. Le qualità del segnale musicale influenzate dal processo di acustica introdotto dalla sala sono state così individuate:

- *pienezza del tono*: corrisponde ad una maggiore intensità soggettiva (loudness) nell'ambiente raggiungibile con una minore potenza sonora emessa, una maggiore permanenza del suono dopo che è cessata l'emissione, un maggiore livello di suono sul rumore di fondo ed una maggiore aliquota di energia riverberata rispetto a quella diretta. Questa qualità musicale è quindi legata all'entità del tempo di riverberazione ed alla intensità del suono diretto. La riverberazione dipende dal volume e dalle caratteristiche di assorbimento dell'ambiente, l'intensità del suono diretto dipende dalla distanza dell'ascoltatore. La forma della

sala ed i materiali impiegati influiscono enormemente sulla pienezza del suono, nel senso che più grande è il rapporto tra intensità soggettiva del suono riverberato e quella del suono diretto, più elevata è la sensazione di pienezza del tono musicale

- *definizione o chiarezza*: rappresenta la capacità di distinguere suoni molto ravvicinati nel tempo (chiarezza orizzontale) o che giungono simultaneamente da diversi strumenti (chiarezza verticale). La chiarezza orizzontale influenzata dalla durata della riverberazione e dal rapporto tra suono diretto e suono riverberato, cioè dagli stessi due fattori che determinano la pienezza del tono, ma in senso inverso: essa risulta tanto maggiore quanto minore è il tempo di riverberazione. È comunque influenzata negativamente dalla distanza dell'ascoltatore dalla sorgente e dall'entità del suono riverberato rispetto a quello diretto. La sensazione di chiarezza di un tono musicale intesa come percezione del segnale tenendo conto che l'orecchio stabilisce una relazione tra la prima parte del segnale e la successiva: vi è chiarezza orizzontale quando la seconda non è così forte da coprire la prima. La chiarezza verticale, invece, è influenzata dal bilanciamento e fusione del suono di due o più strumenti che emettono contemporaneamente, dal grado di armonizzazione dei suoni dei diversi strumenti, dalla risposta della sala alle basse, medie ed alte frequenze e dal rapporto tra suono diretto e suono riverberato. La definizione dei toni musicali sia nel senso orizzontale che in quello verticale è determinata da un insieme di fattori acustici e musicali. Il canto gregoriano, ad esempio, con le sue lente variazioni melodiche ed intensive (arsi e tesi) è eseguito necessariamente con povera definizione orizzontale: esso richiede una sala con un tempo di riverberazione molto elevato e con un basso rapporto tra suono diretto e suono riverberato. Un concerto per pianoforte di Mozart, con i suoi rapidi fraseggi, i delicati equilibri, richiede una elevata chiarezza orizzontale e verticale tra il piano e le differenti voci orchestrali e quindi richiede un tempo di riverberazione relativamente breve ed un elevato rapporto tra energia diretta ed energia riverberata

Le due qualità musicali sopra descritte (pienezza del tono e chiarezza) influenzano enormemente la risposta di un brano musicale suonato rapidamente o lentamente. La percezione delle note può essere compromessa se la rapidità temporale di esecuzione è molto breve rispetto al tempo di riverberazione. Se poi lo strumento stesso produce suoni affetti anch'essi da risonanza, la chiarezza del brano può essere compromessa ancora maggiormente. È facile intuire come note successive emesse rapidamente possano risultare ancora distinguibili nel senso della chiarezza orizzontale se il tempo di riverberazione dell'ambiente è basso, mentre le stesse note risulterebbero sepolte dalla riverberazione e quindi confuse se il tempo di riverberazione risultasse eccessivamente elevato. Il pianoforte, per essere ben ascoltato, richiede all'ambiente un tempo di riverberazione relativamente breve in quanto il pianista stesso può prolungare l'emissione sonora con i pedali.

I requisiti delle sale per musica sono tutti esprimibili in termini qualitativi di impressioni soggettive che però raccolgono un ampio consenso di opinioni tra i musicisti e

gli ascoltatori più raffinati; essi sono stati elencati da Beranek che li ha studiati anche al fine di procedere, mediante parametrizzazione, alla suddivisione in classi di qualità dei diversi teatri ed auditorium da lui indagati.

Gli attributi soggettivi sono:

- *intimità o presenza*: è legata all'impressione soggettiva che un ascoltatore prova in relazione alle dimensioni fisiche della sala di ascolto. Quantitativamente è legata al tempo iniziale di ritardo, cioè al ritardo tra suono diretto e prima riflessione. Le sale definite intime e con buona sensazione della presenza dello strumento musicale sono quelle che hanno ispirato la definizione di musica da camera. I quartetti di archi in auge nell'arte musicale del settecento e dell'ottocento, ad esempio, hanno ispirato i compositori, i quali erano ben consapevoli dell'acustica e dell'ambiente intimo di corte ove i loro brani venivano eseguiti, anche perché commissionati dagli stessi signori. Camere di questo tipo sono caratterizzate da un breve tempo iniziale di ritardo (inferiore a 20 ms) e l'intensità soggettiva del suono diretto risulta molto più elevata di quella del suono riverberato
- *vivezza*: una sala viva è caratterizzata da un tempo di riverberazione alto alle medie ed alte frequenze; una sala asciutta o morta è caratterizzata da un breve tempo di riverberazione. La vivezza di una sala rivela la presenza di pienezza dei toni. Una sala viva, al contrario, rivela una carenza di bassi
- *calore*: rappresenta la pienezza dei toni a bassa frequenza (inferiori a 250 Hz). È quindi caratterizzata da un lungo tempo di riverberazione alle basse frequenze. L'eccessiva riverberazione, però, rende la sala rimbombante specialmente se di piccole dimensioni. Molte sale vengono definite calde con ricchezza dei bassi
- *intensità soggettiva (loudness) del suono diretto*: il suono percepito da un ascoltatore è la somma del suono diretto e di quello riverberato. Nelle piccole sale il suono diretto raggiunge anche le ultime file del pubblico, mentre in quelle grandi le ultime file sono investite prevalentemente da suono riverberato. Il giusto equilibrio si ottiene usualmente a 20 m dall'orchestra
- *intensità soggettiva (loudness) del suono riverberato*: rappresenta il suono che giunge all'ascoltatore dopo una o più riflessioni. Essa è necessaria per contribuire a rendere efficaci i passaggi *fortissimo* che sarebbero poco rappresentativi se si facesse affidamento al solo suono diretto. Un'elevata riverberazione intensifica questa parte di suono ricevuto. Per contro, una sala con elevato volume ed elevato assorbimento acustico (breve tempo di riverberazione) rende poco nei passaggi *fortissimo*. Si rileva che, se la sala è piccola ed molto riverberante, i livelli dei *fortissimo* possono essere tali da offendere l'udito dei musicisti e degli ascoltatori
- *chiarezza*: una sala priva di definizione o chiarezza, come definita in precedenza, rende la musica confusa ed opaca. La chiarezza è legata alla struttura delle

riflessioni ed è quindi legata all'intimità. È anche funzione del tempo di riverberazione e quindi legata alla vivezza; è funzione della distanza dell'ascoltatore dall'orchestra e quindi è legata all'intensità soggettiva del suono diretto; è funzione del volume della sala e quindi è legata all'intensità soggettiva del suono riverberato

- *intensità di tono musicale o brillantezza*: indica la vivacità di un suono argentino, con grande ricchezza di armoniche. Essa si percepisce in un ambiente vivace alle alte frequenze con elevata chiarezza ed intimità. Dipende, quindi, dal tempo iniziale di ritardo, dal rapporto tra il tempo di riverberazione alle alte frequenze e quello alle medie frequenze, dalla distanza dell'ascoltatore, e dalla presenza in sala di ampie superfici riflettenti
- *diffusione*: indica la direzione di arrivo del suono riverberato, nel senso che ad una buona diffusione corrisponde l'assenza di direzioni privilegiate di provenienza del campo riverberato. Essa si manifesta quando sulle pareti e sul soffitto sono presenti numerosi elementi aggettanti (colonne, statue, cassettoni ecc.), mentre è carente se le superfici sono dolci, ampiamente curvate, ma prive di spigoli che invece produrrebbero effetti di diffrazione del suono. Una povera diffusione del suono si manifesta anche quando l'area d'orchestra è riverberante mentre il resto della sala è sorda
- *bilanciamento*: corrisponde al giusto peso delle varie sezioni dell'orchestra, ovvero di orchestra, cantanti o solisti. Il bilanciamento delle sezioni orchestrali dipende dalla forma e dimensione dell'area d'orchestra, dalla presenza di elementi diffondenti sia lateralmente che superiormente all'area d'orchestra, dalle possibilità che il direttore d'orchestra ha di ascoltare con intensità soggettiva non alterata i suoni provenienti dai diversi strumenti musicali
- *fusione*: indica la mescolanza dei suoni dei diversi strumenti dell'orchestra in modo che sembrino armoniosi all'ascoltatore. Bilanciamento e fusione dipendono dalla forma dell'area destinata all'orchestra e dalla disposizione degli strumentisti
- *assieme (ensemble)*: corrisponde alla capacità dei musicisti di suonare all'unisono, cioè di iniziare e terminare simultaneamente; questo risultato dipende dalla possibilità dei musicisti di sentirsi l'un l'altro e quindi è funzione dell'intimità, della vivezza, del calore e dell'intensità del suono diretto e di quello riverberato mentre meno importanti risultano la diffusione, il bilanciamento e la fusione
- *immediatezza di risposta (attacco)*: corrisponde alla sensazione che ha il musicista, il solista o il cantante che la sala risponda immediatamente al suono emesso. La risposta della sala vista dal musicista è legata alla struttura delle prime riflessioni che tornano indietro dalla sala stessa. Se il ritardo rispetto all'istante di emissione risulta eccessivo il musicista avverte l'eco provenire dalla sala e quindi ha una risposta anomala che condiziona l'attacco delle note successive. Si

riduce la carenza di attacco dimensionando ed orientando le superfici riflettenti più vicine all'esecutore

- *tessitura*: è l'impressione soggettiva dell'ascoltatore creata dalla conformazione in intensità e tempi di arrivo delle riflessioni successive alla prima. Il succedersi ordinato delle riflessioni con ampiezza degradante produce un effetto sonoro diverso da quello prodotto da una struttura di riflessioni successive con intervalli di durata molto diverse ed ampiezze delle riflessioni temporalmente più lontane dalla prima con ampiezze maggiori
- *assenza di eco*: l'eco costituisce una riflessione del suono che si manifesta con un certo ritardo rispetto al suono diretto. Se si supera un determinato valore la riflessione con ampiezza rilevante produce una sensazione sgradevole per chi ascolta la musica. L'eco è accentuata da pareti riflettenti molto distanti (soffitti molto alti ecc.) e da curvature inadatte che focalizzano il suono in determinati punti della sala
- *assenza di rumore di fondo*: principalmente immesso in sala dagli impianti di condizionamento, dagli impianti di amplificazione del suono, dal traffico esterno, dal vociare nei locali attigui, dal brusio del pubblico
- *dinamica*: è la possibilità offerta in sala di udire sia suoni intensi (fortissimo) sia deboli (pianissimo). Si esprime come differenza dei livelli del fortissimo prodotto dall'orchestra e del rumore di fondo
- *qualità tonale*: rappresenta la bellezza di un suono musicale. È legata alla possibilità di poter distinguere il timbro dei diversi strumenti musicali, di poter distinguere la voce umana nella massa sonora dell'orchestra, il suono dello strumento solista nel concerto ecc. Le qualità timbriche di una sala sono spesso associate alle sensazioni cromatiche e possono essere alterate dall'acustica se gli assorbimenti non risultano bilanciati in frequenza. La qualità tonale è anche condizionata dalla direttività di alcuni strumenti musicali
- *uniformità*: è un concetto legato all'uniforme distribuzione del suono in sala. Ovviamente una buona acustica di una sala è anche sinonimo di buon ascolto in tutti i punti occupati dal pubblico e dall'orchestra. In molte sale si rilevano zone d'ombra o zone morte dove il suono è carente sia di intensità che di chiarezza, pienezza del tono, intimità ecc.

I diciotto attributi qualitativi sopra definiti possono essere separati in tre categorie definite dal grado di importanza per il dimensionamento della sala sotto il profilo acustico. Gli attributi tra loro indipendenti, e che giocano un ruolo positivo sono: intimità, vivezza, calore, intensità soggettiva del suono diretto, intensità soggettiva del suono riverberato, diffusione, bilanciamento e fusione, assieme. Gli attributi tra loro indipendenti, ma che giocano un ruolo negativo sono: eco, rumore di fondo, distorsione, distribuzione non uniforme del suono. Gli attributi qualitativi che dipendono dagli altri sono: chiarezza, intensità di tono musicale, attacco, tessitura, gamma dinamica. Lo studio

approfondito del correlato psicofisico della percezione della musica in una sala da concerto ha permesso di individuare alcune condizioni necessarie, ma non sufficienti, per un buon ascolto in auditorium:

- è necessario che all'ascoltatore giunga il suono diretto accompagnato da energia sonora di prima riflessione
- la distribuzione temporale dell'energia sonora di prima riflessione deve essere relativamente equilibrata in tutto l'uditorio
- il suono di prima riflessione deve essere diretto in grande quantità lungo direzioni laterali per l'ascoltatore, privilegiando la scarsa somiglianza delle pressioni sonore ai due orecchi
- il suono diretto e l'energia di prima riflessione devono essere a banda larga
- è necessaria una riverberazione adeguata alle frequenze medie e la caratteristica in frequenza della riverberazione deve essere costante o a pendenza lievemente negativa

È possibile, con il corretto dosaggio degli elementi sopra definiti, realizzare sale che rispondano in maniera ottimale ai diversi stili musicali:

- *la musica barocca* (Corelli, Vivaldi, Hendel, Bach ecc.) fu composta ed eseguita in ambienti relativamente piccoli ad elevato livello di intimità e presenza, e con tempo di riverberazione a sala occupata inferiore a 1,5 s. Risulta quindi un'alta definizione ed una bassa pienezza dei toni. Per la musica sacra del periodo barocco, invece, è richiesta una sala ad elevato tempo di riverberazione come è lo spazio sonoro delle cattedrali
- con *la musica del periodo classico* (Mozart, Haydn, Beethoven ecc.) con idee estetiche nettamente diverse dal periodo precedente, prendono corpo la sinfonia e i concerti per orchestra e solisti. La musica viene eseguita in vere sale da concerto che possono ospitare anche mille persone. Il tempo di riverberazione di queste grandi sale si avvicina a 1,8 s con buona pienezza dei toni, mentre la chiarezza risulta preservata dalla limitata forma rettangolare della sala
- per *la musica romantica* (Mendelssohn Bartholdy, Brahms, Wagner ecc.), si assiste ad un aumento dell'organico d'orchestra con presenza di numerose sezioni musicali (archi, legni, trombe, percussioni ecc.) con una ricchezza timbrica rilevante. Le sale da concerto sempre più capienti si caratterizzano con una maggiore pienezza di tono, tempi di riverberazione più elevati (1,9 - 2,2 s) e piccolo rapporto tra suono diretto e suono riverberato; questo porta ad una riduzione della chiarezza

- *nel XX secolo*, si assiste ad un proliferare di sale da concerto e auditori costruiti anche per esigenze della radio prima e della televisione poi. Le caratteristiche acustiche di queste sale rivoluzionano in parte i concetti descritti proprio per la particolare destinazione d'uso che deve adeguarsi a tutti gli stili. La musica prodotta dall'orchestra non è solo diretta a pochi spettatori (da 800 a 2000), ma a milioni di persone che ascoltano dalla radio i concerti dal vivo. Le esigenze acustiche si rivelano molteplici: da un lato occorre realizzare sale adatte a tutti gli stili musicali seguiti dai diversi autori dal settecento in poi, dall'altro emergono sempre più esigenti e diversi i requisiti per una buona ripresa sonora. L'ascoltatore ora è il microfono che, posizionato nello spazio della sala, riprende il suono che deve essere radiofonicamente diffuso in tutto il mondo. Inizialmente le esigenze della radio erano limitate ad una trasmissione di tipo monofonico; poi, con il progredire della tecnica e con l'avvento della televisione che sottrae sempre più pubblico alle sale cinematografiche, viene introdotto il sistema di riproduzione stereofonico, subito diventato un cavallo di battaglia del cinema che tenta di resistere agli assalti della televisione. Inoltre, da quando il cinema ha introdotto una nuova dimensione nello spazio sonoro, il Dolby surround, anche la radio e la televisione stanno tentando di introdurre, nelle trasmissioni sperimentali, questo nuovo concetto di campo sonoro. La tecnica di ripresa diventa una nuova branca dell'acustica e trova, come primo ostacolo, il fenomeno della riverberazione dell'ambiente. Emergono numerose contraddizioni per chi si deve occupare del dimensionamento acustico degli auditori destinati alla trasmissione radiofonica o alla registrazione dei dischi. Se una buona ripresa sonora può essere effettuata in ambiente poco riverberante (sale sorde) ove il tecnico del suono aggiunge la riverberazione artificiale mediante tecniche elettroniche, una buona esecuzione dell'orchestra richiede un ambiente vivo, in cui la pienezza dei toni sia giustamente calibrata e le esigenze dei musicisti (assieme, immediatezza della risposta ecc.) pienamente soddisfatte. Si realizzano auditori ad acustica variabile, in cui l'opportuna rotazione di elementi posti sulle pareti e sul soffitto (assorbenti da un lato e riflettenti dall'altro) permettono di conseguire i tempi di riverberazione adatti ai diversi stili musicali. La selva di microfoni e cavi nell'area d'orchestra e l'utilizzo di banchi di registrazione sempre più sofisticati, consentono al tecnico del suono di variare i parametri citati introducendo correzioni elettroniche in tempo reale durante le riprese dal vivo o in fase di post-produzione per la realizzazione dei programmi in differita o dei dischi. Lo spettatore in una sala di concerto resta sempre colui che usufruisce del piacere di sentire dal vivo l'esecuzione dell'opera classica, ma alle sue spalle ha una nutrita schiera di spettatori casalinghi che ascoltano la musica attraverso il loro impianto Hi-Fi in un ambiente poco adatto o in cuffia, usufruendo della magia virtuale sempre più prodotta dal tecnico ,elettronico e meno dal vero musicista
- *un altro spazio acusticamente particolare* è quello riservato ai concerti di gruppi rock, singoli cantanti di grido ecc. Gli strumenti musicali sono tutti elettronici e quei pochi definiti per assurdo acustici sono elettronicamente amplificati e irradiati da intere pareti di diffusori che erogano decine di watt acustici. Si uti-

lizzano numerosi effetti sintetizzati elettronicamente per rendere il suono adatto alla forza espressiva del gruppo; si utilizzano i cosiddetti diffusori-spia rivolti verso il complesso e i cantanti, per sopperire alla mancanza di immediatezza di risposta o attacco che la sala non può più avere, perché la presenza di diverse decine di migliaia di persone impone l'uso di spazi aperti (campi di calcio, arene ecc.)

I requisiti sopra descritti enfatizzano maggiormente le esigenze di chi ascolta la musica; dal punto di vista di chi esegue la musica, i requisiti dello spazio sonoro sono diversi, e si devono affrontare anche altri problemi:

- difficoltà di sentire il proprio strumento
- difficoltà di sentire gli altri gruppi strumentali nel momento di assieme
- mancanza di risposta della sala (come viene definita dai musicisti), non percepita acusticamente come prolungamento ed integrazione del suono

Le cause di tali problemi possono essere:

- fenomeni di mascheramento di strumenti forti su strumenti deboli (per esempio ottoni su legni)
- la collocazione relativa dei vari gruppi strumentali (ad esempio il suono prodotto da un gruppo attraversa una sezione di strumenti e giunge al terzo gruppo strumentale troppo attenuato)
- il campo delle prime riflessioni nell'area del palco, quando esso è tale da rinforzare ulteriormente gli strumenti forti
- la disposizione dei diversi settori strumentali che li allontana invece di avvicinarli

Questi problemi possono essere risolti attraverso il controllo delle prime riflessioni provenienti dalle superfici intorno all'area d'orchestra, in modo tale da rinforzarle od attenuarle a seconda della zona d'orchestra interessata. A tale proposito è interessante citare gli studi effettuati da Marshall, Gottlob e Alrutz (1978) [7] che stabiliscono alcune caratteristiche acustiche per ottenere facilità di assieme in una piccola orchestra d'archi:

- sono considerate favorevoli le riflessioni comprese tra 17 e 35 ms, se giungono in tempi maggiori esse hanno influenza negativa
- lo spettro utile delle riflessioni è compreso tra 500 Hz e 2 kHz, l'energia riflessa al di sotto di 500 Hz influisce negativamente
- l'equilibrio tra tutte le sezioni strumentali dell'orchestra è raggiunto quando la somma dei livelli provenienti dalle diverse sezioni strumentali e percepite da un singolo professore d'orchestra non supera  $\pm 3dB$

Altri studi interessanti sono stati condotti da Ando (1985) [3] sull'individuazione del campo sonoro preferito dagli esecutori. I soggetti presi in esame sono strumentisti e le loro preferenze possono essere sintetizzate come segue:

- il ritardo preferito da uno strumentista (per esempio flauto dolce) dipende dalla durata della funzione di autocorrelazione del pezzo musicale
- il musicista preferisce un campo sonoro in cui i segnali che giungono ai due orecchi sono simili

Secondo gli studi di Marshall e Meyer (1985) [4] effettuati sia su cantanti solisti che in coro, una buona percezione del solista dipende dalla riverberazione percepita sul palcoscenico:

- cantante solista o strumentista solista: le riflessioni iniziali, se intense, contribuiscono favorevolmente solo se il loro ritardo è minore di 40 ms
- strumentisti d'insieme: le riflessioni iniziali intense sono molto importanti

## 1.2 Teatri d'opera

I requisiti per i teatri d'opera sono più numerosi di quelli precedentemente elencati, in quanto ad essi si aggiungono le esigenze dei cantanti sul palco e dell'orchestra nella fossa. La disposizione spaziale di queste due sorgenti sonore che musicalmente sono strettamente legate e spazialmente sono fortemente divise, crea non pochi problemi per l'ascolto reciproco e quindi per le condizioni di assieme. L'area destinata al pubblico, poi, assume il ruolo di un terzo spazio che non deve assolutamente essere scollegato con i due precedenti. Si devono stabilire quindi equilibri tra i cantanti sul palco, i musicisti nella fossa d'orchestra, il direttore d'orchestra e il pubblico. I cantanti devono sentire prontamente gli attacchi dell'orchestra per poter cantare a tempo. I professori d'orchestra devono poter sentire i cantanti sul palco per poter bilanciare la potenza di emissione dei propri strumenti in modo da non sovrastare la voce dei cantanti. Il direttore d'orchestra, responsabile di questo equilibrio, deve poter ascoltare correttamente i suoni che provengono dalle due sorgenti distinte per realizzare i bilanciamenti necessari anche per un buon ascolto in sala.

Lo spettatore deve poter udire con il giusto equilibrio dei livelli sia la voce dei cantanti sia la musica dell'orchestra; deve avere la sensazione di essere avvolto dal suono ed essere coinvolto emotivamente nello spettacolo; deve poter capire il libretto comprendendone le parole. La migliore forma della sala per rispondere ai requisiti precedentemente elencati è quella del teatro d'opera italiano. La forma a ferro di cavallo della sala e la realizzazione di numerosi ordini di palchi, consente al pubblico di avvicinarsi maggiormente alla scena e quindi di percepire meglio la voce dei cantanti, grazie alla maggiore intensità del suono diretto rispetto a quello riverberato. Sale di questo tipo costruite in Italia, in Europa e negli altri continenti, presentano una capienza limitata ad un massimo di 4000 posti. Esigenze legate alla economicità dello spettacolo,

consentono un buon ammortamento delle scene se si superano i 2500 biglietti venduti per spettacolo; la macchina teatrale infatti richiede un organico di persone che normalmente supera le 800 unità, tra coro, orchestra stabile, macchinisti, elettricisti ecc. Questa necessità economica spinge le amministrazioni alla realizzazione di teatri sempre più capaci, e questo è possibile solo se si sostituiscono gli ordini di palchi con ampie gallerie. Lo spettatore si allontana per questo dalla sorgente e inevitabilmente risulta compromessa la qualità dell'ascolto.

### 1.3 Teatri di prosa

L'individuazione dei requisiti progettuali per un teatro di prosa può essere tratta dallo studio dei primi e più famosi teatri di origine greca e romana. È ben noto quali siano state le massime espressioni dell'acustica per teatri di questa tipologia e quali insegnamenti si possano trarre analizzando criticamente i pochi resti archeologici pervenuti. La scena ove gli attori rappresentavano la tragedia, il dramma ecc. (teatro greco), è costituita da un palco con pavimento presumibilmente in legno dietro il quale si eleva una costruzione in pietra che costituisce una scena fissa. L'attore si muove sul palco e, specialmente nella tragedia greca, è accompagnato dal coro che si trova nel semiciclo piano ai piedi del palco, denominato proprio coro; la platea è ad anfiteatro ed è in grado di ospitare più di 5000 persone; la ripida pendenza della cavea in alcuni teatri (Epidauro, Aspendos ecc.) consente allo spettatore una buona visione ed un ottimo ascolto della rappresentazione. Numerose sono le supposizioni che si tramandano, quali l'uso di apposite maschere con bocca a forma di megafono indossate dagli attori anche per amplificare la voce, la posizione in prossimità di pareti altamente riflettenti in cui gli stessi attori si collocavano quando volevano dare più potenza e calore alla propria voce in particolari passaggi della recitazione, la presenza di particolari cavità risonanti (vasi di Vitruvio) per dare più potenza al suono. Alcuni ritengono che i teatri romani fossero dotati di coperture a tenda per proteggere gli spettatori dalla pioggia o dal sole. La presenza dell'area semicircolare o circolare del coro realizzata in pietra è un ottimo specchio riflettente della voce verso gli spettatori più lontani; nel teatro greco e romano, infatti, l'acustica non può contare sulla riflessione del soffitto perché inesistente. Se di necessità occorre fare virtù, i romani e i greci avevano intuito le prime regole dell'acustica e le avevano sfruttate appieno non potendo ricorrere a mezzi di amplificazione elettronica.

Da questa sommaria analisi si possono riconoscere i requisiti fondamentali per una sala di teatro di prosa, ancor più seguendo l'evoluzione nel tempo dell'architettura di questo tipo di teatro. L'anello di congiunzione che lega il teatro greco e romano al teatro di prosa moderno è il teatro Olimpico di Vicenza, massima espressione architettonica della fine del cinquecento. È ben nota l'architettura interna del teatro, progettato da Palladio e arricchita dalla scenografia fissa dello Scamozzi. La sala è a forma di anfiteatro, mantiene ancora un'area libera dal pubblico sotto il palco ed ha una platea a sezione molto ripida. Le caratteristiche architettoniche suggeriscono una sala molto vivace sotto il profilo acustico, con tempo di riverberazione non eccessivamente basso e, soprattutto, con una forte intensità del suono diretto, legata alla ridotta distanza tra

spettatore e scena. In sintesi, si può concludere che i requisiti da ricercare per la progettazione di una sala di prosa sono tutti legati ad una ottima intelligibilità del parlato e a condizioni tali da evitare all'attore di sforzare il proprio organo vocale. Per questo è molto importante che:

- si mantengano distanze ridotte tra ascoltatori e scena
- il tempo iniziale di ritardo sia contenuto entro 20 ms, perché le prime riflessioni rinforzino il suono diretto
- ci sia una buona distribuzione del livello sonoro in sala per tutte le posizioni che l'attore può assumere sulla scena
- si introducano poche superfici fonoassorbenti che sottraggono energia sonora al campo acustico
- si ricerchi una buona intensità del campo diretto per evitare le negative implicazioni del campo riverberato
- il rumore di fondo e il brusio in sala siano mantenuti bassi per ottenere un buon rapporto segnale/rumore che giova all'intelligibilità

Ovviamente questi requisiti devono essere soddisfatti con principi di acustica, senza ricorrere all'amplificazione elettroacustica.

## 1.4 L'opera e il teatro all'italiana

L'opera è un'antica forma d'arte che nacque nelle corti Italiane alla fine del XV secolo. Dopo la sua iniziale crescita nelle corti, iniziò anche ad essere offerta come spettacolo pubblico: come conseguenza del suo successo commerciale, a questo scopo vennero costruiti alcuni teatri. Si afferma che il Teatro di San Cassiano, che venne aperto a Venezia nel 1637, fosse il primo teatro d'opera; questo infatti possedeva la peculiare caratteristica che per la prima volta vedeva l'orchestra posizionata tra il palco ed il pubblico. Per soddisfare la crescente domanda del pubblico, a Venezia vennero costruiti altri teatri e fu così che, al teatro rinascimentale, in cui gli ospiti si accomodavano su gradoni costruiti lungo i lati di una sala e disposti a emiciclo come nell'antico teatro greco, si sostituì, nel corso del XVII secolo il teatro così detto all'italiana. Questo modello di teatro, progettato e perfezionato da architetti italiani, è normalmente caratterizzato da una platea a forma di ferro di cavallo attorno alla quale si sovrappongono, su diversi piani, alcune file o ordini di palchi (palchi di prima fila, di seconda fila e così via), piccoli vani a pareti radiali, aperti verso la sala teatrale, costruiti in modo da accogliere piccoli gruppi di spettatori. Questo tipo di teatro, legato al trionfo e alla diffusione dell'opera in musica, finì per diffondersi in tutta Europa. Così scrive L. Alberti studioso di storia della musica: *Luogo di incontro della società aristocratica, nel Teatro a palchetti, i nobili sono i veri proprietari dei palchetti. Li prendono in pianta,*

*già prima della costruzione del teatro; li affittano poi di anno in anno; ne possiedono la chiave, li arredano anche al loro personale piacimento. Per maggiore agio dei palchettisti, i grandi teatri non di rado dispongono di un'anticamera a ciascun palchetto o di una dépendence, cioè di un ambiente separato, dall'altra parte del corridoio. Nei palchi e negli ambienti attigui si tiene conversazione, si scambiano le visite e i rinfreschi, si gioca. La conversazione e il gioco si allargano e nelle sale si moltiplicano si stabilisce così un singolare costume di ascolto che condiziona la stessa produzione musicale. Praticamente, solo la prima di un'opera è seguita per intero dall'auditorio: alla replica gli habitués, cioè le persone che si recano spesso a teatro, possono tenere abbassato la tenda del loro palco, affacciandosi solo alle arie migliori, da cui nei cantanti la consuetudine di variare ad libitum, cioè a piacere, di sera in sera, gli abbellimenti belcantistici, oppure i più straordinari effetti scenografici.*

Nel nuovo tipo di teatro a palchetti che gli architetti italiani hanno creato dopo la nascita di un nuovo spettacolo genuinamente italiano, il melodramma, si rispecchia lo spirito d'una società gerarchica e fastosa, che anche a teatro vuole la separazione delle classi: i principi e gli ottimati ai posti d'onore, i gaudenti nei palchi dove si fa conversazione, si amoreggia, e all'occorrenza si mangia e si beve, e infine gli umili (quando ci sono) negli infimi posti. La sala illuminata (malgrado le raccomandazioni in contrario di qualche scenografo) non meno sfarzosamente del palcoscenico, e popolata, specie nelle grandi rappresentazioni liriche e coreografiche, da un pubblico in costumi sontuosi, è già uno spettacolo essa stessa. Sovente le stampe dell'epoca, create per documentare lo splendore d'una messinscena, si danno cura di riprodurre anche il teatro e gli spettatori; più lentamente tutto ciò si diffonde negli altri paesi.

## 1.5 Il teatro d'opera europeo

Il teatro d'opera europeo è stato la più stabile dimora per la musica mai ideata. Almeno dal 1700 in avanti, si sono costruiti teatri a ferro di cavallo, con ordini di palchetti uno sopra l'altro e coronati da un loggione di poltrone a basso prezzo. L'ideazione dei palchetti all'interno dei teatri d'opera Europei è tradizionalmente stata affrontata come un modo di espandere proficuamente la capacità della sala e di fornire spazi riservati ad ospiti regolari, piuttosto che come una motivazione per provvedere a spazi progettati acusticamente, da cui apprezzare l'opera.

Questo stile raggiunse la perfezione nel Teatro La Scala di Milano, completata nel 1778. La forma a ferro di cavallo fu riprodotta quasi in ogni principale città d'Europa. Tanto diffuso era il teatro d'opera a ferro di cavallo, che i compositori di opere liriche erano in grado di comporre con un solo genere di acustica in mente.

L'opera richiede esigenze acustiche differenti da quelle dei concerti per orchestra: i passi cantati, infatti, vanno considerati come una forma di comunicazione non dissimile dal parlato. Per conservare l'intelligibilità del libretto, specialmente nei rapidi frasteggi di Mozart e Rossini, il tempo di riverberazione deve essere relativamente breve, cosicché le sillabe successive non vengano mascherate dalla riverberazione dei suoni immediatamente precedenti.

Ad eccezione per i componimenti di Wagner, l'opera Europea si adatta bene alle sale

con un'acustica adatta ai concerti e alla musica da camera del periodo Barocco, ossia le sale con un'alta definizione e una pienezza di tono relativamente bassa. Molti teatri d'opera soddisfano questi requisiti: La Scala di Milano, Fenice a Venezia, il San Carlo a Napoli, l'Opera di Garnier a Parigi, la Royal Opera a Londra, la Staatsoper a Vienna e l'Academy of Music a Philadelphia. In questi teatri le voci dei cantanti sono rivolte verso il pubblico con chiarezza e sufficiente intensità, e l'orchestra suona pulita e non distorta. L'equilibrio tra orchestra e cantanti è assistito dalla progettazione acustica così come dalla conduzione dell'orchestra da parte del direttore.

In Europa l'opera è quasi sempre eseguita con un linguaggio intelligibile per il pubblico, e la maggior parte dei frequentatori d'opera europei sottolineano l'importanza di comprendere il testo. In un teatro d'opera, un'importante conseguenza delle piccole dimensioni è il vantaggio che queste offrono ai cantanti. Harold C. Schoenberg scrisse in *The New York Times*, il 3 Settembre 1961: *La grande, rivoluzionaria conclusione a cui sono giunto può essere poca cosa, ma per lo meno è la mia personale... È più semplice cantare in una sala piccola che in una grande. Cantanti che si esibiscono in un modo al Metropolitan Opera House di New York, tendono a cantare in modo diverso nei più piccoli teatri Europei. In primo luogo, sono meno inclini a potenziare; danno l'impressione di esser maggiormente a proprio agio, come infatti si trovano. Tutto ciò favorisce un ascolto più rilassato.*

Quindi la musica è più sonora in una sala piccola, rispetto ad una grande: sebbene la dimensione di un'orchestra possa essere sufficientemente adatta al volume della sala, un solista non ottiene la medesima estensione.

## 1.6 Requisiti acustici per i teatri d'opera

I requisiti per i teatri d'opera sono molto numerosi, in quanto ad essi si aggiungono le esigenze dei cantanti sul palco e dell'orchestra nella fossa. La disposizione spaziale di queste due sorgenti sonore che musicalmente sono strettamente legate e spazialmente sono fortemente divise, crea non pochi problemi per l'ascolto reciproco e quindi per le condizioni d'insieme. È risaputo che il bilanciamento tra cantante e orchestra è un problema in uno spettacolo d'opera, sia per il pubblico che per i cantanti: oggi come all'epoca i cantanti lamentano il fatto che la musica orchestrale sovrasta la loro voce. Entro certi limiti questo è un fenomeno che resta sotto il controllo del direttore d'orchestra e dei musicisti, ma alcuni strumenti non possono essere suonati sommessamente a piacere (ad esempio gli strumenti a fiato).

L'area destinata al pubblico, poi, assume il ruolo di un terzo spazio che non deve assolutamente essere scollegato con i due precedenti: anche l'acustica della sala gioca il suo ruolo quando proietta troppo il suono dell'orchestra dalla fossa verso il cantante. Almeno in parte, il disturbo causato al cantante può essere provocato dal mascheramento della propria voce da parte dell'orchestra, specialmente quando sta provando ad intonarsi.

Si devono stabilire quindi equilibri tra i cantanti sul palco, i musicisti nella fossa d'orchestra, il direttore d'orchestra e il pubblico. I cantanti devono poter sentire pronta-

mente gli attacchi dell'orchestra per poter cantare a tempo. I professori d'orchestra devono poter sentire i cantanti sul palcoscenico per poter bilanciare la potenza di emissione dei propri strumenti in modo da non sovrastare la voce dei cantanti. Il direttore d'orchestra, responsabile di questo equilibrio, deve poter ascoltare correttamente i suoni che provengono dalle due sorgenti distinte per realizzare l'equilibrio necessario per un buon ascolto in sala. Lo spettatore deve poter udire con il giusto equilibrio dei livelli sia la voce dei cantanti sia la musica dell'orchestra; deve avere la sensazione di essere avvolto dal suono ed essere coinvolto emotivamente nello spettacolo; deve poter capire il libretto comprendendone le parole.

I seguenti termini sono comprensibili sia da musicisti che da esperti di acustica, e, sebbene se ne possano richiamare molti altri, i seguenti ricoprono gli aspetti principali dell'opera lirica.

- *calore e riverberazione.* Da studi effettuati da Beranek su sedici teatri d'opera si ricava che il tempo di riverberazione medio  $T_{60}$  corrisponde a 1,5 s. Sei dei teatri più grandi hanno i tempi di riverbero più lunghi, tra 1,55 e 1,8 s; questi valori sono bilanciati da quelli dei quattro teatri più piccoli, nei quali i tempi si aggirano tra 1,1 e 1,3 s. Tempi di riverbero bassi sono particolarmente adatti per l'opera Italiana, nella quale musica e passi cantati sono notevolmente articolati: per questa ragione La Scala, con un tempo di riverberazione di 1,2 s, viene spesso ritenuta esemplare. Tuttavia sembra che non vengano considerati tempi di riverberazione più alti di quelli delle sei grandi sale, così che ci si potrebbe chiedere se comprendere la parte cantata sia importante quanto un'elevata riverberazione per la musica orchestrale. Il calore viene a crearsi in una sala per valori più alti del rapporto dei bassi  $BR$  (per sale occupate), il rapporto tra  $T_{60}$  a basse frequenze con quello ad alte frequenze. Nelle sale da concerto con tempo di riverberazione medio di 1,7 s (occupate) e  $BR$  medio di 1,1. Nei migliori teatri d'opera, il tempo di ritardo delle prime riflessioni  $ITDG$  è di 26 ms o poco meno; solo in due sale, le più grandi, eccede i 42 ms. Il campo di variazione ottimale di  $ITDG$  per i teatri d'opera si può estendere anche fino a 40 ms (in confronto ai 20 ms delle sale da concerto).
- *intensità soggettiva (loudness).* L'intensità soggettiva viene messa in relazione con l'indice di intensità  $G$  alle medie frequenze.  $G_{mid}$  è correlato all'EDT/V (dove  $V$  è il volume della sala in  $m^3$ );  $G_{mid}$  per i teatri d'opera è, in media, circa 1,5 dB più alto di quello misurato per le sale da concerto, essendovi maggior differenza per i teatri con un  $T_{60}$  a medie frequenze molto basso, di 1,1 s. Questa differenza è significativa, ed accresce la necessità di tempi di riverberazione più alti. Il tempo di riverberazione ottimale per un teatro d'opera vale circa 1,4 s. Va però fatto notare che il grande Metropolitan Opera House di New York ha un  $T_{60}$  a medie frequenze di 1,7 s, il che spiega, in parte, perché l'intensità soggettiva conseguita dai cantanti è adeguata a renderlo accettabile dai critici.
- *intimità.* Tutti i teatri d'opera più stimati hanno un  $ITDG$  inferiore a 30 ms, quasi ottimale. Quando fu chiesto al Maestro Eric Leinsdorf di classificare in base alla qualità acustica i sette teatri d'opera in cui si era esibito negli ultimi due anni,

la sua graduatoria era direttamente connessa alla vicinanza tra le pareti laterali o i prospetti delle balconate laterali. È risaputo che l'ITDG viene determinato sia dai prospetti delle balconate, sia da pannelli sospesi, o dalle pareti laterali, qualunque elemento che rifletta le prime energiche riflessioni al centro della platea; in base alle valutazioni di Leinsdorf, i teatri migliori avevano un ITDG breve.

- *eco e distorsione.* In un teatro d'opera un eco potrebbe non essere ritenuto tale: infatti i cantanti che si esibiscono in un teatro d'opera desiderano un feedback acustico, se ad un livello accettabile, perché le loro voci sono più direzionali degli strumenti a corda e si posizionano nella parte frontale del palco, dove ricevono sostegno dalle superfici circostanti o retrostanti al proscenio. Si sostiene che un teatro d'opera deve soprattutto essere progettato con un certo grado di variabilità nell'ammontare del suono riflesso indietro verso il palco dal muro posteriore della platea e dai prospetti delle balconate. Alcune aree del muro posteriore, che altrimenti restituirebbero troppo energicamente le riflessioni, possono essere smorzate, rese acusticamente assorbenti, aggiungendo materiali fonoassorbenti, di spessore che va da 2 a 5 cm, che assorbano suoni a frequenze di 500 Hz e oltre. Se il percorso compiuto dal suono diretto e poi riflesso è di 60 m, risulterà in un ritardo di 180 ms. I solisti in particolare vogliono avvertire che stanno riempiendo la sala ad un livello canoro soddisfacente. Ma quanta energia sonora deve essere rinviata al palco per realizzare ciò evitando che insorga uno sgradevole eco? Dal momento che non è stato ideato alcun metodo per prevedere accuratamente questo valore, si dovrebbero aggiungere gradualmente materiali fonoassorbenti finché non viene raggiunto un corretto valore di smorzamento. Nakamura (1991) determinò, a partire da approfonditi esperimenti, che per un ritardo di 140 ms (riflessioni provenienti da una superficie distante 48 m), il livello delle riflessioni frontali dovrebbe essere da 25 a 35 dB al di sotto del livello del suono diretto (entrambi misurati con un microfono posizionato ad 1 m di fronte al cantante). Okano (1994) eseguì più o meno lo stesso esperimento con un gruppo di soprani e chiese loro un giudizio sul livello di tolleranza delle riflessioni del muro. Per tempi di ritardo di 120, 170 e 220 ms (superfici riflettenti rispettivamente a 20.4, 28.5 e 37 m) il più sensibile dei cantanti riportò livelli di tolleranza (misurati ad 1 m di fronte al cantante) rispettivamente di 36, 38 e 42 dB inferiori al suono diretto. Beranek affermò che l'Indiana University Auditorium a Bloomington, contenente 3760 posti a sedere, spesso utilizzato per l'opera lirica, conferma queste osservazioni: *vicino al fronte del palco e sul palco stesso c'è uno speciale tipo di vivezza, dovuta alle riflessioni provenienti dai muri posteriori della platea, dai prospetti delle balconate, dalle superfici solide che proiettano indietro dai margini delle larghe inferriate dei muri laterali e dalle modanature per l'illuminazione del soffitto. I cantanti affermano che questo auditorium rinforza notevolmente le loro voci.* Venne riferito all'autore che vennero inserite gradualmente superfici di materiale fonoassorbente in modo da smorzare l'eco finché si poteva non considerare più un eco.
- *tessitura.* La tessitura è già stata definita come l'impressione soggettiva del modo

in cui la sequenza di riflessioni sonore giunge alle orecchie dell'ascoltatore dopo l'arrivo del suono diretto. A partire da studi effettuati per cinque sale dalle tre forme più comuni - rettangolare, a ferro di cavallo e a ventaglio - è stato ricavato l'andamento delle riflessioni e dall'analisi completa dei dati si è visto che si considerano soltanto le riflessioni la cui intensità non eccede per più di 10 dB il suono diretto. Si riscontrano differenze nella sequenza di riflessioni sonore per le tre tipologie di sale: se quelle di forma rettangolare presentano un ITDG di circa 22 ms, e per le sale a ventaglio è molto lungo, l'ITDG delle sale a ferro di cavallo non supera i 20 ms. La breve durata dell'ITDG di quest'ultimo tipo di sala è principalmente dovuta alla distanza relativamente piccola tra balconate opposte; comunque, a causa dell'altezza del soffitto, vi sono soltanto altre due riflessioni entro 60 ms.

L'acustica dei teatri d'opera, ha per oggetto lo studio del campo sonoro in tutta la sala, le correlazioni del campo con la percezione binaurale dell'attore, del musicista e dell'ascoltatore, il ruolo delle forme e dei materiali di rivestimento nella distribuzione del suono. L'acustica dei teatri d'opera può essere quindi concepita come la dimensione in cui scienza ed arte si incontrano.

## 1.7 L'auditorium 'Cesare Pollini'

L'auditorium 'Cesare Pollini' di Padova è stato costruito negli anni settanta per soddisfare le esigenze dell'adiacente Conservatorio di Musica di avere a disposizione una sala da concerto per le attività didattiche. L'uso della sala, non essendo attualmente presenti nella città di Padova ambienti analoghi, è in realtà molto più ampia: vi si tengono numerosi concerti collegati a varie stagioni (Amici della musica di Padova, Orchestra da camera di Padova e del Veneto).

L'accesso all'auditorium è sito in via C. Cassan, attraverso le scale presenti nel foyer si accede alla sala, che ha una pianta disegnata a 'ventre di balena'. L'ambiente misura in media ca. 30 m di lunghezza per 22 m di larghezza e ca. 8,50 m di altezza (in platea) e 11 m di altezza in palcoscenico. La volumetria è di circa  $5800 m^3$ , di cui 3900 della zona del pubblico e 1900 dell'area palcoscenico; non avendo questa sala una suddivisione netta tra area scenica e pubblica, mancando quindi un boccascena vero e proprio ed un sipario, si può considerare il volume unico di  $5800 m^3$  circa. La platea ha 544 posti a sedere suddivisi in quattro settori. Sul palcoscenico si trova l'organo Mascioni. L'accesso per i musicisti sul palcoscenico è ricavato in due nicchie laterali del palcoscenico a tutta altezza.

Lungo le pareti laterali della sala sono disposti dei pannelli con rivestimento differenti sulle due superfici (legno e moquette), questi elementi sono fissati su supporti che permettono la loro rotazione al fine di modificare l'assorbimento acustico della sala e quindi poter variarne l'acustica.

Nel corso dell'anno 2003 la sala è stata sottoposta a interventi finalizzati alla messa a



Figura 1.1: Vista interno auditorium C. Pollini

norma degli impianti, dei materiali, delle vie di fuga, etc. La sala attualmente presenta i seguenti rivestimenti superficiali:

- pavimento palcoscenico in parquet ligneo;
- pavimento sala in moquette tipo A ;
- pareti perimetrali al palcoscenico in muro con intonaco verniciato con sulla parete del fondo palco la presenza delle canne d'organo;
- frontale palcoscenico rivestito in legno;
- zoccolatura delle pareti perimetrali alla sala per un'altezza di circa 1,0 m rivestite di materiale ligneo;
- pannellature delle pareti perimetrali alla sala dalla zoccolatura suddetta fino al contro-soffitto rivestite in moquette tipo B su una faccia e legno verniciato sull'altra faccia . La maggior parte di dette pannellature laterali possono essere regolate su una delle due facce descritte o essere messe in posizione intermedia;
- contro-soffitto leggermente arcuato verso i raccordi con le pareti della sala e a scalare verso il palcoscenico, realizzato in cartongesso su sovrastante struttura portante.
- poltrone imbottite rivestite in velluto leggero (n. 544 posti);

- le porte di accesso alla sala sono tappezzate in moquette tipo B;
- il contro-soffitto (provvisorio) del palcoscenico è costituito lastre in calciosilicato del tipo REI 60, per adeguamento alle norme di prevenzione incendi. Al di sotto di questo, ad altezza del boccascena, sono state posizionate su tutta l'area del palcoscenico delle vele di tessuto tipo telo oscurante ( $225 \text{ gr/m}^2$ ).



Figura 1.2: Vista della sala auditorium C. Pollini



Figura 1.3: Vista verso la sala auditorium C. Pollini



Figura 1.4: Vista del palcoscenico auditorium C. Pollini

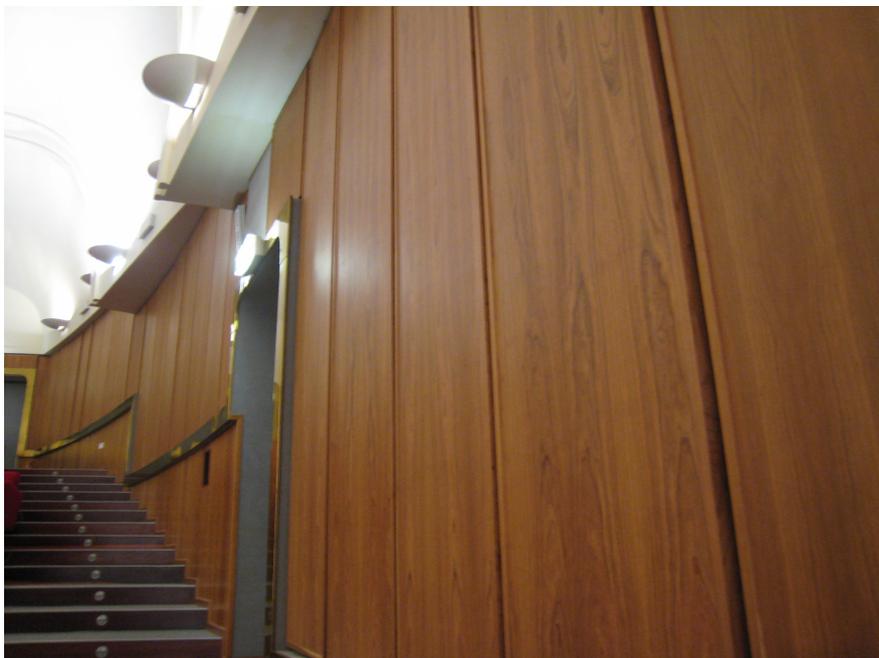


Figura 1.5: Vista dei pannelli riflettenti in legno

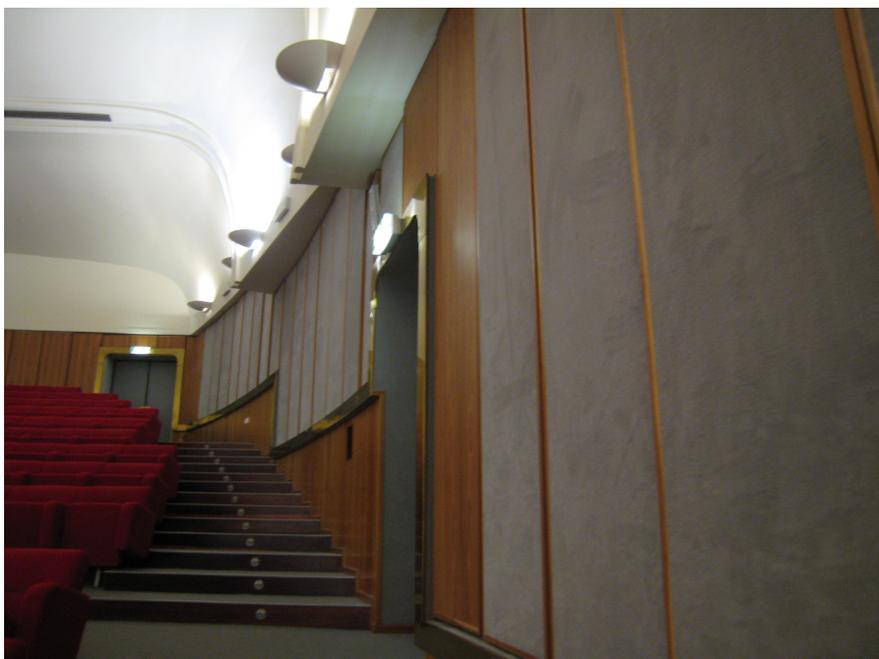


Figura 1.6: Vista dei pannelli acustici assorbenti rivestiti



## Capitolo 2

# ACUSTICA ARCHITETTONICA E PARAMETRI ENERGETICI

### 2.1 Considerazioni preliminari

Il comfort acustico può essere definito come quella condizione psicofisica per cui un individuo, immerso in un campo sonoro, si trova in condizioni di benessere, in relazione all'attività che sta svolgendo.

Guardando alla qualità acustica degli ambienti destinati all'ascolto della parola, requisiti essenziali sono l'assenza di disturbo e la buona ricezione. Il soddisfacimento di tali requisiti porta al conseguimento di condizioni ottimali di intelligibilità della parola. Parlando di assenza di disturbo si può intendere non solo l'assenza di un rumore di fondo che maschera il suono prodotto da un parlatore, provocando una riduzione di intelligibilità del parlato, ma anche l'assenza di un suono non gradito in grado di provocare una sensazione uditiva sgradevole e fastidiosa. W.C. Sabine definì i requisiti fondamentali per una buona ricezione in un auditorium; egli affermò che: è necessario che il suono sia sufficientemente forte, che le componenti contemporanee di un suono complesso mantengano un rapporto appropriato tra le loro intensità e che suoni successivi nella loro rapida articolazione, sia che si tratti di parlato, sia che si tratti di musica, siano chiari e distinti, liberi da sovrapposizioni mutue e da rumori estranei.

L'acustica architettonica tratta sostanzialmente del controllo della riverberazione, dell'isolamento e del controllo del rumore e della distribuzione e dell'assorbimento del suono. Essa mira alla intelligibilità del parlato, alla libertà da rumori esterni indesiderati e alla ricchezza della musica. La buona ricezione è legata alla presenza di un sufficiente livello sonoro in ambiente e alla percezione ottimale delle onde sonore dirette e riflesse dalle superfici dell'ambiente, sia per quanto riguarda la loro composizione in frequenza, sia per quanto riguarda gli sfasamenti temporali che le caratterizzano. In particolare, nel caso di ascolto della parola, il contributo delle onde riflesse deve essere tale per cui si instauri una situazione favorevole di compromesso, secondo cui esse possano contribuire al rinforzo del livello sonoro diretto, senza che una durata troppo lunga della coda sonora mascheri i segnali successivi. Il tempo di riverberazione resta quindi un parametro oggettivo corrente in base al quale viene valutata la buona rice-

zione in un ambiente.

L'elevata rumorosità di fondo e la presenza di una eccessiva riverberazione pregiudicano l'intelligibilità della parola, intesa come percentuale di parole o frasi comprese correttamente da un ascoltatore rispetto alla totalità delle parole o frasi pronunciate da un parlatore.

## 2.2 La buona ricezione

Per ottenere una buona ricezione in un ambiente destinato all'ascolto della parola si fa riferimento a requisiti quali l'adeguato livello sonoro ( $L_p$ ) e la sua uniformità spaziale, e il contenimento temporale della riverberazione sonora, valutato attraverso il valore assunto del tempo di riverberazione (TR).

**IL LIVELLO SONORO ( $L_p$ ).** Il campo sonoro che tende a stabilirsi in condizioni stazionarie in un ambiente chiuso è dato dalla sovrapposizione del campo sonoro diretto, dato dalle onde provenienti direttamente dalla sorgente, e dal campo riverberato, costituito dall'insieme di tutte le onde riflesse, che si susseguono con regolarità. Il suono diretto si riduce in intensità in funzione del quadrato della distanza della sorgente, ma viene contemporaneamente integrato dalle riflessioni provenienti dalle superfici delimitanti il locale. Per il suono riverberato si distinguono le prime riflessioni, che pervengono all'ascoltatore entro poche decine di millisecondi dopo il suono diretto e che contribuiscono insieme a questo a costituire il segnale utile, e le successive che risultano mascheranti.

La formula, da usarsi per un campo semiriverberato, che permette di trovare il livello di pressione percepito dall'ascoltatore in presenza di campo sia diretto che diffuso è la seguente:

$$L_p = L_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi \cdot r^2} + \frac{4}{R^*} \right) = L_{dir} + L_{riv} \quad [dB] \quad (2.1)$$

nella quale il primo termine entro parentesi rappresenta il contributo del campo diretto  $L_{dir}$  che scende di 6dB ad ogni raddoppio della distanza, con Q fattore di direzionalità (rapporto fra l'intensità sonora in un punto qualsiasi a distanza dalla sorgente e l'intensità sonora che si sarebbe avuta nello stesso punto nel caso in cui la stessa sorgente avesse irradiato uniformemente) e r distanza ascoltatore sorgente, mentre il secondo termine è il contributo del campo riverberato  $L_{riv}$ , considerato costante, con  $R^*$  costante d'ambiente:

$$R^* = \frac{\sum a_i}{1 - \bar{a}} \quad [m^2] \quad \text{con} \quad \bar{a} = \frac{\sum a_i}{\sum S_i} \quad (2.2)$$

dove  $\bar{a}$  è il coefficiente di assorbimento medio e  $\sum a_i = a$  è l'assorbimento totale.

Dal grafico a pagina seguente si può notare che la curva che rappresenta il livello sonoro diretto è una retta decrescente. La curva che rappresenta il livello riverberante

invece si stacca dalla curva del livello diretto e decresce fino ad un certo punto dopo di che diventa una retta orizzontale. Queste due curve determinano, come si può notare dal grafico a pagina seguente che riporta l'andamento del suono diretto e del campo riverberante, 3 aree con caratteristiche differenti. Si nota come la sola presenza del suono diretto determini un decadimento perfettamente rettilineo (rappresentato dalla parte tratteggiata).

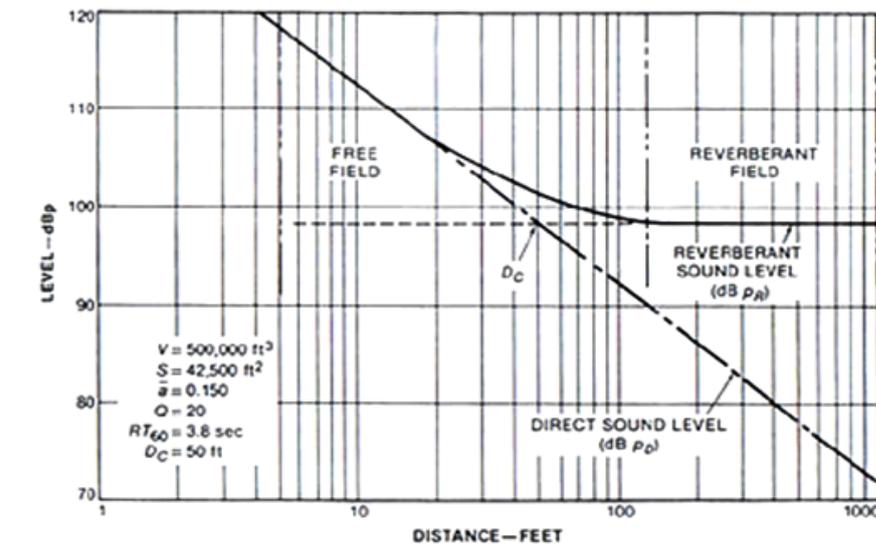


Figura 2.1: Andamento del suono diretto e del campo riverberante

Le tre aree in cui il grafico viene diviso rappresentano rispettivamente:

- **Campo vicino:** che precede la retta verticale passante per il punto di intersezione delle due curve; in questa zona per valori superiori di 10 dB a partire dalla retta del livello sonoro riverberante, il campo riverberante è trascurabile.
- **Campo semi-riverberante:** va dal campo vicino fino alla retta verticale passante nel punto di intersezione tra la retta del suono diretto e una retta orizzontale con ordinata costante di 10 dB in meno rispetto alla retta orizzontale del suono riverberante. Nel campo semi-riverberante il livello sonoro diminuisce di 6 dB ogni raddoppio di distanza.
- **Campo diffuso:** va dal campo semi-riverberante in poi. In questa area il livello di suono diretto è trascurabile.

Le rette del campo riverberante  $L_{riv}$  e del campo diretto  $L_{dir}$  si intersecano nel punto  $D_c$  chiamato distanza critica ed è il punto in cui  $L_{riv} = L_{dir}$ . Nel caso di una registrazione, per esempio, il microfono deve rientrare nella distanza critica  $D_c$  per captare un buon suono diretto. Eguagliando  $L_{riv}$  e  $L_{dir}$ :

$$L_w + 10 \log \frac{Q}{4\pi \cdot r^2} = L_w + 10 \log \frac{4}{\sum \alpha_i S_i} \quad [dB] \quad (2.3)$$

ricavo l'espressione per trovare la distanza critica:

$$D_c = \sqrt{\left(\frac{Q}{16} \sum \alpha_i S_i\right)} \quad [m] \quad (2.4)$$

Per esempio se considero:  $\sum \alpha_i S_i = 20m^2$  e  $Q = 1$ , trovo:

$$D_c = \sqrt{\left(\frac{Q}{16} \sum \alpha_i S_i\right)} \cong 1.1 \quad [m] \quad (2.5)$$

La distanza critica è estremamente importante in termini di qualità e comprensione del messaggio che viene riprodotto.

Infatti se ci si trova entro tale distanza dalla sorgente, mi trovo in una situazione dove il suono diretto è predominante sul campo riverberante. Il suono diretto è chiaro, è nitido e porta un'informazione perfettamente intelligibile, viceversa il suono riverberante è confuso. Quindi soprattutto per quanto riguarda la comprensione della parola è importante che l'ascoltatore venga a trovarsi entro la distanza critica dalla sorgente, ma ciò non sempre è possibile.

Per l'ascolto normale i suoni riflessi aiutano l'ascolto perché apportano un livello sonoro più alto, però è importante non solo la quantità di suono che arriva al ricevitore, ma va tenuto in considerazione anche l'aspetto qualitativo.

Agli ascoltatori devono arrivare suoni con livello sufficientemente alto: il linea di massima si ritiene che l'ascoltatore più sfavorito debba ricevere un livello di almeno 45 dB. Il livello di potenza sonora per la voce umana nel parlato normale è in media attorno ai 70 dB. I valori più alti di potenza sonora competono alle vocali, valori più bassi alle consonanti. Benché un oratore cerchi di adattare la forza della propria voce alle esigenze della sala con un incremento che può arrivare fino a 6-12 dB sul parlato normale, è evidente che oltre una certa distanza (attorno a 20-30 metri) il suono diretto giunge con un livello troppo debole per un'audizione soddisfacente.

La distanza oltre alla quale il suono diretto risulta trascurabile si può calcolare, conoscendo l'assorbimento totale  $a$  della stanza, con la seguente relazione empirica:  $d = 0,5\sqrt{a}$  dove  $d$  è espresso in metri e l'assorbimento  $a$  in  $m^2$  di finestra aperta.

## 2.3 Alcuni criteri di progettazione acustica

Come è facile intuire, un auditorium, un teatro, un'aula scolastica, una palestra, una sala da concerto presentano problematiche acustiche diverse tra loro, di cui si deve tener conto fin dallo stadio di progetto. La discriminante fondamentale è legata alla priorità di un buon ascolto della parola e/o musica; tale priorità determina la scelta ottimale delle dimensioni, della forma e delle finiture dello spazio.

Lo sviluppo del progetto di una sala dovrebbe toccare i seguenti punti:

1. considerazioni sul sito
2. forma e volume
3. tempo di riverberazione
4. parametri acustici
5. rumore di fondo
6. uso polivalente

### **CONSIDERAZIONI SUL SITO:**

La collocazione di una scuola dovrebbe possibilmente essere in una zona tranquilla, lontano dal rumore di traffico su strada o ferrovia e dai corridoi aerei. Ciò non è possibile nei grandi centri urbani, nel qual caso si deve ricorrere a soluzioni alternative per isolare dal rumore esterno, come circondare l'edificio di vani accessori e corridoi in modo da posizionare gli ambienti adibiti all'ascolto della parola in zone più interne e schermate dell'edificio (anche questo non sempre è realizzabile); risulta comunque molto utile sfruttare l'utilizzo di pareti ventilate e altri accorgimenti acustici per isolare dal rumore interno ed esterno.

### **FORMA E VOLUME:**

Nella progettazione acustica di una sala si possono individuare due punti essenziali:

- il controllo delle prime riflessioni, che dipende principalmente dalla forma della sala
- il controllo del suono riverberato, che dipende dalle dimensioni della sala e dai materiali di finitura interna

Fin dal primo stadio della progettazione ci si deve accertare che la forma e il volume dell'ambiente siano adeguati a conseguire una distribuzione uniforme delle riflessioni, sia nel tempo che nello spazio. Per studiare l'effetto della forma della sala sulla distribuzione del suono e per identificare le superfici che possono eventualmente produrre echi indesiderati, si può procedere all'analisi delle riflessioni mediante il tracciamento dei raggi sonori. Esso è basato sui principi dell'acustica geometrica e viene generalmente compiuto utilizzando dei programmi di simulazione che consentono di esaminare un gran numero di riflessioni. Questo tipo di analisi si rivela uno strumento importante per determinare la forma della sala, in particolar modo per stabilire l'inclinazione del soffitto, delle pareti e di eventuali riflettori da inserire, in modo da produrre riflessioni utili, ossia con meno di 10 m di differenza di percorso rispetto al suono diretto. Nella tabella sottostante, per alcune differenze di percorso, viene riportata la condizione di ascolto relativa:

La differenza di tempo, corrispondente alla differenza di percorso, con cui i suoni arrivano all'orecchio, determina gli effetti più rilevanti sulla percezione uditiva: per esempio, se il suono riflesso giunge con un ritardo superiore a circa 1/17 di secondo

| <i>Differenza di percorso</i> | <i>Condizione di ascolto</i>                   |
|-------------------------------|--|
| meno di 8.5 m                 | eccellente per parola e musica                 |
| da 8.5 a 12 m                 | buona per la parola, povera per la musica      |
| da 12 a 15 m                  | al limite dell'accettabile                     |
| da 15 a 21 m                  | negativa                                       |
| oltre 21 m                    | eco intollerabile, se di intensità sufficiente |

Figura 2.2: Condizioni di ascolto in relazione alla differenza di percorso

(a cui corrisponde una differenza di percorso di circa 20 m) dopo il suono diretto, esso viene percepito come eco; se il ritardo è inferiore a  $1/40$  di secondo (a cui corrisponde una differenza di percorso di 8.5 m), il suono riflesso si fonde favorevolmente con quello diretto accrescendone l'intensità sonora percepita.

Nelle grandi sale, le prime riflessioni prodotte dal soffitto e dalle pareti laterali, risultano essere le più importanti per il controllo del livello sonoro nell'area destinata al pubblico, in particolare sui settori più lontani dalla sorgente. Risulta pertanto opportuno assumere accorgimenti che favoriscano l'efficacia di tali riflessioni.

Riflessioni invece che pervengano con un ritardo superiore a 50 ms, e quindi con una differenza di circa 17 m, rispetto al suono diretto vengono percepite come suono distinto e danno luogo al fenomeno dell'eco. L'eco vero e proprio ha luogo per ritardi superiori a 0,10 secondi; ritardi fra 0,05 e 0,10 secondi provocano il cosiddetto eco ravvicinato che consiste in un indesiderato prolungamento del suono originario. Si tratta di difetti acustici che vanno accuratamente evitati.

Dato che nel tempo di 0,05 secondi l'onda sonora percorre una quindicina di metri, è opportuno che in ambienti di dimensioni superiori a questa non vi siano pareti di forma regolare e molto riflettenti.

Un ulteriore fenomeno d'eco da eliminare con cura è il cosiddetto flutter: Esso si verifica in presenza di due superfici parallele riflettenti, dall'una all'altra delle quali si hanno riflessioni ripetute di uno stesso suono. Tali superfici possono essere sia soffitto e pavimento, che pareti laterali. Un possibile rimedio, oltre a quello di aumentare l'assorbimento delle superfici interessate, consiste nell'assegnare una divergenza anche leggera fra le due superfici.

Buona norma è che non ci siano pareti parallele riflettenti direttamente affacciate. Non essendo di facile ed economica realizzazione modificare il parallelismo delle pareti, spesso è consigliabile intervenire sull'assorbimento. Si rivestono allora le pareti con due tipi di pannelli (assorbenti maggiormente alle basse o alle alte frequenze) allo scopo di assorbire in modo uniforme su tutto lo spettro sonoro. Inoltre la disposizione a scacchiera aumenta la diffusione del suono e favorisce ancor di più l'obiettivo prefissato.

Si cercherà di gestire l'assorbimento acustico degli ambienti in modo da ottenere una risposta regolare per quanto riguarda lo spettro sonoro, anche se è inevitabile che il tempo di riverberazione alle basse frequenze sia maggiore di quello alle alte. Oltre ai già citati pannelli alle pareti, si può mettere in opera intonaco acustico, ma il ruolo

certamente più importante è svolto dal contro-soffitto assorbente sospeso, grazie all'ampia superficie e alle svariate possibilità che offre.

Altri inconvenienti acustici dell'ambiente possono derivare dalla distorsione dei suoni, dalla presenza di ombre acustiche o concentrazioni, da effetti di risonanza.

La distorsione è causata dal diverso assorbimento delle superfici nella spettro sonoro. Nelle condizioni ideali l'assorbimento dovrebbe avere un carattere selettivo con caratteristiche legate a quello dell'orecchio umano: più elevato assorbimento alle medie frequenze e più ridotto alle alte e basse.

Ombre acustiche possono essere provocate da ostacoli alla propagazione del suono o da superfici di eccessiva concentrazione che implicano deficienza sonora in altre zone. A tal proposito andrebbero evitate superfici a profilo concavo o convesso non opportunamente trattate.

#### **TEMPO DI RIVERBERAZIONE:**

Nonostante il diffondersi di nuovi indici di valutazione, la previsione del tempo di riverberazione e del suo andamento in funzione della frequenza, resta uno degli aspetti più importanti della progettazione acustica. Generalmente i valori ottimali suggeriti comportano l'esigenza di contenere il volume per persona tipicamente entro  $3.5 m^3$  per la parola e  $6 m^3$  per la musica. Non è tanto importante il numero di spettatori, quanto le dimensioni dell'area da essi occupata (*seating area*), in quanto determina, in termini di assorbimento, il tempo di riverberazione e la *loudness*. Dato il volume, e stimato l'assorbimento acustico medio delle superfici, il tempo di riverberazione convenzionale può essere stimato mediante la formula di Sabine (come già visto nel paragrafo precedente); il risultato numerico che ne deriva va considerato, ai fini della progettazione, come un'indicazione molto utile, ma da trattare con una certa cautela. In effetti il tempo di riverberazione misurato a posteriori a sala finita risulta spesso più breve di quello calcolato. Ciò si spiega in parte col fatto che il calcolo viene effettuato utilizzando valori di coefficiente di assorbimento di superfici e materiali misurati in condizioni di diffusività diverse o in diverse condizioni di impiego. Gli effetti del suono riverberato sulla qualità dell'ascolto si valutano con la determinazione del tempo di riverberazione ottimale  $T_{60}$ . Esso è definito come il tempo che deve trascorrere dall'interruzione dell'emissione della sorgente alla riduzione dell'intensità sonora ad un milionesimo di quella di regime. Tale riduzione deve essere dunque di 60 dB relativamente al livello di intensità. Più precisamente si considera la pendenza della curva di decadimento compresa tra -5 e -60 dB a partire dal valore massimo posto a 0 dB. È importante escludere i primi 5 dB di decadimento dalla misura del tempo di riverberazione per evitare l'influenza delle prime riflessioni particolarmente forti.

Il fenomeno della riverberazione sonora presenta aspetti positivi e negativi. Se da un lato è utile ai fini dell'ascolto perché contribuisce al rinforzo del suono diretto, dall'altro un valore eccessivo della coda sonora ne peggiora la qualità, rendendo il suono impastato. Il valore ottimale del tempo di riverberazione rappresenta il giusto compromesso tra il raggiungimento di un livello sonoro sufficiente per un'audizione senza sforzo, in tutti i punti dell'ambiente, e la riduzione del disturbo provocato da un eccesso

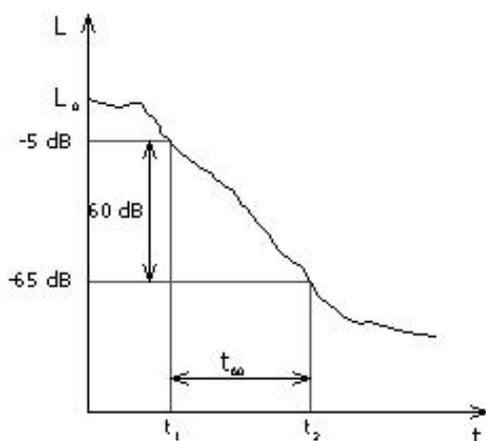


Figura 2.3: Grafico del tempo di riverberazione

di riverberazione. La determinazione di tale valore ottimale è stata ottenuta in seguito a numerose valutazioni soggettive sulla qualità dell'audizione in ambienti con diverse destinazioni d'uso. In linea generale, per ambienti destinati all'ascolto della parola dove il suono diretto viene privilegiato rispetto a quello riverberato, si indicano valori di  $T_{60}$  più brevi rispetto a quelli ideali per sale destinate all'ascolto della musica. Si passa infatti da poco meno di un secondo per il parlato a poco più di due secondi per la musica. Dall'insieme di valutazioni si trae anche l'informazione che ad un incremento del volume dell'ambiente deve corrispondere un aumento del tempo di riverberazione ottimale. Questo sembra giustificato dal fatto che, all'aumentare del volume della sala, si accetti un lieve peggioramento dell'ascolto in favore di un più elevato valore del livello sonoro. Infatti, sia il livello sonoro che il tempo di riverberazione, a parità di altre condizioni, si riducono con l'aumentare dell'assorbimento acustico totale. Poiché il tempo di riverberazione è di fatto inversamente proporzionale all'assorbimento totale, e direttamente proporzionale al volume dell'ambiente, per mantenere un buon livello sonoro, si accetta un suo incremento fino ad un valore limite che non comprometta la buona ricezione del suono. Le formule usate per trovare il  $T_{60}$  sono:

- per  $\bar{\alpha} < 0,2$  quella proposta da Sabine

$$T_{60} = 0,161 \frac{V}{A} \quad [s] \quad (2.6)$$

- per  $\bar{\alpha} > 0,2$  quella proposta da Eyring

$$T_{60} = \frac{0,07 \cdot V}{S [-\log(1 - \bar{\alpha})]} \quad [s] \quad (2.7)$$

dove  $\alpha$  è il coefficiente di assorbimento medio dell'ambiente,  $V$  il volume,  $A$  l'assorbimento totale,  $S$  la superficie interna del locale.

In letteratura sono riportati diagrammi che consentono la determinazione del tempo di riverberazione ottimale in funzione del volume dell'ambiente e della sua destinazione d'uso.

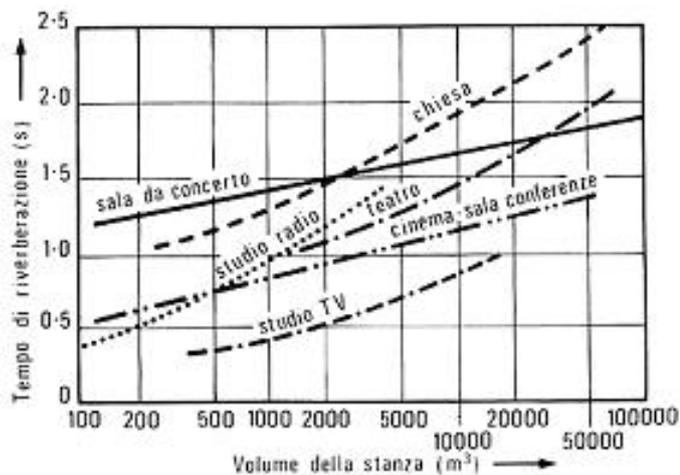


Figura 2.4: Determinazione del tempo di riverberazione ottimale in funzione del volume dell'ambiente e della sua destinazione d'uso

Sono state inoltre proposte alcune relazioni empiriche che forniscono il tempo di riverberazione ottimale per determinate frequenze.

Sul valore calcolato sono tollerabili variazioni fino al 25%, soprattutto su valori più alti per la musica e più bassi per il parlato. I tempi consigliati sono validi per tutte le frequenze superiori a 500 Hz; per frequenze inferiori è di solito gradito un aumento del tempo di riverberazione del 20% a 250 Hz e del 40% a 125 Hz.

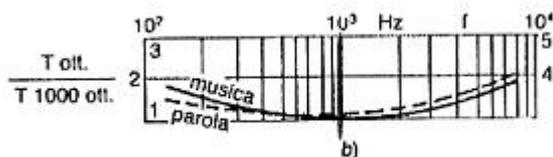


Figura 2.5: Esempio di abaco per il calcolo di  $T_{60}$  alle varie frequenze partendo dal  $T_{60}$  a 1kHz

Sono inoltre disponibili degli abachi che danno i coefficienti da moltiplicare al tempo di riverberazione ideale a 1 kHz, per trovare i  $T_{60}$  per ogni frequenza trattata nel calcolo. Spesso nei casi concreti non è possibile misurare il tempo di riverberazione per un decadimento effettivo di 60 dB, ecco allora che si introducono delle approssimazioni andando a calcolare il tempo di riverberazione su decadimenti di 20 o 30 dB e ricostruendo per interpolazione il decadimento a 60 dB:

- $T_{10}$  (tempo di riverberazione iniziale), calcolato estrapolando a -60 dB la pendenza media dei 10 dB compresi nell'intervallo -5, -15 dB del decadimento del livello di pressione sonora
- $T_{20}$  (tempo di riverberazione iniziale), calcolato estrapolando a -60 dB la pendenza media dei 20 dB compresi nell'intervallo -5, -25 dB del decadimento del livello di pressione sonora
- $T_{30}$  (tempo di riverberazione) calcolato estrapolando a -60 dB la pendenza media dei 30 dB compresi nell'intervallo -5, -35dB del decadimento del livello della pressione sonora.

### **PARAMETRI ACUSTICI:**

Una sala acusticamente ben progettata presenta una buona intelligibilità dei suoni di sufficiente intensità (tempo di riverberazione ottimale), assenza di rumori estranei indesiderati (isolamento acustico e riduzione) e buona distribuzione del suono [?].

Se il suono arriva ad un ascoltatore per due vie di lunghezza troppo diversa esso produce uno spiacevole effetto tremolante detto eco. Un tremolio del genere si ha in un ambiente tra una coppia di pareti parallele opposte che siano lisce e molto riflettenti. Il suono viene riflesso avanti e indietro tra le due pareti producendo echi multipli. La focalizzazione del suono è la concentrazione del suono in un punto di un ambiente prodotta dalla riflessione delle onde sonore su superfici curve o circolari. Il risultato è una distribuzione ineguale del suono. Un angolo morto è una zona con deficienza di suono, cioè dove non si sente praticamente niente, a causa dell'interferenza di due o più onde sonore. Data la diffrazione del suono, cioè il fatto che le onde sonore aggirano un ostacolo, l'ostacolo può rivelarsi una efficace barriera alla trasmissione del suono se le sue dimensioni sono paragonabili alla lunghezza d'onda dell'onda sonora. Dall'altra parte dell'ostacolo in questo caso si forma una ombra acustica.

La progettazione acustica delle sale deve promuovere le onde oblique dato che esse si smorzano più rapidamente, ma deve ostacolare le onde assiali dato che queste sono più persistenti.

Numerosi studi hanno confermato che l'ascoltatore può apprezzare differenze della qualità non solo tra sale diverse, ma nella stessa sala anche da posto a posto.

Sotto questo punto di vista, non vi è dubbio che l'ascolto è una esperienza complessa, multidimensionale, molto difficile da descrivere quantitativamente. I parametri acustici più significativi possono essere raggruppati in tre categorie:

- parametri che si riferiscono al bilanciamento soggettivo tra chiarezza e riverberazione;
- parametri che si riferiscono all'impressione soggettiva della loudness;
- parametri che si riferiscono all'impressione spaziale.

*Il tempo iniziale di ritardo (ITDG):* è il valore temporale del ritardo della prima riflessione rilevante ricevuta nel punto di ascolto dopo l'istante iniziale in cui arriva il suono diretto. Questo parametro è legato al criterio soggettivo che definisce l'impressione delle dimensioni della sala, denominato intimacy. I valori medi trovati sono i seguenti:

- < 20 ms eccellente
- < 33 ms da molto buono a eccellente
- < 57 ms da buono a molto buono
- < 70 ms da sufficiente a buono

*L'indice di impressione della sala ( $R_S$ ):* è un parametro calcolabile con la relazione:

$$R_S = 10 \log \frac{\int_{25ms}^{\infty} p_k^2(t) dt - \int_{25ms}^{80} p_R^2(t) dt}{\int_0^{25ms} p_k^2(t) dt + \int_{25ms}^{80} p_R^2(t) dt} \quad [dB] \quad (2.8)$$

che rappresenta quindi il rapporto tra l'energia delle prime riflessioni laterali che giungono tra 25 e 80 ms (escluso il suono diretto) e le prime riflessioni frontali (incluso il suono diretto) che giungono entro i primi 80 ms. Il numeratore rappresenta la differenza tra l'energia di tutto il decadimento, escluso il suono diretto, e l'energia delle prime riflessioni comprese tra 25 e 80 ms che giungono frontalmente. Il denominatore rappresenta invece la somma dell'energia del suono diretto con l'energia delle prime riflessioni comprese tra 25 e 80 ms che giungono frontalmente. La grandezza  $p_k(t)$  rappresenta il valore istantaneo della pressione sonora rilevata da un microfono omnidirezionale,  $p_R(t)$  rappresenta la pressione sonora istantanea rilevata con un microfono direttivo orientato con l'asse di maggiore sensibilità verso la sorgente e con un cono di apertura a sensibilità costante di  $40^\circ$  e nulla per il resto dell'angolo giro. È considerata utile per l'impressione di spazialità l'energia che giunge da tutte le direzioni dopo 25 ms:  $\int_{25ms}^{\infty} p_k^2(t) dt$

Sono considerate negative tutte le energie rappresentate dagli altri termini dell'espressione. L'indice  $R_S$  dipende dalla distribuzione direzionale delle riflessioni. In letteratura non sono reperibili valori di riferimento.

*Early Decay Time (EDT):* definito come il tempo richiesto per ottenere un decadimento di 10 dB di un suono interrotto bruscamente o di un segnale impulsivo. È calcolato con il metodo della retta di regressione lineare. Il tempo di primo decadimento si dimostra un parametro particolarmente sensibile alla localizzazione del microfono in relazione alla sua distanza dalla sorgente. L'indice EDT, infatti, diminuisce con l'allontanarsi del microfono dalla sorgente e diventa un parametro particolarmente significativo per confrontare diversi punti di una stessa sala.

*Chiarezza*: la chiarezza è un parametro definito dall'espressione:

$$C_{80} = 10 \log \left( \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad [dB] \quad (2.9)$$

$$C_{50} = 10 \log \left( \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad [dB] \quad (2.10)$$

che esprime il rapporto tra l'energia che giunge all'orecchio entro i primi 80 o 50 ms e l'energia che perviene negli istanti successivi, ovvero è il rapporto tra energia diretta unita all'energia delle prime riflessioni ed energia delle successive riflessioni. I valori proposti in letteratura sono:

|                      |                      |
|----------------------|----------------------|
| $-12 < C_{50} < -6$  | comprensione pessima |
| $-6 < C_{50} < +4$   | accettabile          |
| $+4 < C_{50} < +10$  | buona                |
| $+10 < C_{50} < +18$ | ottima.              |
| $-12 < C_{80} < -2$  | musica per organo    |
| $-2 < C_{80} < +2$   | musica sinfonica     |
| $+1 < C_{80} < +3$   | opera                |
| $+6 < C_{80} < +10$  | musica leggera.      |

Anche se il  $C_{80}$  è un parametro legato alla sensazione musicale, quando esso risulta essere maggiore di 3 dB assicura una buona intelligibilità della parola.

*Indice di definizione*: è un parametro espresso come:

$$D = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.11)$$

In tale espressione  $p(t)$  è la pressione sonora, intesa come risposta all'impulso emesso da una sorgente non direttiva, e  $t = 0$  è l'istante in cui il suono diretto giunge nel punto di ricezione. L'indice di definizione è definito come il rapporto tra l'energia che giunge all'ascoltatore entro i primi 50 ms e l'energia di tutto il segnale. Infatti risulta dai numerosi esperimenti svolti che l'energia delle prime riflessioni, sommandosi a quella del suono diretto, contribuisce positivamente alla nitidezza del parlato. Il valore di riferimento proposto in letteratura per questo parametro è, per il parlato,  $D > 0,5$ .

*Tempo centrale ( $t_s$ ):* l'espressione rappresenta il rapporto tra l'energia dell'intero decadimento pesata rispetto al tempo, e l'energia complessiva. Le indagini svolte dimostrano che questo parametro è molto sensibile alla posizione dell'ascoltatore in una sala e che è ben correlato all'intelligibilità percentuale delle sillabe. L'espressione analitica è la seguente:

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad [s] \quad (2.12)$$

Il valore di riferimento proposto in letteratura per il parlato è:

Per la musica:  $50 \leq t_s \leq 250ms$ .

*Lateral fraction ( $L_f$ ):* definito anche come frazione della prima energia laterale, è un parametro che quantifica l'impressione spaziale dato da:

$$L_f = \frac{\sum_{t=5ms}^{t=80ms} r \cos \varphi}{\sum_{t=0}^{t=80ms} r} \quad (2.13)$$

in cui il numeratore rappresenta la somma dell'energia sonora  $r$  associata a ciascuna riflessione che giunge all'ascoltatore nell'intervallo di tempo da 5 a 80ms dopo l'arrivo del suono diretto, e pesata secondo il coseno della angolo  $\varphi$  formato dalla direzione di arrivo della riflessione con la retta passante per gli orecchi dall'ascoltatore (rivolto verso la sorgente). Il denominatore rappresenta l'energia totale compreso il suono diretto che giunge all'ascoltatore nei primi 80ms.

$L_f > 0,1$  buona localizzazione acustica;

$L_f > 0,2$  sensazione di immersione nel campo sonoro.

*Speech Transmission Index (STI):* per intelligibilità del parlato si intende la percentuale di parole o frasi correttamente comprese da un ascoltatore rispetto alla totalità delle frasi pronunciate da un parlatore. Essa dipende, oltre che dai fenomeni ambientali già citati, dalle caratteristiche di emissione della voce umana, in particolare dall'intensità di emissione, variabile secondo lo sforzo vocale del parlatore, dalla composizione in frequenza, dall'andamento temporale e dalla direzionalità, e da altri fattori tra i quali quelli di natura linguistica, la struttura grammaticale della lingua, la semantica e il senso generale del messaggio. Dei molti metodi esistenti, quello scelto per questo lavoro è lo STI, che si applica per valutare l'intelligibilità del parlato con e senza sistemi di amplificazione sonora. La misura si effettua con la sorgente nella posizione dell'oratore e il microfono in corrispondenza della testa dell'ascoltatore. Richiede la generazione

| Classe della qualità della comunicazione | Valore dell'indice STI |
|--|------------------------|
| pessima                                  | < 0,2                  |
| scadente                                 | 0,2-0,4                |
| discreta                                 | 0,4-0,6                |
| buona                                    | 0,6-0,8                |
| eccellente                               | > 0,8                  |

Figura 2.6: Valori dell'indice STI in funzione della qualità della comunicazione

di un segnale di test filtrato per bande di ottava da 125 Hz a 8 kHz, modulato sinusoidalmente in ampiezza, con indice di modulazione pari a 1, secondo 14 frequenze di modulazione. Quello appena descritto in modo semplificato è il metodo di valutazione dello STI in un ambiente esistente. Nel caso in cui si voglia valutare l'intelligibilità in fase di progetto è possibile applicare una procedura per il calcolo della MTF (funzione di trasferimento della modulazione) dalla quale ottenere l'indice STI, valida per ambienti per i quali si possano considerare le approssimazioni dell'acustica statistica. La MTF può essere così calcolata a partire da dati conosciuti di livello del parlato e del rumore di fondo e del tempo di riverberazione. L'indice STI è stato correlato a scale soggettive di intelligibilità, secondo la tabella riportata a pagina seguente.

### **RUMORE DI FONDO:**

Il livello del rumore di fondo deve essere sufficientemente basso in modo da evitare interferenze con le attività in corso nei vari ambienti. Il panorama dei criteri per valutare il rumore di fondo accettabile (e quindi per dimensionare l'isolamento acustico necessario a conseguirlo) è assai articolato.

Il rumore di fondo influisce sull'intelligibilità e pertanto va controllato in relazione all'ottenimento dei valori ottimali degli indici ad essa relativi. Si può ridurre, per esempio, la rumorosità proveniente dall'esterno prevedendo un involucro pesante, muraure fonoisolanti o un doppio involucro; mentre la rumorosità interna proveniente da un impianto di condizionamento sarà poco disturbante se si prevedono sistemi di movimentazione dell'aria opportunamente insonorizzati.

Per quanto riguarda invece l'assenza di rumore in quanto suono non gradito, va detto che la tollerabilità di un individuo dipende da altri fattori, alcuni dei quali variano con le caratteristiche fisiche ed oggettive del rumore, altri invece riguardano il soggetto e sono principalmente di natura psicologica.

L'esigenza di definire un indice di valutazione del disturbo da rumore, ha portato all'assunzione del livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato A,  $L_{Aeq,T}$ , come indice descrittore sintetico della composizione in frequenza e dell'andamento temporale del fenomeno acustico. Esso è l'indice di valutazione assunto per caratterizzare convenzionalmente la risposta al rumore di un individuo medio, a causa della

buona correlazione esistente tra valore dell'indice e disturbo rilevato. Adottando il livello sonoro continuo equivalente, l'effetto disturbante del rumore viene correlato al contributo energetico medio in un intervallo di tempo, piuttosto che all'energia sonora istantanea effettivamente percepita.

Valori di riferimento per i livelli in dB(A) negli ambienti confinati sono fissati dalle normative a seconda della tipologia di rumore presente, in funzione della loro destinazione d'uso. I limiti di riferimento sono definiti su base statistica in relazione a ben precise condizioni ambientali, in modo da riprodurre fedelmente la valutazione soggettiva in situazioni non troppo diverse da quelle considerate.

Poiché due rumori caratterizzati da un uguale valore del livello continuo equivalente espresso in dB(A) possono di fatto produrre un effetto disturbante molto diverso, a questo indice si associano di norma criteri di valutazione che consentono un'analisi più precisa in particolare sulla distribuzione spettrale e temporale dell'energia sonora. Se il rumore, ad esempio, presenta componenti tonali o impulsive, esso è giudicato maggiormente disturbante di un rumore di pari livello continuo equivalente ponderato A privo di tali componenti, e dunque viene penalizzato dall'aggiunta di alcuni decibel sul livello misurato. Se il suo spettro è caratterizzato da livelli di pressione sonora particolarmente elevati nelle bande di bassa o alta frequenza rispetto a quelli nelle altre bande, esso si presenta sbilanciato.

Il metodo utilizzato per la valutazione del rumore, oltre al livello di pressione ponderato A, è quello che utilizza le curve NC (Noise Criterial) o le curve NR (Noise Ratings), che in realtà non differiscono di molto. In questa trattazione si è adoperato il metodo delle curve NR. Si conviene di attribuire al rumore in questione l'indice relativo alla curva di riferimento più bassa, al di sotto della quale resti l'intero spettro sonoro del rumore precedentemente inserito banda per banda. Il fatto che l'indice di valutazione sia determinato essenzialmente dal livello più alto di pressione sonora dello spettro del rumore rende i giudizi di tollerabilità NR più cautelativi di quelli eseguiti con la scala in dB(A). È opportuno, però, mettere in guardia dall'utilizzare i profili NR come criteri progettuali: ottenere infatti che il rumore in un ambiente si adatti alla forma del profilo, rimanendone sempre al di sotto, può dar luogo ad un indice di valutazione accettabile a fronte di un rumore con predominante tonalità bassa, generalmente considerato fastidioso.

I criteri di tollerabilità prescrivono un limite superiore al livello sonoro in dB(A) ovvero all'indice di valutazione NC o NR per le varie utilizzazioni cui sono destinati gli ambienti in esame. Vengono inoltre raccomandate delle correzioni che tengano conto di quelle caratteristiche di durata, di andamento temporale, di rumore di fondo fin qui ignorate. In particolare la tollerabilità è inferiore per rumori impulsivi o costituiti da toni puri prevalenti e per rumori emessi in assenza di rumore di fondo (di notte oppure in zone rurali). Viceversa la tollerabilità è superiore per rumori non continui per tutta la giornata lavorativa ovvero emessi nelle ore diurne e in presenza di rilevante rumore di fondo.

**USO POLIVALENTE.** L'uso singolo di una sala, per un solo tipo di destinazione e fruizione, appare purtroppo sempre meno realistico ed è sempre più frequentemente richiesto lo sforzo di conseguire un certo grado di flessibilità della risposta acustica,

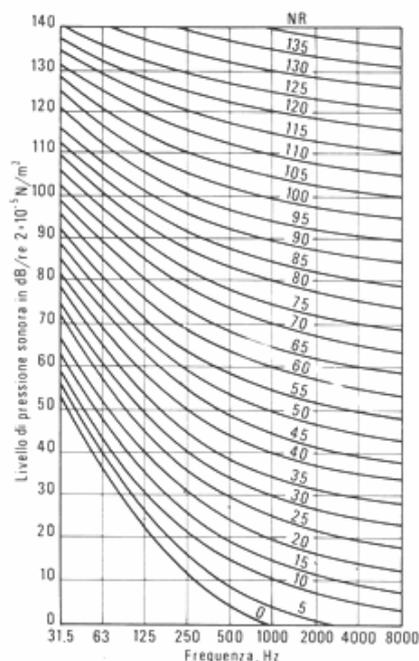


Figura 2.7: Criterio *NR* per la valutazione del rumore di fondo

poiché una sala nata per un certo tipo di attività può risultare acusticamente del tutto insoddisfacente per un'altra. In genere, il modo più efficace per rispondere all'uso diversificato di un ambiente comporta la necessità di intervenire sulle riflessioni ovvero sul tempo di riverberazione. La soluzione più semplice consiste nel dimensionare opportunamente quantità e distribuzione dei materiali e delle strutture assorbenti, ma il controllo del tempo di riverberazione modifica anche il livello di pressione sonora. E' preferibile allora ricorrere ad un'articolazione di interventi/dispositivi modificabili come:

- assorbitori variabili;
- riflettori mobili;
- diffusori variabili;
- volume variabile.

In particolare, quello del volume variabile è l'accorgimento forse più drastico e oneroso, ma non infrequente, specie nelle sale polivalenti, di ultima generazione; in questo caso, ad esempio, possono essere totalmente esclusi interi settori destinati al pubblico, come parti di platea, palchi e balconate.

# Capitolo 3

## STRUMENTI, TECNICHE DI MISURA E SOFTWARE

### 3.1 Tecniche di misura

Il procedimento di misurazione impiegato è il cosiddetto metodo della risposta integrata all'impulso; con questa metodologia si ottengono curve di decadimento mediante integrazione inversa delle risposte all'impulso quadro.

#### 3.1.1 Metodo della risposta integrata all'impulso

La risposta all'impulso da una posizione di sorgente ad una posizione di ricevitore in un ambiente, è una quantità ben definita che può essere misurata direttamente eccitando un volume tramite una sorgente d'impulso, che nello specifico risulta essere un altoparlante omnidirezionale che emette un rumore bianco o rosa. La sorgente deve produrre un livello di pressione sonora sufficiente a generare le curve di decadimento con il minimo campo dinamico richiesto senza alcuna contaminazione da parte del rumore di fondo. La durata dell'eccitazione deve essere sufficiente per permettere al campo sonoro di raggiungere uno stato stazionario nel locale oggetto di misura prima di decadere. Si possono utilizzare degli speciali segnali sonori che forniscano una risposta all'impulso solo dopo una particolare elaborazione del segnale di microfono registrato. Ciò può fornire un migliorato rapporto segnale/rumore.

Per le misurazioni in bande di ottava, la larghezza di banda del segnale deve essere maggiore di un'ottava e per le misurazioni in bande di terzo d'ottava la larghezza di banda del segnale deve essere maggiore di terzo di ottava. Lo spettro deve essere ragionevolmente piatto nell'ambito dell'effettiva banda di ottava da misurare.

Le misurazioni del tempo di riverberazione e degli altri parametri sono state effettuate con ambiente vuoto, a luci accese, con temperatura interna dell'ambiente che oscillava intorno ai 18°C e umidità relativa pari a circa il 64%; il segnale prodotto dalla sorgente è una sweepata logaritmica, cioè un particolare tipo di segnale che riproduce una ad una tutte le frequenze; la durata dell'eccitazione da parte della sorgente varia a seconda delle condizioni e caratteristiche dell'ambiente in cui si effettua la misura.

### 3.1.2 Strumentazione di misura

Per il metodo della risposta integrata all'impulso e la valutazione dei risultati ottenuti sono stati impiegati:

- Sorgente dodecaedrica omnidirezionale montata su un treppiede mod. 4296, *Bruel Kjaer*
- Amplificatore di potenza LAB300
- Microfoni per il campo libero, montati su treppiede mod. 4189 da  $\frac{1}{2}$ , *Bruel Kjaer*
- Condizionatore di segnale 01dB OPUS (S/N 20225)
- Computer portatile IBM (LABACUS - Dip. Fisica Tecnica) equipaggiato di software DIRAC
- Testa artificiale 4100D, *Bruel Kjaer*

Il microfono prepolarizzato, ha una sensibilità di  $-25,65$  re  $1\text{V/Pa}$ , equivalenti a  $52,15$   $\text{mV/Pa}$  ed una capacità di  $13,3$   $\text{pF}$  a  $250$  Hz. Quando si effettuano misurazioni in un auditorio, l'altezza dei canali auricolari della testa di prova dovrebbe essere di circa  $1,2$  m al di sopra del pavimento. Il computer portatile è dotato di software DIRAC, dal quale si possono gestire tutte le fasi della misura e che fornisce le curve di decadimento, i dati di output e da cui è possibile ricavare i file di tipo Audio Wave del decadimento. La sorgente sonora, posizionata per mezzo di un treppiede regolabile, è il modello OmniPower LoudSpeaker 4296 della Bruel Kjaer collegata con un cavo elettrico di alimentazione ad un amplificatore di segnale modello 2716, connesso a sua volta con il computer portatile.

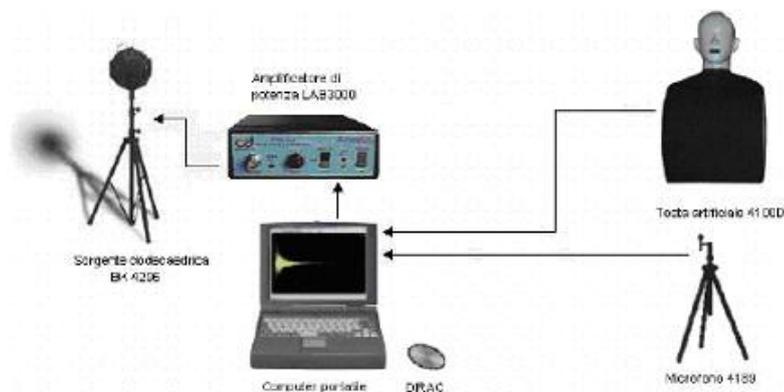


Figura 3.1: Strumenti utilizzati durante le misurazioni

La catena strumentale, ovvero il microfono e l'insieme della strumentazione e relativi canali di connessione, è stata tarata nella camera riverberante del Laboratorio

di Acustica LABACUS presso il Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università di Padova.

### 3.2 Software utilizzati: DIRAC

Il software DIRAC, distribuito dalla Bruel Kjør, è usato per misurare un grande numero di parametri acustici. Basato sulla misura e l'analisi della risposta all'impulso, DIRAC supporta differenti possibili configurazioni di misura.

Per misure accurate, in accordo con gli standard della UNI EN ISO 3382 [?], è possibile utilizzare sia il generatore interno MLS (Maximum Length Sequence) sia un segnale sweep emesso attraverso una sorgente sonora costituita da un altoparlante omnidirezionale. Rilievi meno approfonditi possono essere condotti facilmente utilizzando una piccola sorgente sonora impulsiva come ad esempio una pistola caricata a salve o un pallone.

Per quanto riguarda le misure relative all'intelligibilità del parlato, queste possono essere compiute, in conformità con gli standard della ICE 60268-16, per voce maschile o femminile, sia attraverso una sorgente che dia la stessa direzionalità della bocca, sia con una iniezione diretta in un impianto sonoro, tenendo conto dell'influenza del rumore di fondo.

Tipologie di impiego:

- Misura delle caratteristiche acustiche dei luoghi chiusi;
- Misura dell'intelligibilità del parlato di un sistema sonoro;
- Caratterizzazione dell'acustica di uno spazio chiuso prima e dopo una modificazione;
- Confronto delle qualità acustiche di ambienti differenti;
- Modellazione acustica utilizzando misure rilevate da un modello in scala;
- Ricerca e istruzione in campo acustico;
- Sistemazione dell'acustica degli ambienti.

Caratteristiche Tecniche:

- Conformità agli standard imposti dalle norme: ISO 3382 (acustica delle sale di ascolto); IEC 60268-16 (intelligibilità del parlato);
- Misure di innumerevoli parametri, quali: tempo di riverberazione, spazialità, ecc.;
- Doppio Input;
- Facilità di impiego;
- Controllo della risposta all'impulso;
- Compatibilità con svariati tipi di sorgenti e ricevitori;
- Accurate misure dei brevi tempi di riverberazione grazie alla tecnica del filtraggio inverso;
- Molteplici tempi e/o frequenze rilevati dalla risposta all'impulso;
- Calcoli statistici (media, deviazione standard, min-max);
- Compatibile con misure effettuate su modelli in scala;
- Esame della scheda sonora.

Per investigare sulle caratteristiche acustiche di una sala, è possibile battere le mani ed ascoltarne la risposta. Benché non sia facile descrivere accuratamente ciò che si sente, questo metodo, seppur poco scientifico, permette ad un orecchio attento ed allenato di capire se la musica sarà piacevole oppure se il parlato sarà intelligibile, e si pone alla base del meccanismo di funzionamento di DIRAC, che ricava le caratteristiche acustiche attraverso l'elaborazione dei dati raccolti in risposta ad un impulso emesso.

L'impulso è infinitamente breve ed ha energia unitaria. La risposta di un sistema all'impulso contiene tutte le informazioni del sistema e proprio per questo è conveniente per analisi ed immagazzinamento di dati. DIRAC misura e salva le risposte all'impulso e calcola i parametri acustici dalle risposte all'impulso stesse.

Attraverso la deconvoluzione, può anche calcolare la risposta all'impulso usando altri segnali eccitanti, permettendo in tal modo l'uso di altoparlanti come sorgente sonora. Queste sorgenti danno migliori direttività, spettro di frequenza e riproducibilità rispetto alla sorgente impulsiva, ma possono sorgere difficoltà per le limitate possibilità di produzione di impulsi ad alto contenuto energetico e di elevata potenza. Esempi di segnali eccitanti non impulsivi sono: il segnale MLS (Maximum Length Sequence), lo sweep, rumore bianco e rumore rosa.

### 3.3 Posizioni di misura

Le misurazioni dei parametri acustici oggetto di studio sono state eseguite seguendo le prescrizioni fornite dalla norma UNI EN ISO 3382/2001 Misurazioni del tempo di riverberazione di ambienti con riferimento ad altri parametri acustici.

Dato che una misurazione può essere richiesta per vari scopi, il numero delle posizioni di misura è scelto per conseguire un'adeguata copertura nell'ambiente.

Le posizioni dei microfoni devono essere distanti almeno metà lunghezza d'onda, cioè una distanza minima di circa 2 m per il campo di frequenza comune. La distanza tra ogni postazione microfonica e la più vicina superficie di riflessione, compreso il pavimento, deve essere almeno un quarto di lunghezza d'onda, cioè generalmente circa 1 m. Nessuna postazione microfonica deve essere troppo vicina ad una posizione di sorgente per evitare un'influenza troppo forte da parte del suono diretto. La distanza minima in metri può essere calcolata da:

$$d_{\min} = 2\sqrt{\frac{V}{cT}}$$

dove:

V è il volume in metri cubi;

c è la velocità del suono, in metri al secondo;

T è una stima del previsto tempo di riverberazione, in secondi.

La sorgente sonora ed i microfoni sono disposti in modo da caratterizzare le condizioni acustiche per il pubblico e per gli orchestrali o i singoli musicisti presenti nel palcoscenico.

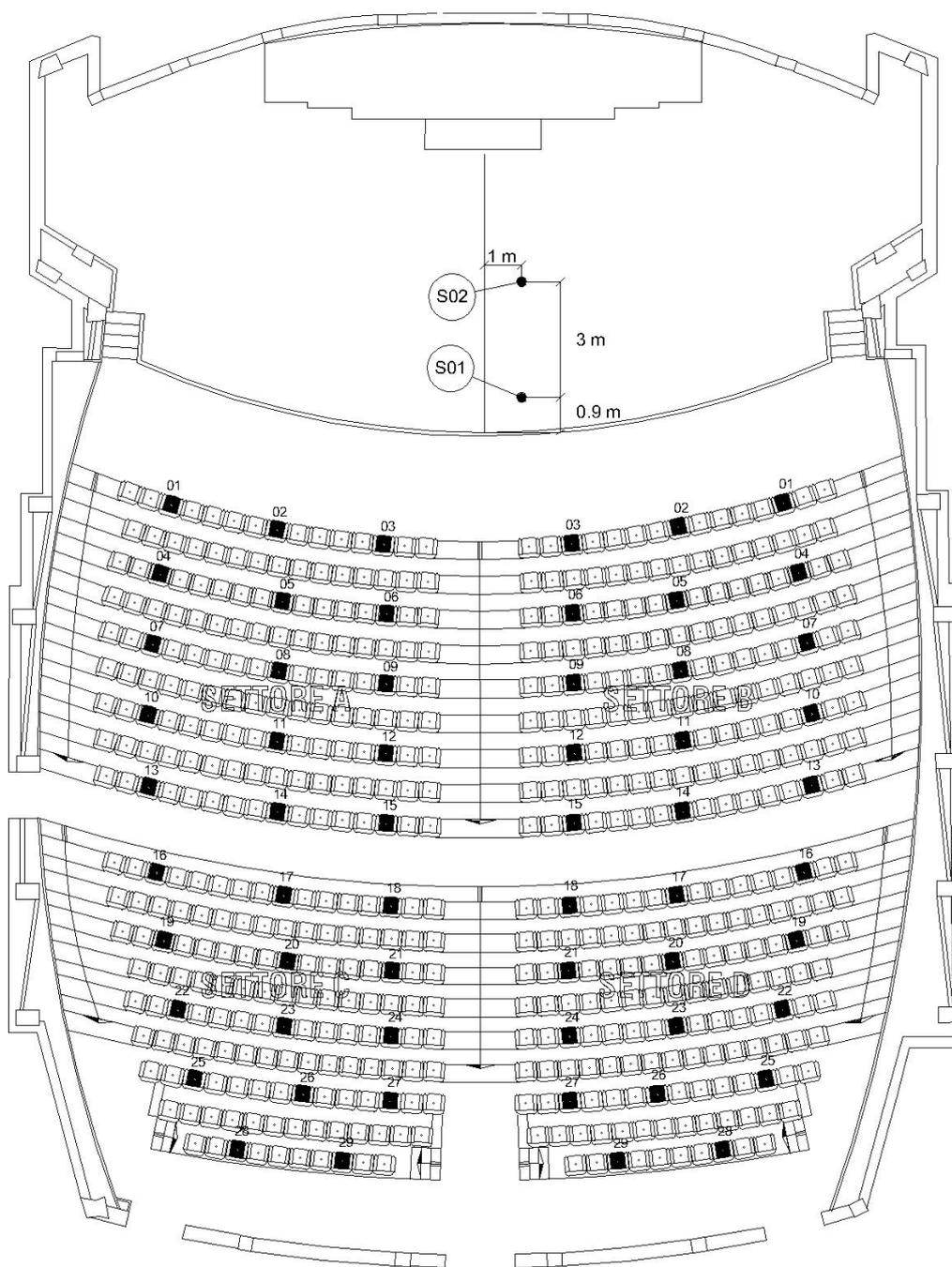


Figura 3.2: Posizioni dei microfoni in platea e relative sorgenti sul palcoscenico

Sono state eseguite due campagne di misurazioni: la prima il 16 Aprile 2007 per studiare l'acustica in platea, la seconda il 10 Marzo 2008 per effettuare le misure sul palcoscenico.

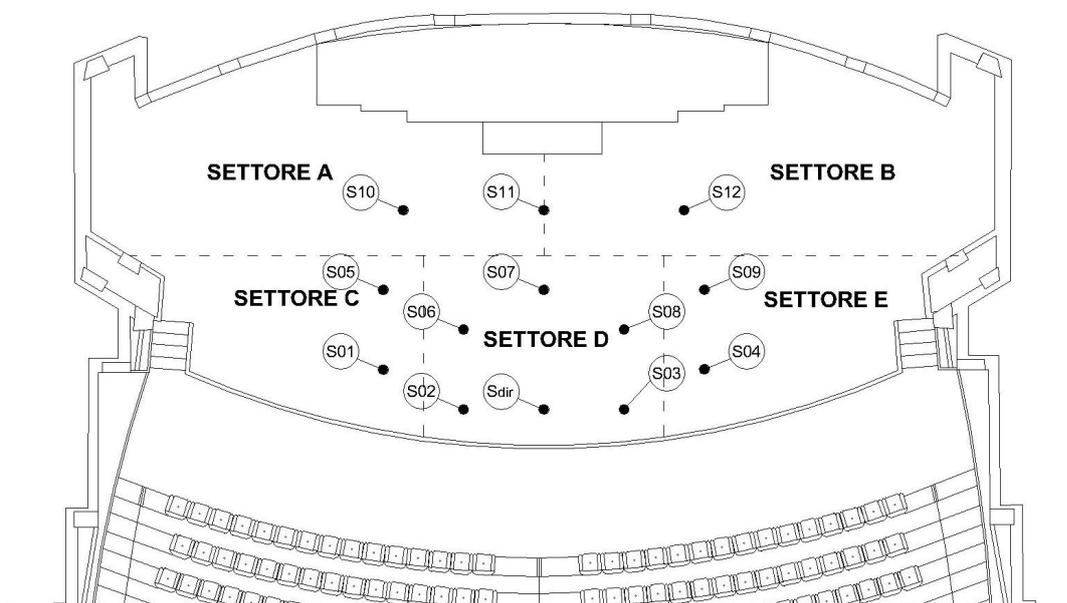


Figura 3.3: Posizioni della sorgente e dei microfoni sul palcoscenico

### 3.3.1 Prima campagna di misure

Nel primo caso le condizioni ambientali erano le seguenti: temperatura interna dell'ambiente intorno ai 22°C e umidità relativa pari a circa il 42%. La sessione è stata suddivisa in due parti posizionando la sorgente in altrettante posizioni: una posta nel palcoscenico a 0,9 m dal fronte ed un'altra con la sorgente sempre nel palcoscenico ma ad 3,90 m dal fronte. Entrambe le posizioni erano spostate di 1 metro rispetto all'asse longitudinale della sala.

I microfoni e la testa artificiale invece sono stati posizionati in tre punti per fila, una fila sì e una no, settore per settore. I punti di misura e le localizzazioni delle sorgenti sono visibili in figura 3.2.

### 3.3.2 Seconda campagna di misure

Nel secondo caso le condizioni ambientali erano le seguenti: temperatura interna dell'ambiente intorno ai 18°C e umidità relativa pari a circa il 50%. Sul palcoscenico sono state individuate tredici posizioni sorgenti, per ognuna sono state effettuate quattro misure (davanti, dietro e ai lati) con i microfoni posti alla stessa altezza e alla distanza di 1 metro dalla sorgente stessa. Questo per misurare i parametri Support (Figure: 3.9, 3.10). I punti sono stati decisi in modo tale da coprire tutte le sezioni dell'orchestra. Come visibile in figura 3.3, i punti 01, 02, 05, 06 sono posizionati sulla tradizionale localizzazione dei violini, il punto 07 delle viole, i punti 03, 04, 08, 09 su una delle

possibili posizioni dei violoncelli e dei contrabbassi, i punti 10, 11, 12 sulla localizzazione della sezione dei fiati. Inoltre sono state fatte delle misure con la sorgente in posizione 01, 02, 10 e i ricevitori nei punti 04, 12 per il tempo di riverberazione e l'EDT.



Figura 3.4: Posizionamento dei microfoni in sala



Figura 3.5: Posizionamento dei microfoni in sala



Figura 3.6: Strumentazione acustica sul palcoscenico



Figura 3.7: Strumentazione acustica sul palcoscenico

## Capitolo 4

# ELABORAZIONE MISURE ACUSTICHE OGGETTIVE

In seguito alle misurazioni effettuate, sono stati elaborati i dati rilevati con dei fogli di calcolo excel. Si sono così ottenuti dei grafici riguardanti i quattro settori della platea. Si riportano di seguito i grafici dei diversi parametri analizzati. Come già mostrato nel capitolo precedente  $S_{01}$  sta ad indicare la sorgente posta a 0,9 m dal fronte del palcoscenico mentre  $S_{02}$  indica la sorgente posta a 3,9 m dal fronte.

### 4.1 Chiarezza a 80 ms, $C_{80}$

La chiarezza musicale è un parametro che esprime il rapporto tra l'energia che giunge all'orecchio entro i primi 80 ms e l'energia che perviene negli istanti successivi, ovvero è il rapporto tra energia diretta unita all'energia delle prime riflessioni ed energia delle successive riflessioni. Secondo alcuni autori il  $C_{80}$  è in grado di tenere conto degli attributi Trasparenza temporale e Trasparenza armonica. Il primo si riferisce alla possibilità di percepire nitidamente note suonate in successione rapidamente, mentre il secondo attiene alla percezione chiara di note suonate contemporaneamente da uno o più strumenti musicali.

#### 4.1.1 Sorgente 01

##### Settore A

Il parametro mostra una distribuzione in frequenza di tipo a farfalla, con maggior dispersione dei dati alle basse e alle alte frequenze. In media presenta un andamento in frequenza (Figura 4.1) dapprima leggermente decrescente alle basse frequenze, poi crescente in maniera continua, con pendenza sempre maggiore man mano che si va verso le alte frequenze. Il valore medio fra tutte le posizioni e le frequenze si attesta su 2,95 dB con un minimo dell'andamento medio fra le sole posizioni a 160 Hz pari a -0,13 dB e un massimo a 10 kHz pari a 10,29 dB. È interessante notare che le file più vicine al palco hanno, per esempio (Figura 4.5) nel punto di misura 03, valori superiori all'andamento medio, mentre le file più distanti generalmente danno valori inferiori a

tale andamento. E' sicuramente rilevante anche che i valori nei punti di misura vicini alla parete laterale (posizioni 01, 04, 07, 10, 13) risultano più alti. Si può inoltre evidenziare che i punti di misura più vicini alla sorgente danno risultati con variabilità maggiore rispetto ai valori medi in base alla frequenza nei confronti dei punti più lontani.

### **Settore B**

Il parametro (Figura 4.2) mostra un andamento molto simile in media a quello del settore A con un minimo della media fra i punti di misura ancora a 160 Hz pari a 0,53 dB e un massimo a 10 kHz pari a 9,95 dB. Il valore medio fra tutti i punti e tutte le frequenze è 3,10 dB. Si può notare anche qui l'andamento dei valori che diminuiscono in media (Figura 4.6) e in fluttuazione dalla media all'allontanarsi dalla sorgente. Anche in questo settore è bene evidenziare che i punti vicini alla parete (posizioni 01, 04, 07, 10, 13), oltre a quelli più vicini alla sorgente (punto 03) hanno un valore più alto rispetto alla media nel settore del parametro in considerazione.

### **Settore C**

Il parametro mostra un andamento diverso dai settori precedenti (Figura 4.3): innanzitutto è evidente una minor dispersione dei dati, inoltre non è più presente la sua diminuzione alle basse frequenze. Il valore medio infatti cresce da un minimo di -2,50 dB a 100 Hz ad un massimo di 7,13 dB a 10 kHz con pendenza sempre maggiore. Il valore medio totale è di 1,56 dB, più basso rispetto agli altri settori, a conferma dell'atteso risultato del diminuire del valore del parametro all'allontanarsi dalla sorgente. E' interessante da notare invece una maggiore uniformità della medie fra i vari punti di misura (Figura 4.7) e una minor fluttuazione dei valori rispetto all'andamento medio alle varie frequenze, i valori misurati risultano quindi più uniformi nel settore sia per quanto riguarda l'andamento in frequenza che per la media fra le frequenze. Si possono comunque notare valori del parametro mediamente più alti in prossimità delle pareti laterali della sala (posizioni 16, 19, 22) nonché della parete di fondo (posizione da 25 a 29).

### **Settore D**

L'andamento del parametro in media è simile al settore C con valori non troppo dispersi (Figura 4.4), eccezion fatta per le basse frequenze. In questo caso il minimo dell'andamento del valor medio si presenta però a 125 Hz pari a -2,27 dB e il massimo a 10 kHz pari a 7,67 dB. Il valor medio totale si attesta su 1,80 dB, comunque più basso rispetto ai settori A e B. E' importante notare che anche in questo caso (Figura 4.8) la vicinanza dei punti di misura alle pareti laterali (posizioni 16,19,22) e alla parete di fondo (posizione da 25 a 29) porta un aumento del valore rispetto agli altri punti del medesimo settore.

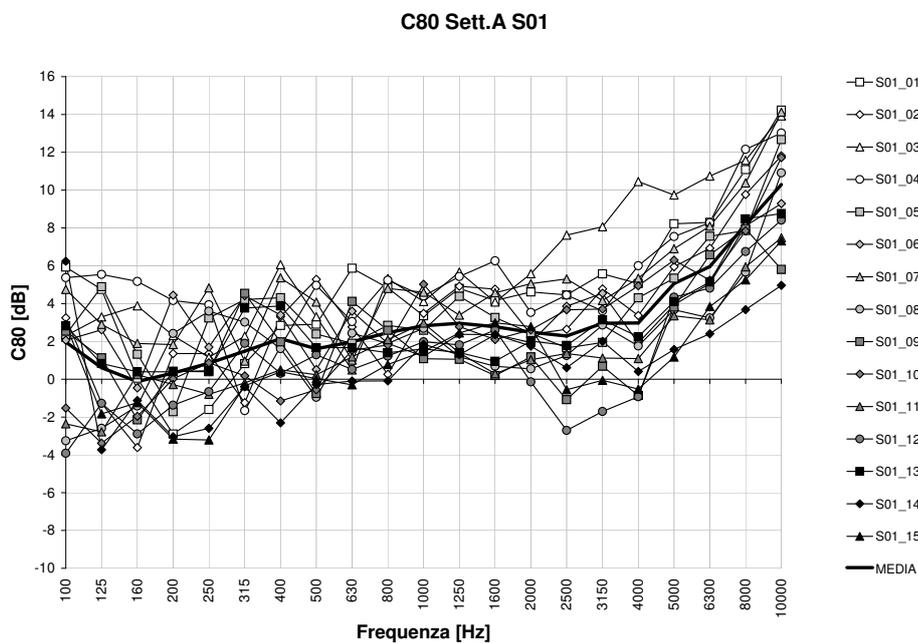


Figura 4.1:  $C_{80}$  analisi in frequenza settore A sorgente 01

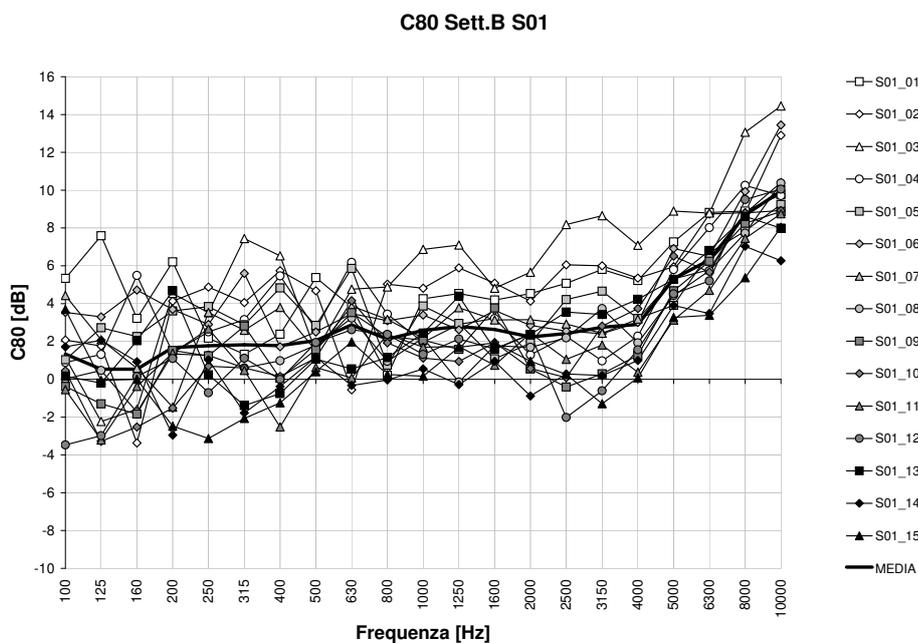
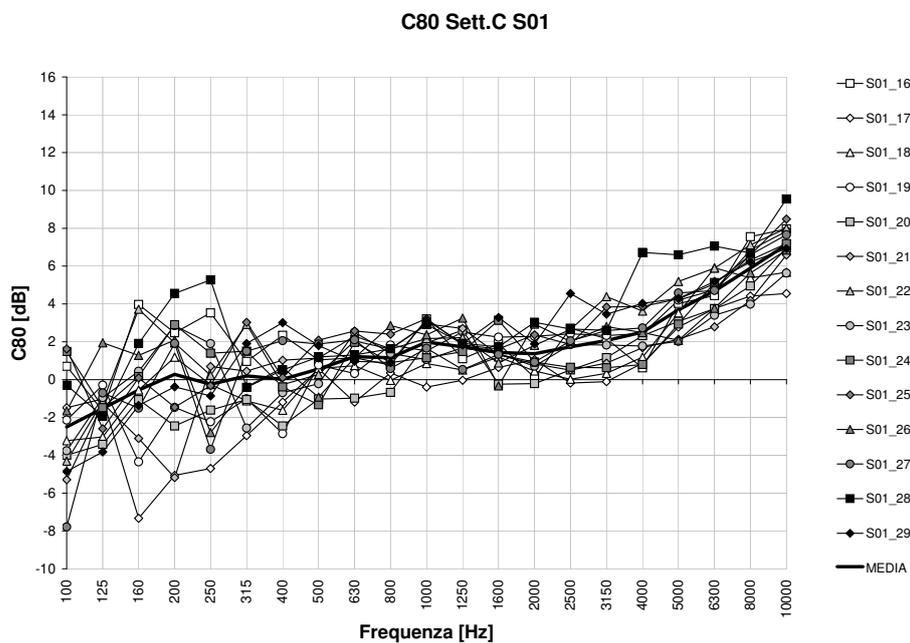
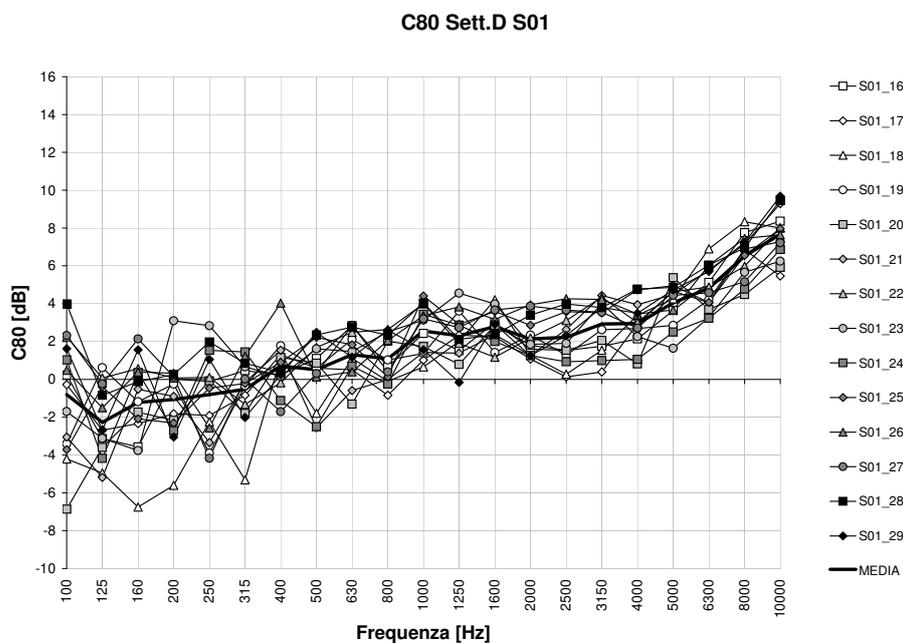


Figura 4.2:  $C_{80}$  analisi in frequenza settore B sorgente 01

Figura 4.3:  $C_{80}$  analisi in frequenza settore C sorgente 01Figura 4.4:  $C_{80}$  analisi in frequenza settore D sorgente 01

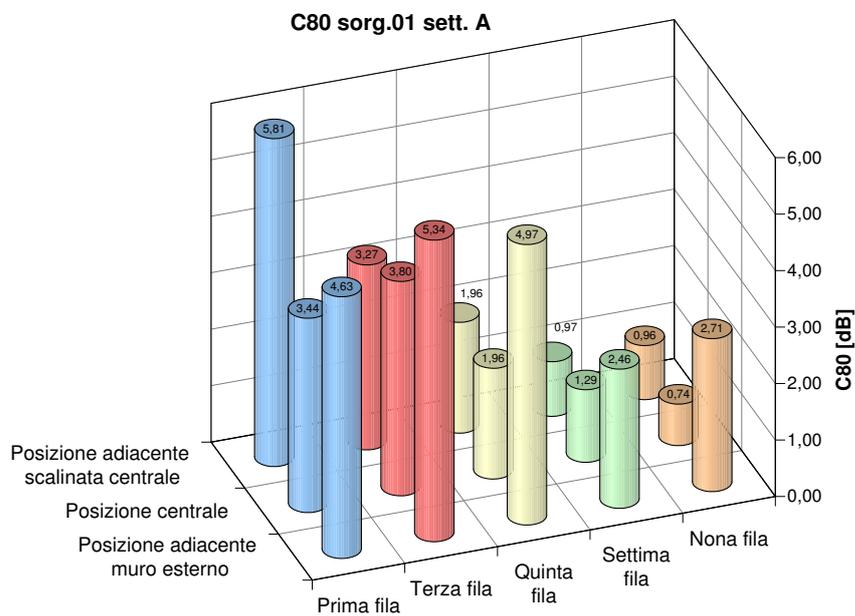


Figura 4.5:  $C_{80}$  media nei punti settore A sorgente 01

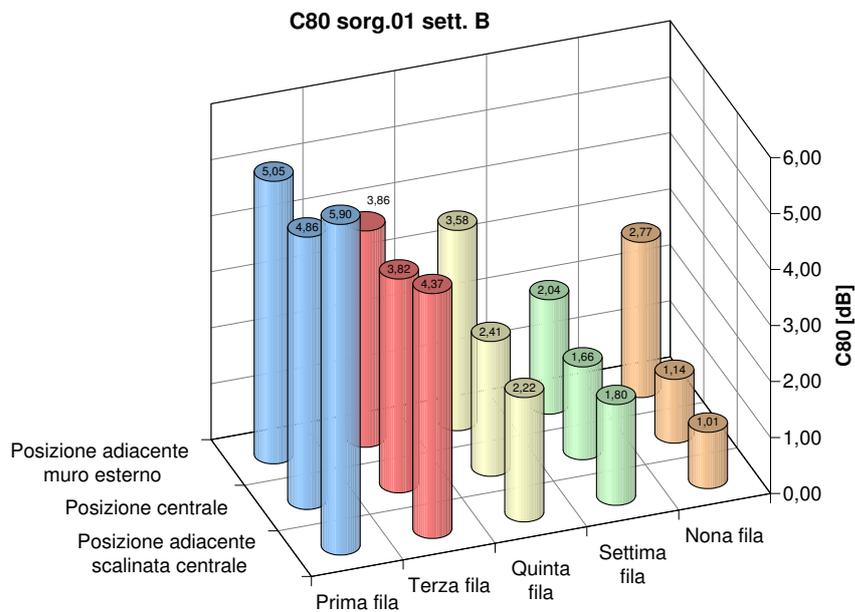


Figura 4.6:  $C_{80}$  media nei punti settore B sorgente 01

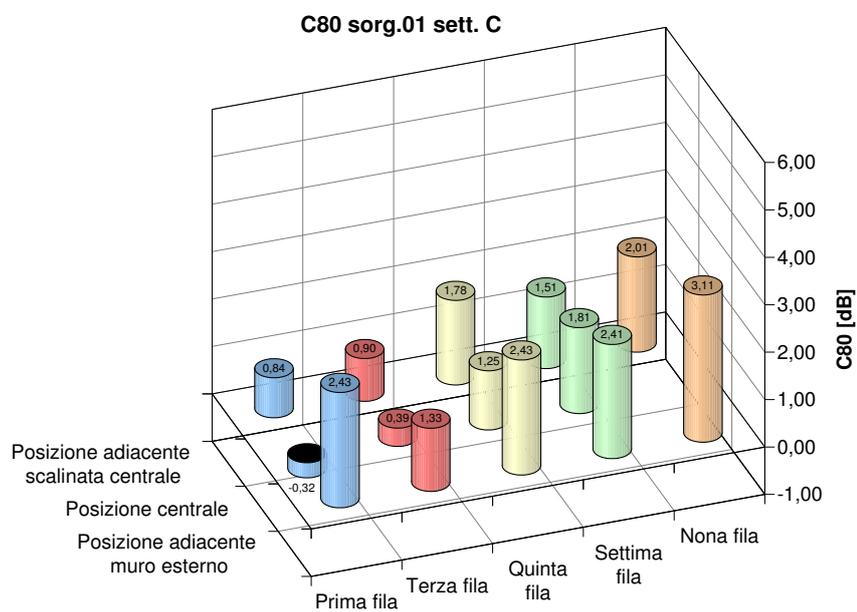


Figura 4.7:  $C_{80}$  media nei punti settore C sorgente 01

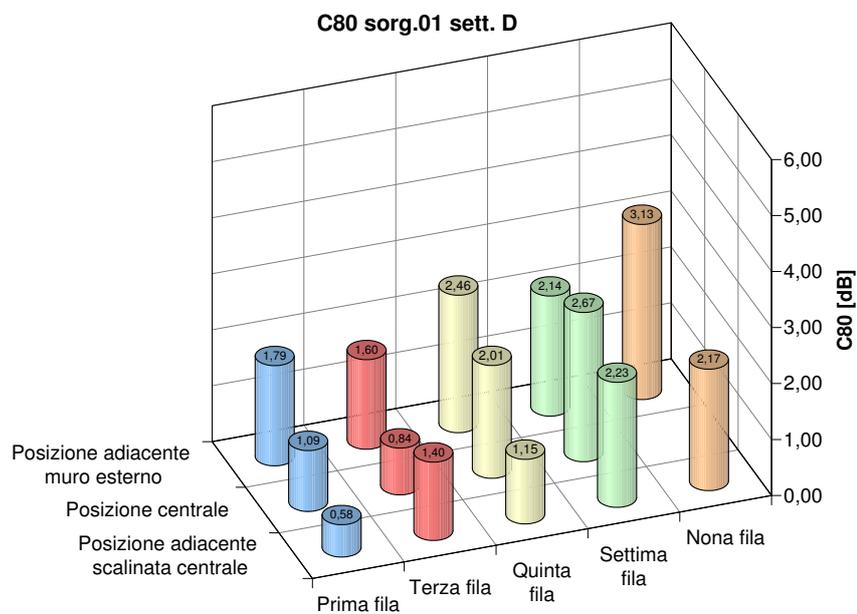


Figura 4.8:  $C_{80}$  media nei punti settore D sorgente 01

## 4.1.2 Sorgente 02

### Settore A

Il parametro mostra in media (Figura 4.9) un andamento dapprima leggermente decrescente alle basse frequenze, poi crescente in maniera continua, con pendenza sempre maggiore man mano che si va verso le alte frequenze. Il valore medio fra tutte le posizioni e le frequenze si attesta su 2,36 dB con un minimo dell'andamento medio fra le sole posizioni a 200 Hz pari a -1,75 dB e un massimo a 10 kHz pari a 10,68 dB. E' interessante notare che le file più vicine al palco hanno, come si può notare dal grafico di figura 4.13, valori solo leggermente superiori all'andamento medio, mentre le file più distanti generalmente danno valori inferiori a tale andamento. E' sicuramente da notare anche che i valori nei punti di misura vicini alla parete laterale (posizioni 01,04,07,10,13) risultano molto più alti rispetto al resto del settore. Si può inoltre evidenziare che la variabilità dei valori rispetto all'andamento medio è molto più marcata alle basse frequenze che non alle alte.

### Settore B

Il parametro (Figura 4.10) mostra un andamento molto simile in media a quello del settore A con andamento in generale crescente anche se vi sono continue oscillazioni fra le frequenze centrali di banda. Il minimo della media fra i punti di misura è ancora a 200 Hz pari a -1,32 dB e un massimo a 10 kHz pari a 10,94 dB. Il valore medio fra tutti i punti e tutte le frequenze è 2,68 dB. Si può notare anche qui (Figura 4.14) l'andamento dei valori che diminuiscono leggermente in media e in fluttuazione dalla media all'allontanarsi dalla sorgente. Anche in questo settore è bene evidenziare che i punti vicini alla parete (posizioni 01,04,07,10,13) hanno un valore notevolmente più alto rispetto alla media nel settore del parametro in considerazione.

### Settore C

Il parametro (Figura 4.11) mostra un andamento diverso dai settori precedenti, non è più presente la sua diminuzione alle basse frequenze. Infatti il valore medio cresce da un minimo di -1,35 dB a 100 Hz ad un massimo di 10,17 dB a 10 kHz con pendenza sempre maggiore. Il valore medio totale è di 2,49 dB, in linea con la media degli altri settori. E' interessante da notare invece una maggiore uniformità della medie fra i vari punti di misura (Figura 4.15) e una minor fluttuazione dei valori rispetto all'andamento medio alle varie frequenze. Si può notare inoltre valori del parametro mediamente più alti in prossimità della parete di fondo (posizione da 25 a 29). E' molto meno importante invece l'effetto della parete laterale eccezion fatta per il punto 16 che segue l'andamento evidenziato nel settore A con un valore maggiore di quello tipico della fila.

## Settore D

L'andamento del parametro ha un comportamento sostanzialmente simile al settore C con valori non troppo dispersi dalla media (Figura 4.12). In questo caso il minimo dell'andamento del valor medio si presenta però a 125 Hz pari a -2,27 dB e il massimo a 10 kHz pari a 7,67 dB. Il valor medio totale si attesta su 1,80 dB, comunque più basso rispetto ai settori A e B. Risulta invece particolare e difforme dal resto della sala l'andamento non crescente della media nelle bande di frequenza centrate sui 2000, 2500 Hz. E' importante notare che anche in questo caso (Figura 4.16) la vicinanza dei punti di misura alla parete di fondo (posizione da 25 a 29) porta ad un aumento del valore rispetto agli altri punti del medesimo settore. Come nel settore C non è riscontrabile se non nel punto 16 un aumento del valore del parametro in vicinanza delle pareti laterali.

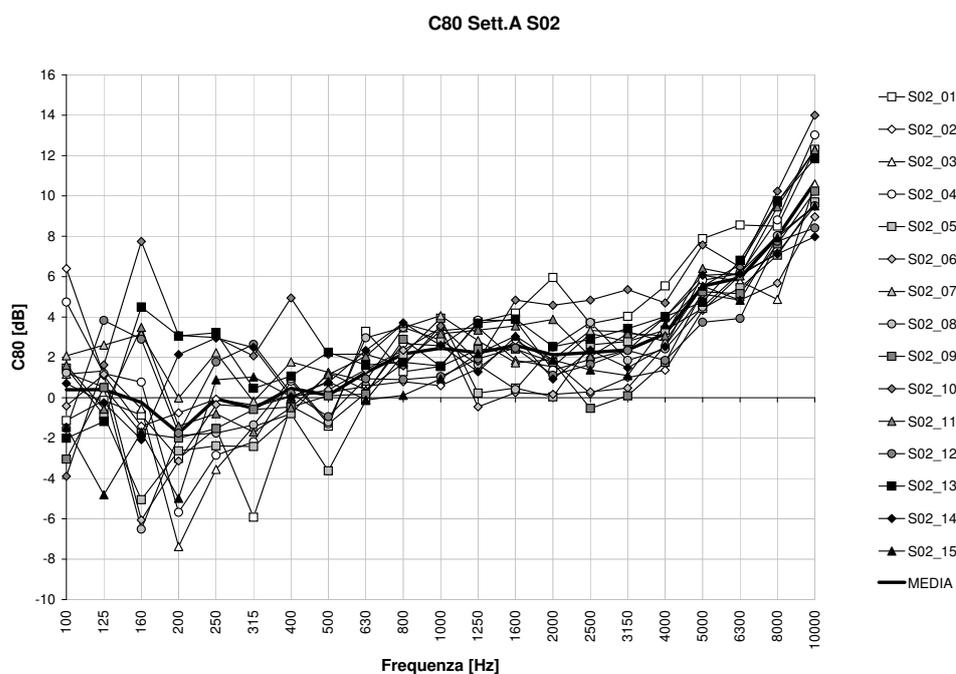


Figura 4.9:  $C_{80}$  analisi in frequenza settore A sorgente 02

### 4.1.3 Analisi dei valori

#### Confronto fra il comportamento della sala con le sorgenti in posizione 01 e 02

La differenza fondamentale di comportamento è la maggior uniformità in sala del valore del parametro  $C_{80}$  con la sorgente in posizione 02 ovvero più arretrato rispetto alla platea. E' infatti meno vistosa la diminuzione del parametro all'aumentare della distanza dalla sorgente. Ciò è molto visibile in primo luogo dalle medie dei vari settori che danno valori nei settori C e D differenti di un'unità spostando la sorgente e

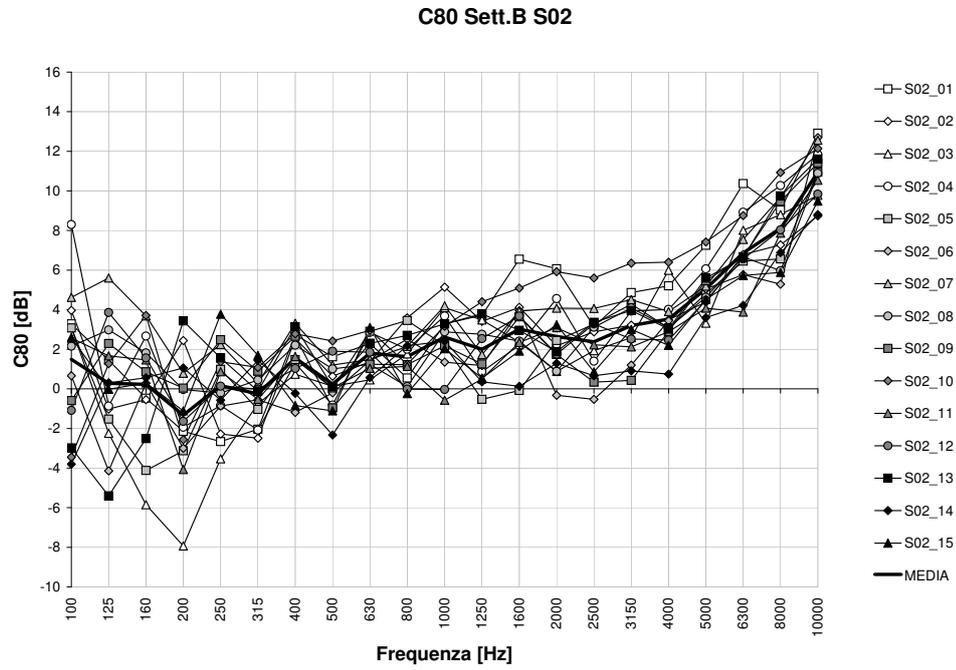


Figura 4.10:  $C_{80}$  analisi in frequenza settore B sorgente 02

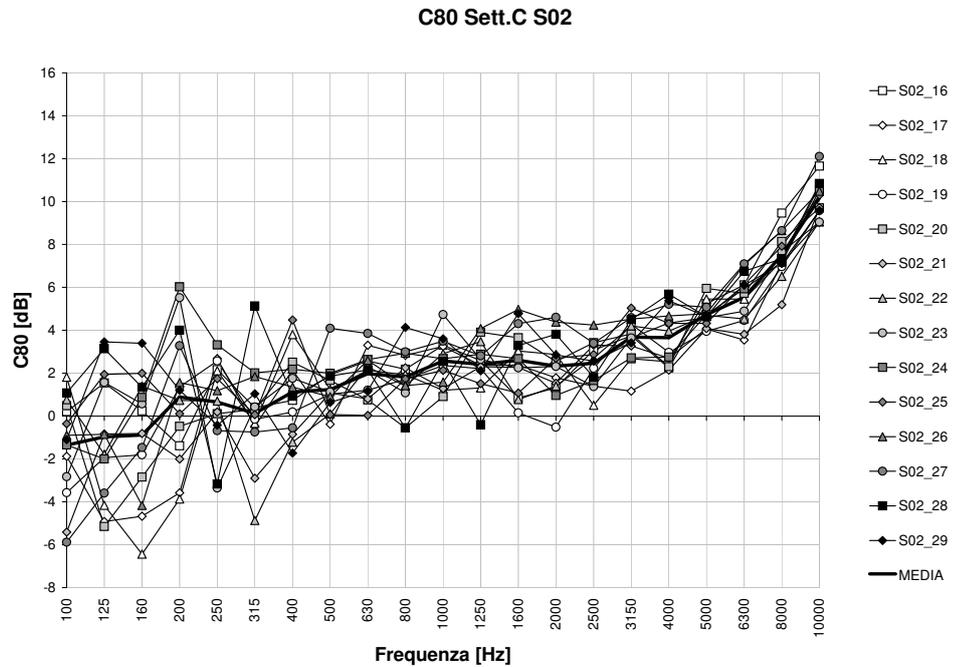


Figura 4.11:  $C_{80}$  analisi in frequenza settore C sorgente 02

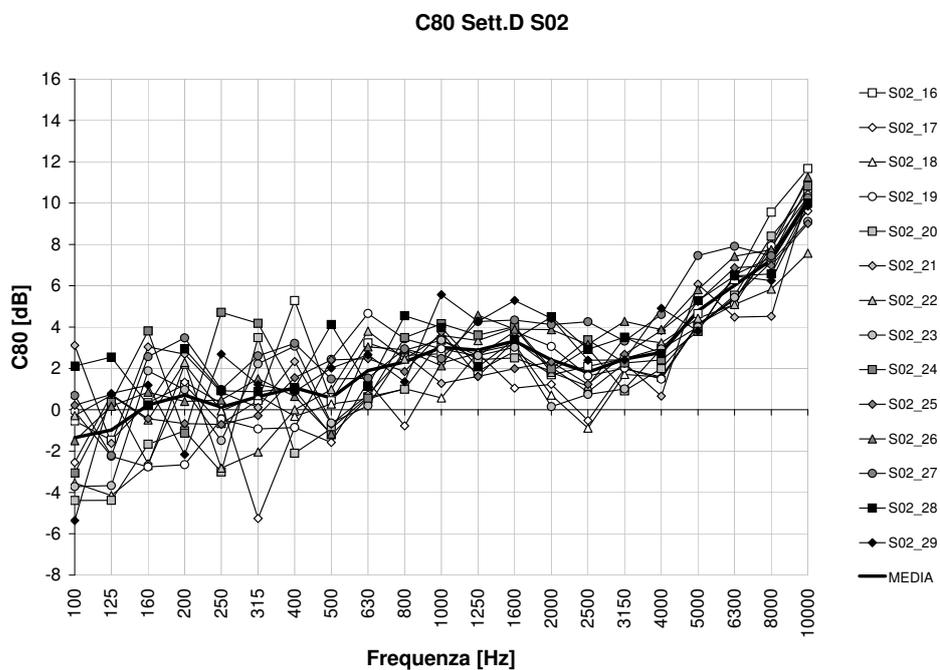


Figura 4.12:  $C_{80}$  analisi in frequenza settore D sorgente 02

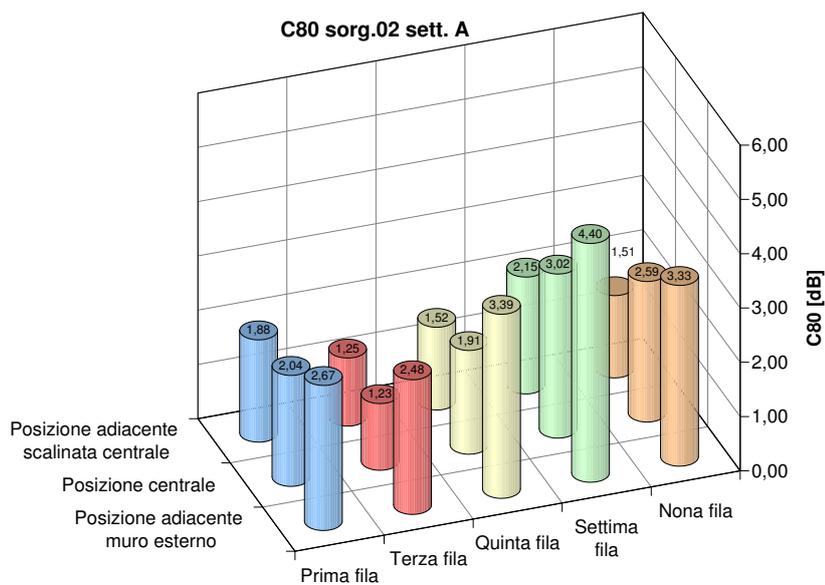


Figura 4.13:  $C_{80}$  media nei punti settore A sorgente 02

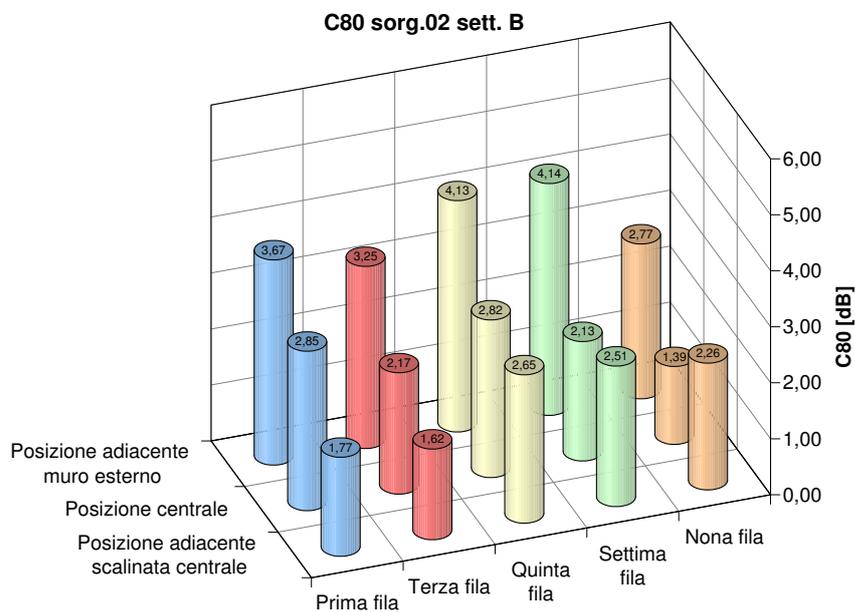


Figura 4.14:  $C_{80}$  media nei punti settore B sorgente 02

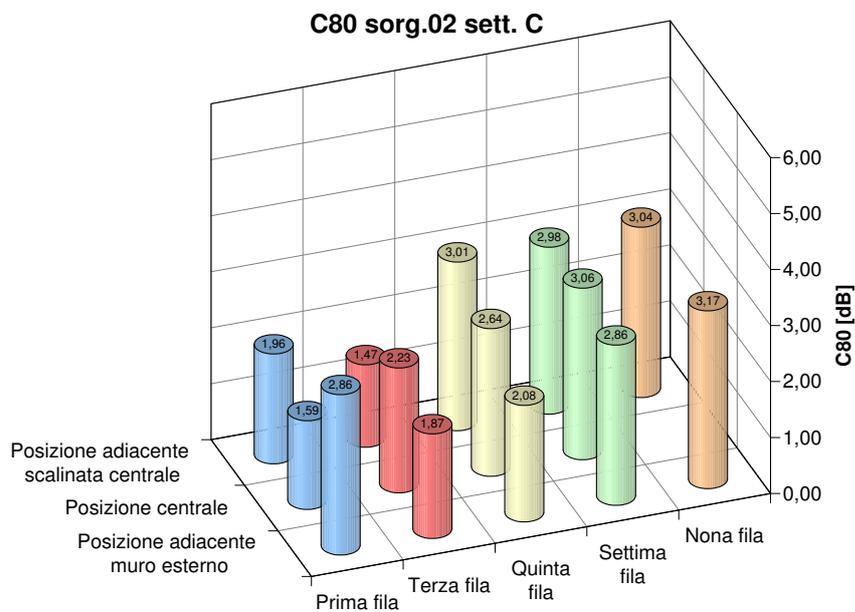


Figura 4.15:  $C_{80}$  media nei punti settore C sorgente 02

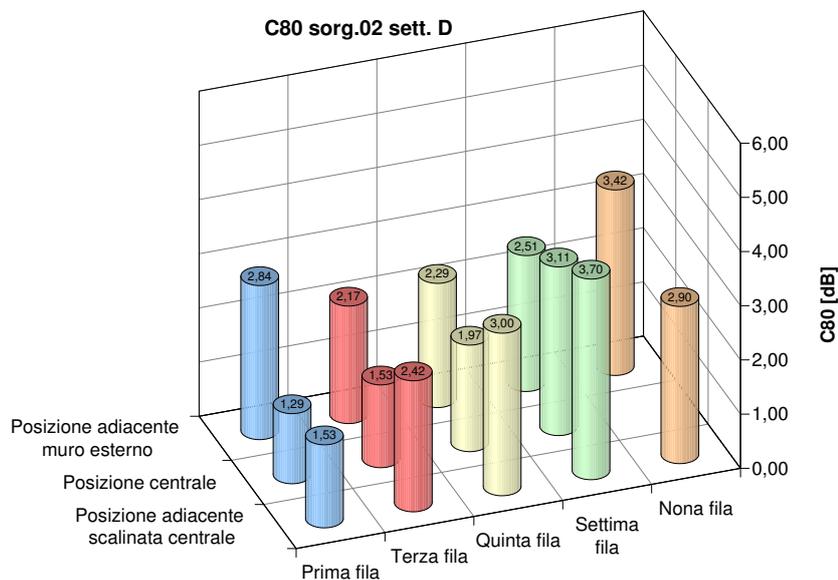


Figura 4.16:  $C_{80}$  media nei punti settore D sorgente 02

in secondo luogo dal comportamento della prima fila dei settori A e B: alla posizione 01 della sorgente corrispondono infatti valori molto più alti della rimanente parte dei settori, mentre con la sorgente in posizione 02 ciò non si verifica. E' minore anche la fluttuazione dei valori dell'andamento in frequenza dei vari punti di misura rispetto all'andamento in frequenza della media nei rispettivi settori.

### Confronto con i valori di letteratura

Poichè i valori medi risultano generalmente compresi fra 1 e 3 dB, il parametro è da considerarsi adeguato per l'ascolto di musica da camera (range di letteratura  $(-2 < C_{80} < 6dB)$ ), sinfonica  $(-2 < C_{80} < 6dB)$  e d'opera  $(1 < C_{80} < 3dB)$ . Non è invece assolutamente buono nè per la prosa  $(C_{80} > 3dB)$  nè per la musica d'organo  $(-12 < C_{80} < -2dB)$ .

## 4.2 Definizione, $D_{50}$

L'indice di definizione è un altro parametro che consente di definire il grado di nitidezza del segnale percepito dall'ascoltatore. E' definito come il rapporto tra l'energia che giunge all'ascoltatore entro i primi 50 ms e l'energia di tutto il segnale. Secondo studi condotti da Haas è emerso che l'energia delle prime riflessioni, sommandosi a quella del suono diretto, contribuisce positivamente alla nitidezza del parlato.

### 4.2.1 Sorgente 01

#### Settore A

Il parametro in esame mostra un andamento medio crescente con la frequenza (Figura 4.17), eccezion fatta per alcune bande che hanno andamento decrescente (bande centrate su 500, 1250, 2000, 2500, 4000 Hz). Il valore medio minimo è a 125 Hz ed è pari a 0,37, il valore medio massimo è a 10 kHz pari a 0,82. La media totale invece è pari a 0,53. I valori risultano parecchio dispersi rispetto all'andamento medio del settore, con un andamento a farfalla. Si nota che i punti di misura più vicini alla sorgente (Figura 4.21) hanno valori più alti del parametro e che ai punti vicini alla parete laterale corrispondono valori leggermente più alti rispetto al resto della fila. Non rispetta questa regola la prima fila ove il valore più alto si registra nel punto 03 che è il più vicino alla sorgente. Si può dunque supporre la dipendenza del parametro dalla vicinanza alla sorgente e a superfici riflettenti.

#### Settore B

L'andamento medio del parametro in questo settore (Figura 4.18) è praticamente analogo a quello del settore A: generalmente crescente a parte qualche banda riconoscibile dal grafico (125, 315, 800, 2000 Hz) con minimo pari a 0,43 a 125 Hz e massimo a 10 kHz pari a 0,83. Il valore medio totale è 0,56 in linea con quello del settore A. Per quanto riguarda l'andamento al variare del punto di misura il grafico (Figura 4.22) evidenzia il diminuire del valore del parametro all'allontanarsi dalla sorgente, e un valore maggiore del parametro in vicinanza della parete laterale, a conferma di quanto già notato per l'altro settore.

#### Settore C

In questa parte della platea l'andamento medio è meno regolare (Figura 4.19), presenta infatti un aumento generale dei valori con la frequenza, ma ha anche dei picchi e delle successive zone decrescenti in corrispondenza delle frequenze centrali di banda 160, 630 e 1000 Hz. Il minimo dell'andamento medio si trova a 250 Hz ed è pari a 0,25, il massimo è a 10 kHz ed è pari a 0,62. Il valore medio totale è 0,38. Come si può notare sia il valore medio sia l'andamento medio presentano valori più bassi dei settori A e B della platea, a conferma della diminuzione del parametro all'aumentare della distanza dalla sorgente. Inoltre si può vedere che i valori puntuali frequenza per frequenza sono molto meno dispersi rispetto all'andamento medio che non nei settori trattati in precedenza, anche se permane alle frequenze molto basse e molto alte una certa disomogeneità dei dati. Dall'altro grafico (Figura 4.23) si evince l'uniformità della distribuzione spaziale dei risultati che sembrano essere scarsamente influenzati e dalla parete laterale e dalla parete di fondo.

## Settore D

Questo settore presenta un andamento simile a quello del settore C (Figura 4.20). Andamento generalmente crescente con dei picchi alle frequenze 160 e 1600 Hz. Il minimo dell'andamento medio in funzione della frequenza è pari a 0,26 a 200 Hz, mentre il massimo è sempre a 10 kHz pari a 0,58. Il valore medio totale è 0,38. Si conferma l'andamento che vuole nei settori più in alto della platea valori più bassi del parametro. Anche la dispersione dei dati risulta più ridotta com'è per il settore. Per quanto riguarda la distribuzione spaziale (Figura 4.24) vi è una situazione particolare che a fronte di una leggera diminuzione dei valori con l'aumentare della distanza dalla sorgente (la parete di fondo quindi non contribuisce all'aumento) mostra una visibile dipendenza dalla posizione rispetto alla parete laterale con valori più alti a maggior distanza da essa. E' un comportamento esattamente contrario a quello che avviene nella parte bassa della sala.

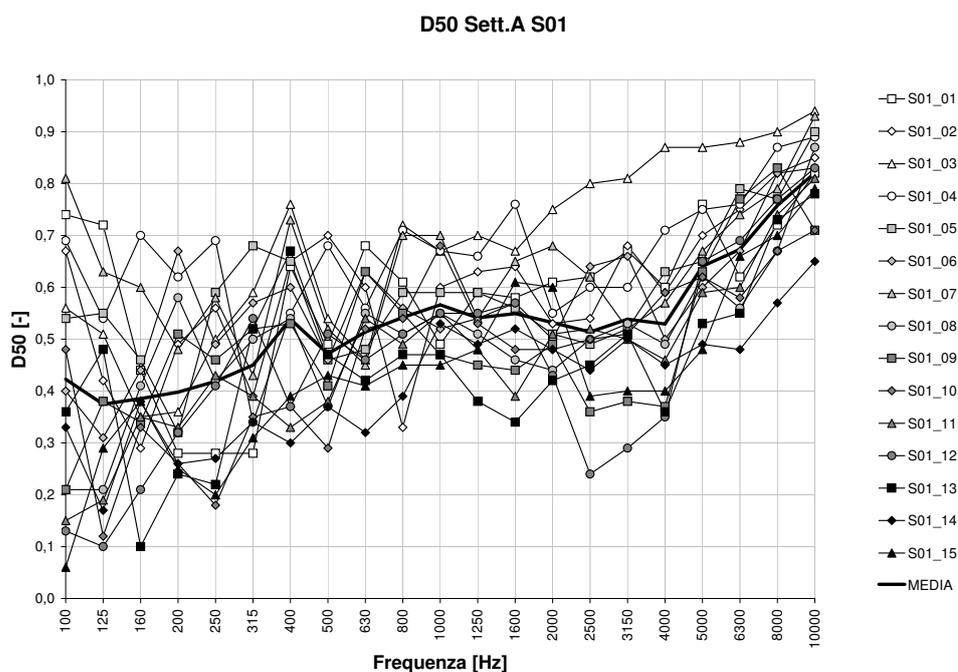


Figura 4.17:  $D_{50}$  analisi in frequenza settore A sorgente 01

## 4.2.2 Sorgente 02

### Settore A

Il parametro in esame mostra un andamento medio crescente con la frequenza (Figura 4.25), eccezion fatta per alcune bande che hanno andamento decrescente (bande centrate su 200, 315, 500, 1250, 2500 Hz). Il valore medio minimo è a 200 Hz ed è pari a 0,34, il valore medio massimo è a 10 kHz pari a 0,84. La media totale invece è pari a

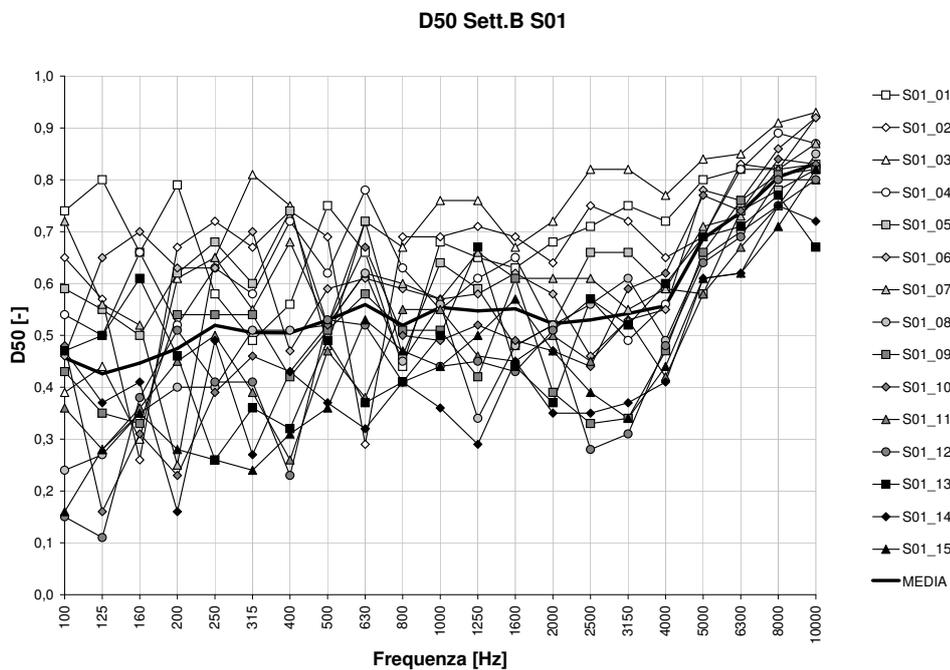


Figura 4.18:  $D_{50}$  analisi in frequenza settore B sorgente 01

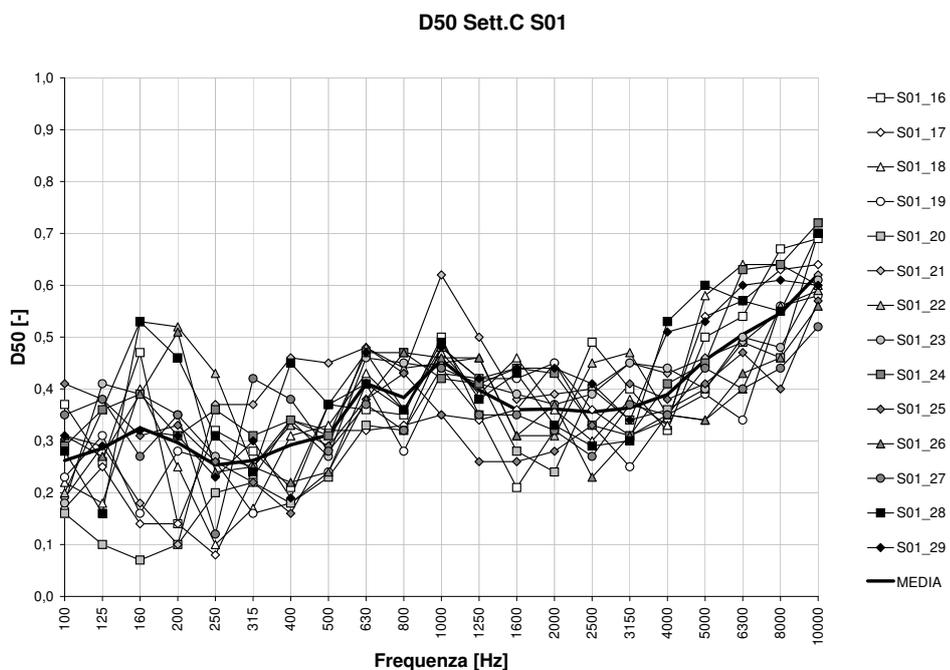


Figura 4.19:  $D_{50}$  analisi in frequenza settore C sorgente 01

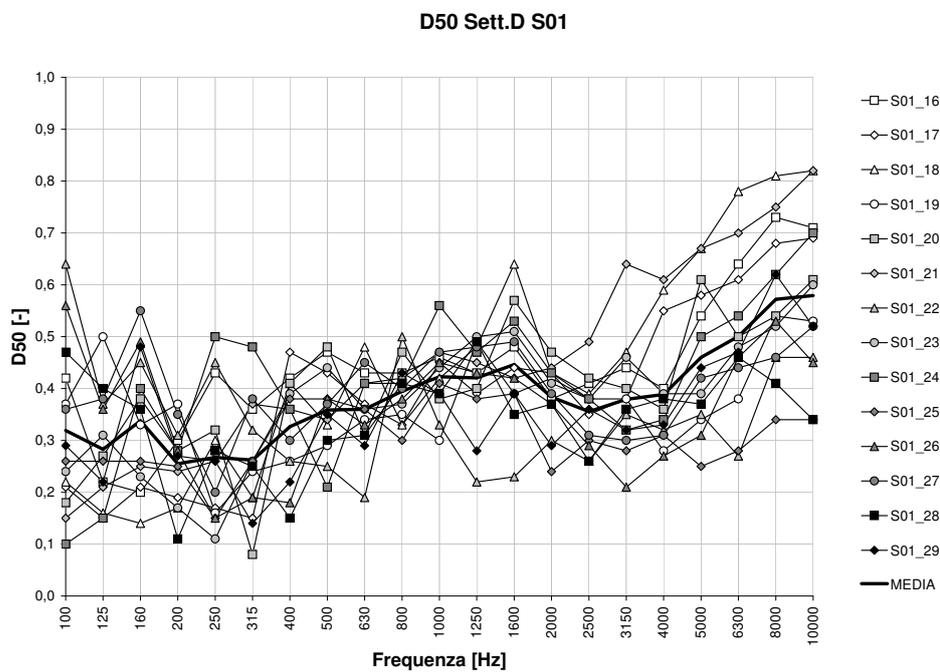


Figura 4.20:  $D_{50}$  analisi in frequenza settore D sorgente 01

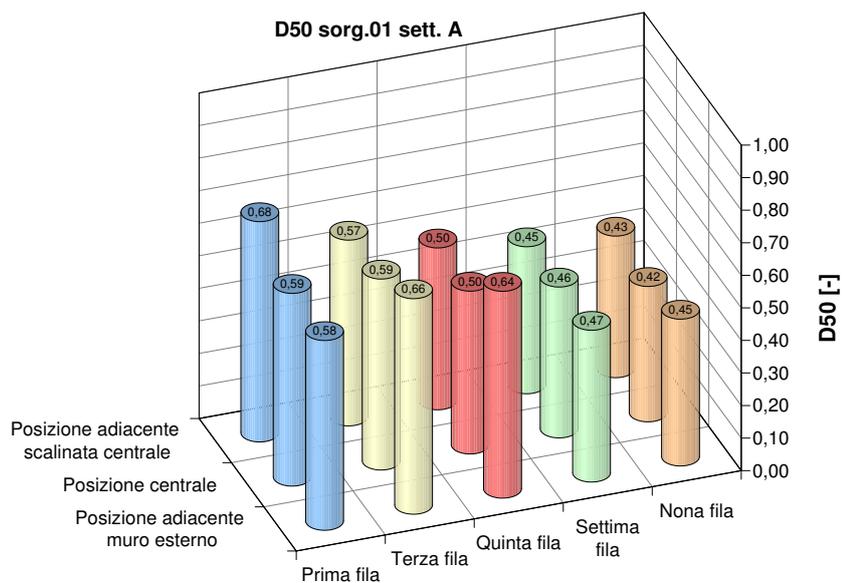


Figura 4.21:  $D_{50}$  media nei punti settore A sorgente 01

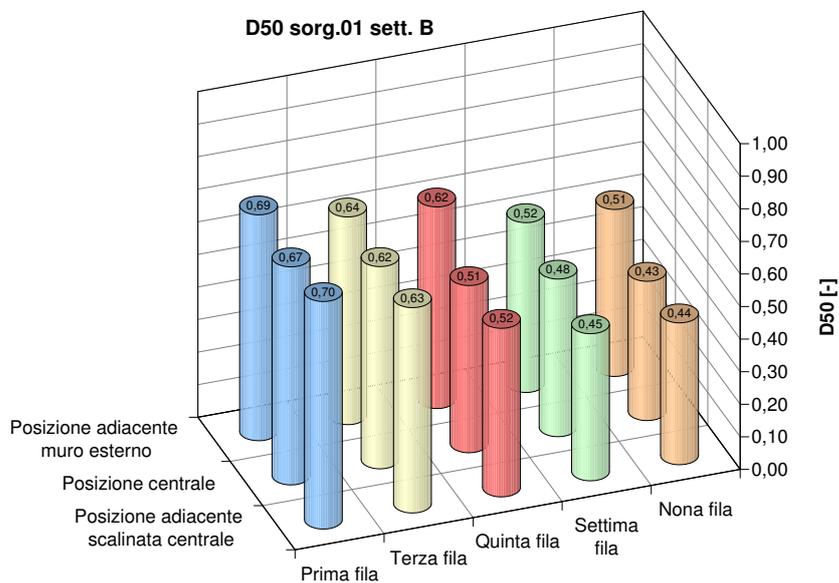


Figura 4.22:  $D_{50}$  media nei punti settore B sorgente 01

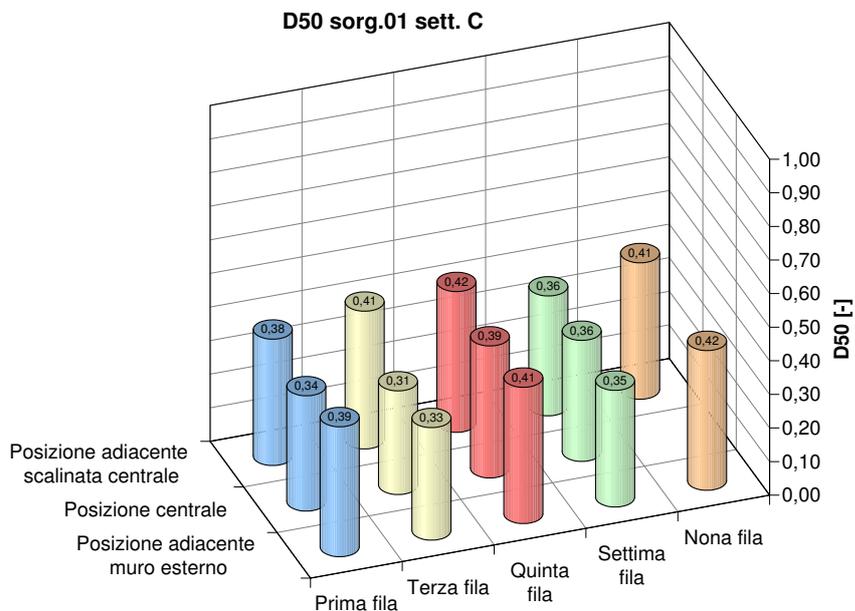


Figura 4.23:  $D_{50}$  media nei punti settore C sorgente 01

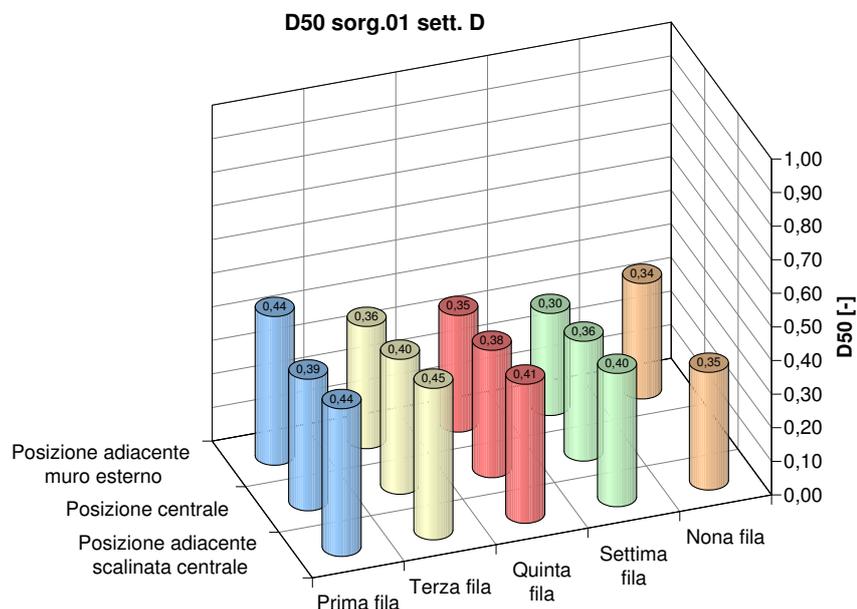


Figura 4.24:  $D_{50}$  media nei punti settore D sorgente 01

0,52. Alle basse frequenze i valori puntuali risultano parecchio dispersi rispetto all'andamento medio del settore. L'andamento spaziale del parametro nei punti di misura risulta piuttosto uniforme (Figura 4.29). Si nota che i punti di misura più vicini alla sorgente non hanno valori più alti del parametro e che invece ai punti vicini alla parete laterale corrispondono valori leggermente più alti rispetto al resto della fila.

### Settore B

L'andamento medio del parametro in questo settore è analogo a quello del settore A (Figura 4.26): generalmente crescente con però molti picchi e minimi relativi visibili nel grafico. Il minimo assoluto di questo andamento è pari a 0,35 ed è a 200 Hz e massimo a 10 kHz pari a 0,85. Il valore medio totale è 0,53 in linea con quello del settore A. Anche in questo caso i dati sono piuttosto dispersi alle basse frequenze. Per quanto riguarda l'andamento al variare del punto di misura il grafico (Figura 4.30) evidenzia il diminuire del valore del parametro all'allontanarsi dalla sorgente, e un valore maggiore del parametro in vicinanza della parete laterale, a conferma di quanto già notato per l'altro settore.

### Settore C

In questa parte della platea l'andamento medio è meno regolare (Figura 4.27), presenta infatti un aumento generale dei valori con la frequenza, ma ha anche molti picchi e delle successive zone decrescenti come visibile dal grafico. Il minimo dell'andamento

medio si trova a 100 Hz ed è pari a 0,23, il massimo è a 10 kHz ed è pari a 0,77. Il valore medio totale è 0,46. Come si può notare sia il valore medio sia l'andamento medio presentano valori più bassi dei settori A e B della platea, a conferma della diminuzione del parametro all'aumentare della distanza dalla sorgente. Inoltre si può vedere che i valori puntali frequenza per frequenza sono piuttosto compatti come distribuzione, sono un po' dispersi solamente alle frequenze molto basse. Dall'altro grafico (Figura 4.31) si evince l'uniformità della distribuzione spaziale dei risultati che sembrano essere scarsamente influenzati e dalla parete laterale e dalla parete di fondo.

### Settore D

Questo settore (Figura 4.28) presenta un andamento simile a quello del settore C. Andamento generalmente crescente con dei picchi alle frequenze 200,400 e 1000 Hz. Il minimo dell'andamento medio in funzione della frequenza è pari a 0,26 a 100 Hz, mentre il massimo è sempre a 10 kHz pari a 0,58. La dispersione dei dati risulta ridotta alle alte frequenze, è invece rilevante alle basse frequenze. Per quanto riguarda la distribuzione spaziale (Figura 4.32) si ha una situazione piuttosto omogenea con l'unica eccezione della dipendenza dalla posizione rispetto alla parete laterale con valori più alti a maggior distanza da essa. E' un comportamento esattamente contrario a quello che avviene nella parte bassa della sala.

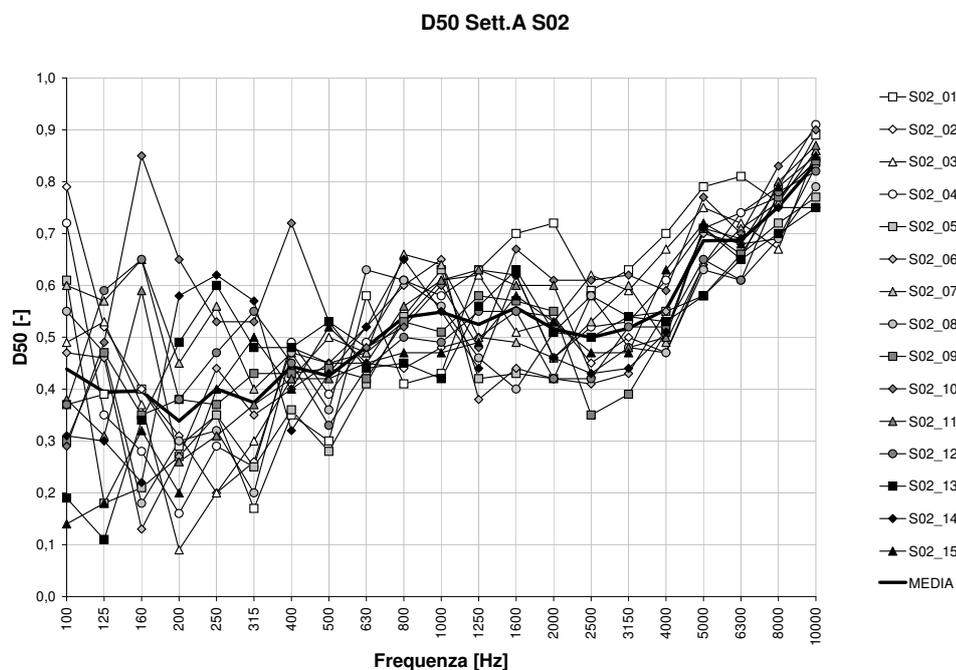
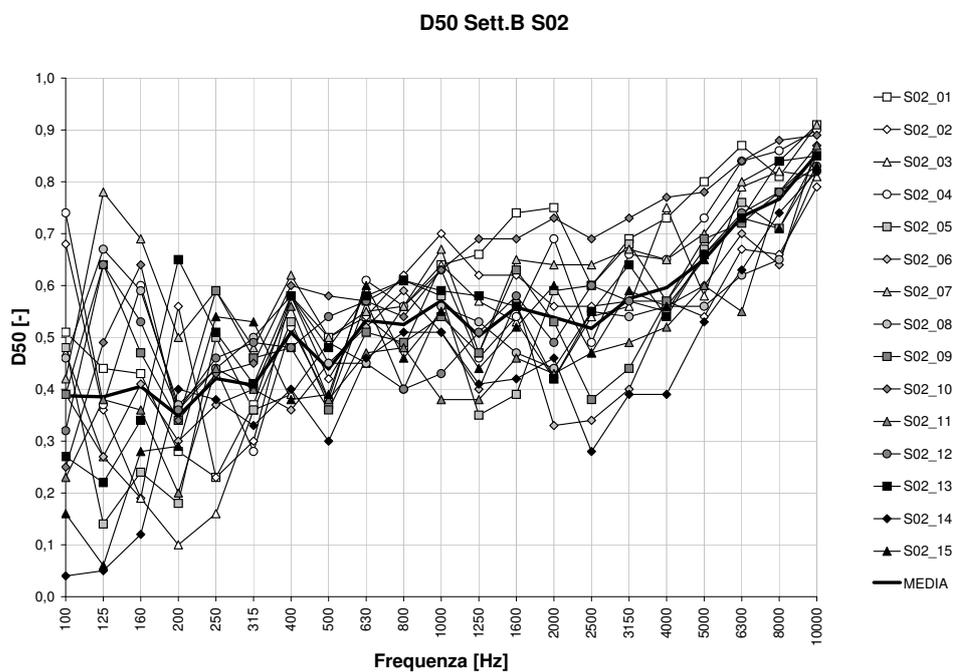
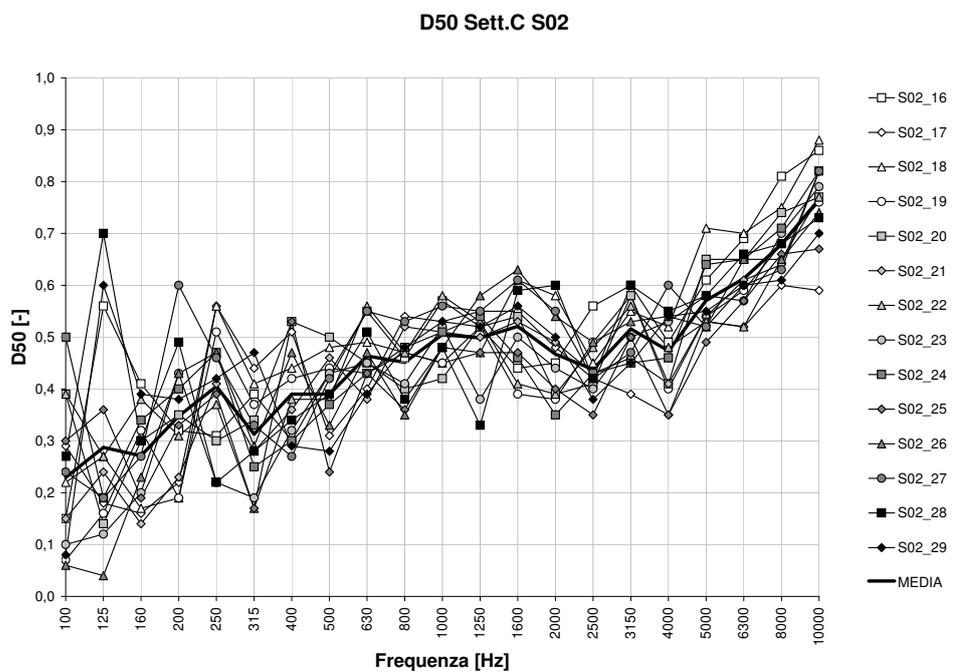


Figura 4.25:  $D_{50}$  analisi in frequenza settore A sorgente 02

Figura 4.26:  $D_{50}$  analisi in frequenza settore B sorgente 02Figura 4.27:  $D_{50}$  analisi in frequenza settore C sorgente 02

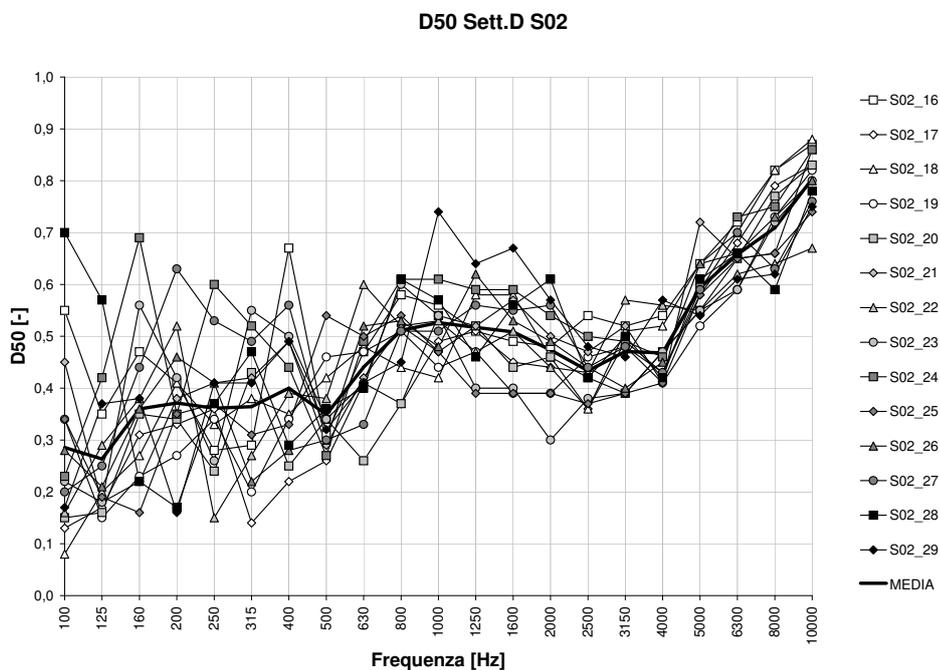


Figura 4.28:  $D_{50}$  analisi in frequenza settore D sorgente 02

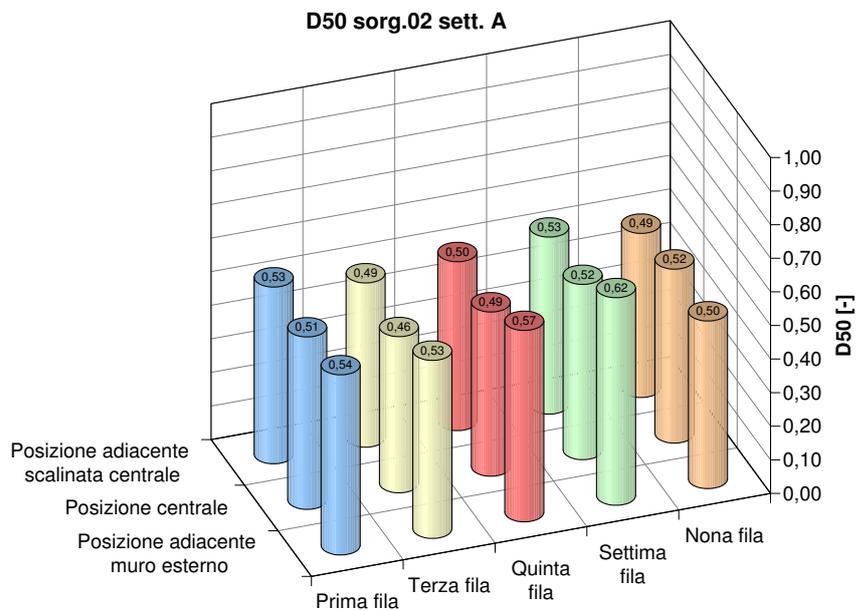


Figura 4.29:  $D_{50}$  media nei punti settore A sorgente 02

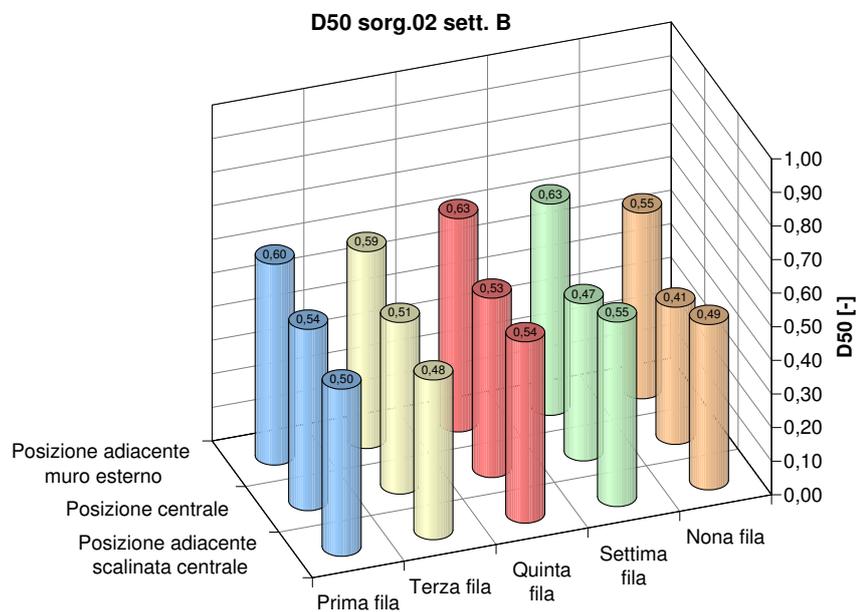


Figura 4.30:  $D_{50}$  media nei punti settore B sorgente 02

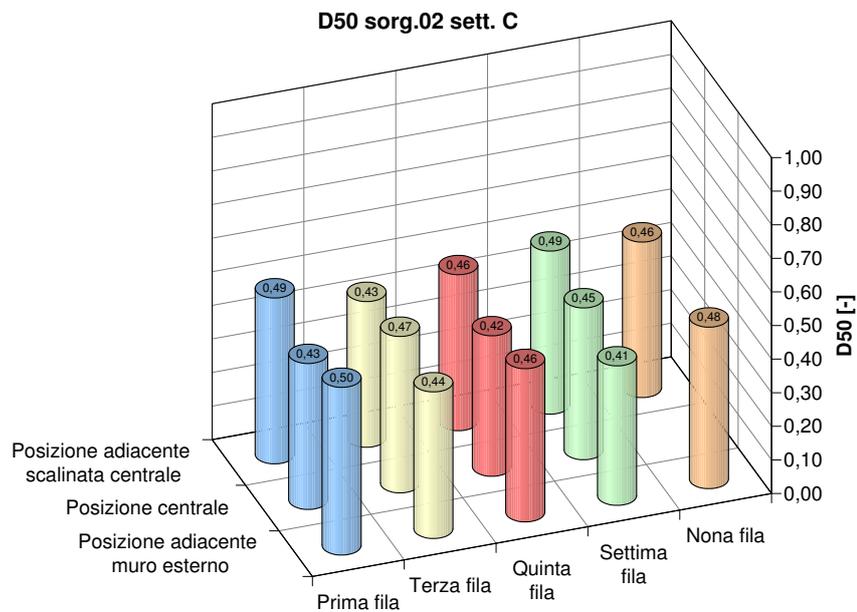


Figura 4.31:  $D_{50}$  media nei punti settore C sorgente 02

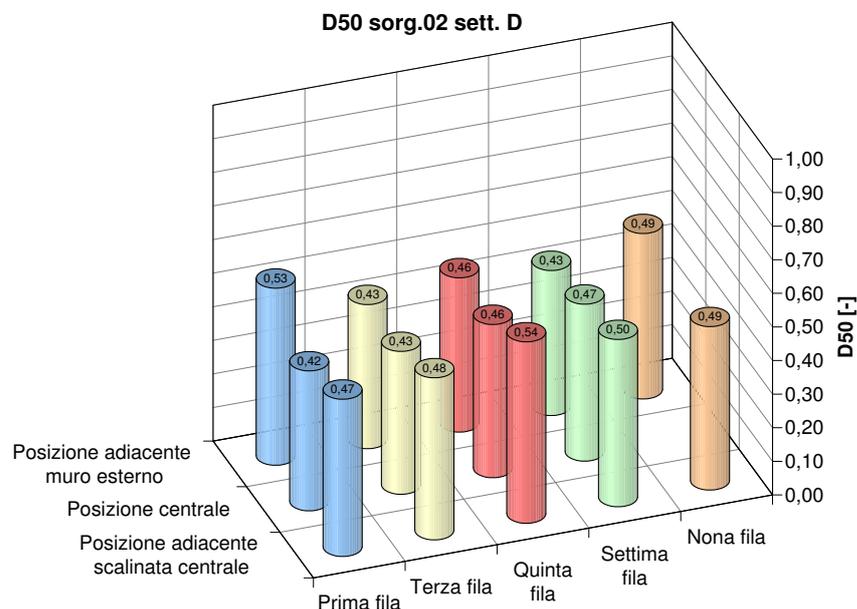


Figura 4.32:  $D_{50}$  media nei punti settore D sorgente 02

### 4.2.3 Analisi dei valori

Confronto fra il comportamento della sala con le sorgenti in posizione 01 e 02. Dal confronto del comportamento del parametro in sala, al variare della posizione della sorgente, si può vedere che nella posizione 02 i valori risultano più uniformi rispetto alla posizione 01 soprattutto nei settori A e B e in special modo nelle prime file. Nei settori C e D i valori risultano sempre relativamente omogenei. I dati raccolti inoltre sono meno dispersi, rispetto all'andamento medio, con la sorgente in posizione 02. Da notare ancora che nei settori C e D i valori del parametro risultano più alti con la sorgente in posizione 02. Sottolineamo ancora l'anomalo comportamento, presente con entrambe le posizioni della sorgente, per cui i punti nella parte bassa della sala hanno un valore maggiore se vicini alla parete laterale mentre i punti nella parte alta hanno un valore maggiore se lontani da tale superficie. Questo particolare aspetto è più marcato sul lato della sala corrispondente al lato del palco ove si trovano le due sorgenti.

#### Confronto con i valori di letteratura

Poichè i valori medi risultano generalmente compresi fra 0,35 e 0,55, il parametro è da considerarsi adeguato per l'ascolto di musica da camera, sinfonica e d'organo (range di letteratura  $D_{50} < 0,5$  dB). Per la prosa ( $D_{50} > 0,5$  dB) e per l'opera ( $D_{50} = 0,5$  dB) risulta solamente sufficiente.

### 4.3 Tempo centrale, $t_s$

Questo parametro rappresenta il rapporto tra l'energia dell'intero decadimento pesata rispetto al tempo, e l'energia complessiva. Le indagini svolte dimostrano che questo parametro è molto sensibile alla posizione dell'ascoltatore in una sala. Esso è ben correlato alla chiarezza musicale nelle sale da concerto.

#### 4.3.1 Sorgente 01

##### Settore A

L'andamento medio del parametro è decrescente con la frequenza (Figura 4.33). Ha massimo a 160 Hz pari a 153,8 ms, e minimo a 10 kHz pari a 36,6 ms. La media totale di tutte le frequenze e tutti i punti di misura è 100,55 ms. I dati rispetto all'andamento medio non hanno dispersione trascurabile soprattutto per qualche punto di misura (03). La distribuzione spaziale della media fra le frequenze è uniforme con una evidente tendenza all'aumento del valore del parametro man mano che ci si allontana dalla sorgente (Figura 4.37).

##### Settore B

Andamento medio molto simile al settore A, con il massimo a 100 Hz pari a 152,6 ms, minimo a 10 kHz pari a 33,2 ms (Figura 4.34). Il valore medio totale è pari a 97,39 ms. I dati presentano dispersione costante non trascurabile. La distribuzione spaziale (Figura 4.38) è uniforme con una evidente tendenza all'aumento del valore del parametro man mano che ci si allontana dalla sorgente.

##### Settore C

Andamento medio (Figura 4.35) decrescente con massimo assoluto a 100 Hz pari a 214,8 ms, minimo relativo a 200 e 630 Hz, massimo relativo a 250 Hz e minimo assoluto 61,7 ms a 10 kHz. Valore medio totale 129,79 ms. La media risulta distorta da tre punti di misura (26, 27, 29) che hanno andamento in frequenza con valori notevolmente più alti del resto del settore. Inoltre si può notare una maggior dispersione alle basse frequenze. La distribuzione delle medie fra le bande di frequenza sui singoli punti di misura (Figura 4.39) mette in evidenza un andamento omogeneo a parte i tre punti (26, 27, 29) di cui si è già accennato che hanno valori molto più alti del resto del settore.

##### Settore D

La situazione (Figura 4.36) è pressochè identica al settore C. Andamento medio decrescente con massimo assoluto a 100 Hz pari a 201 ms, minimo relativo a 200 e 630 Hz, massimo relativo a 315 Hz e minimo assoluto 61,9 ms a 10 kHz. Valore medio totale 128,83 ms. La media risulta distorta da tre punti di misura (26, 27, 29) che hanno andamento in frequenza con valori notevolmente più alti del resto del settore. Inoltre si può notare una maggior dispersione alle basse frequenze. La distribuzione delle medie

fra le bande di frequenza sui singoli punti di misura (Figura 4.40) mette in evidenza un andamento omogeneo a parte i tre punti (26, 27, 29) di cui si è già accennato che hanno valori molto più alti del resto del settore.

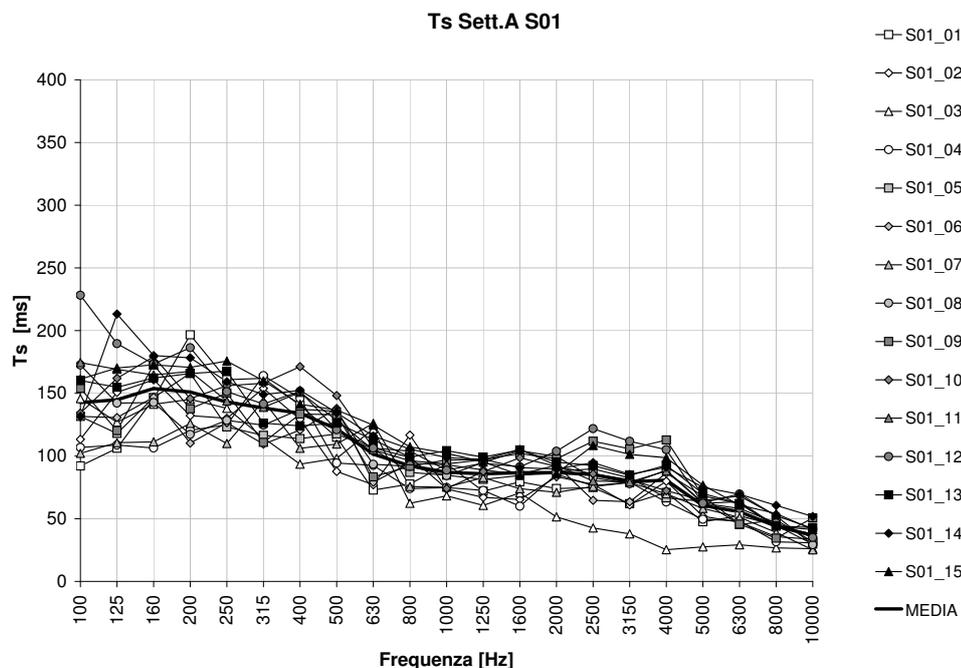


Figura 4.33:  $t_s$  analisi in frequenza settore A sorgente 01

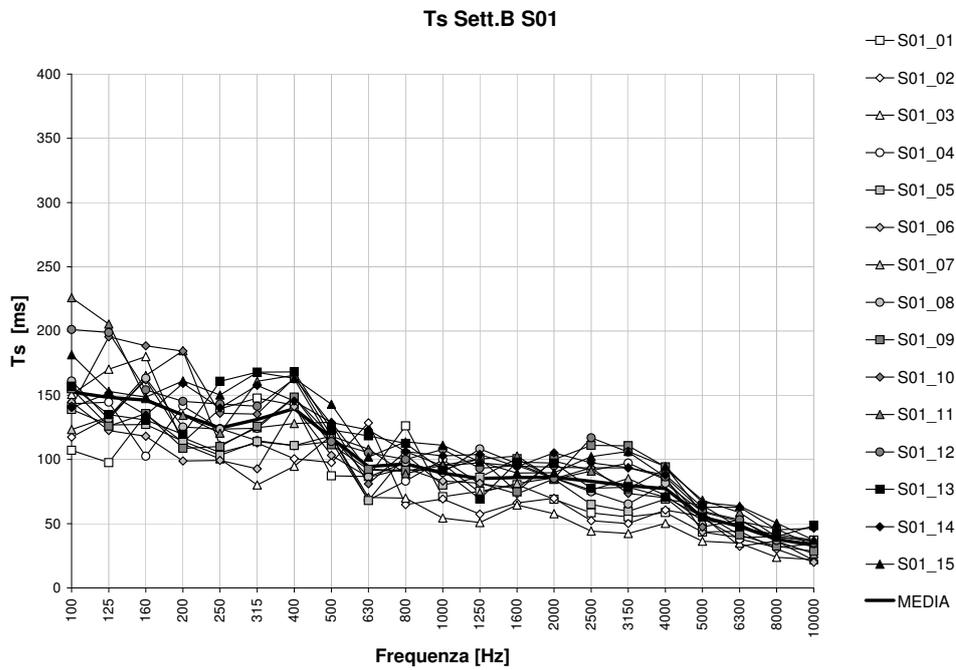
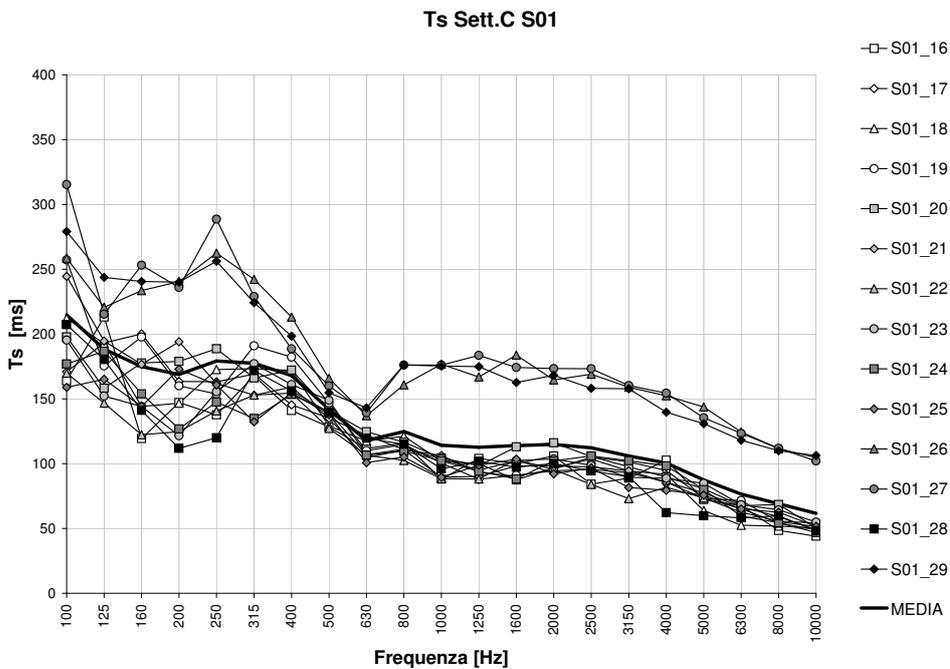
## 4.3.2 Sorgente 02

### Settore A

L'andamento medio del parametro è generalmente decrescente con la frequenza eccetto alle frequenze più basse (Figura 4.41). Ha massimo a 315 Hz pari a 169,1 ms, e minimo a 10 kHz pari a 33,5 ms. La media totale di tutte le frequenze e tutti i punti di misura è 108,25 ms. I dati rispetto all'andamento medio non hanno dispersione trascurabile alle basse frequenze, mentre i valori alle frequenze medio-alte sono piuttosto vicini alla media. La distribuzione spaziale è uniforme (Figura 4.45) con una accennata tendenza all'aumento del valore del parametro, man mano che ci si allontana dalla parete laterale.

### Settore B

Andamento medio molto simile al settore A (Figura 4.42), con il massimo a 315 Hz pari a 162,8 ms, minimo a 10 kHz pari a 32,7 ms. Il valore medio totale è pari a 105,43 ms. I dati presentano dispersione più evidente alle basse frequenze. La distribuzione

Figura 4.34:  $t_s$  analisi in frequenza settore B sorgente 01Figura 4.35:  $t_s$  analisi in frequenza settore C sorgente 01

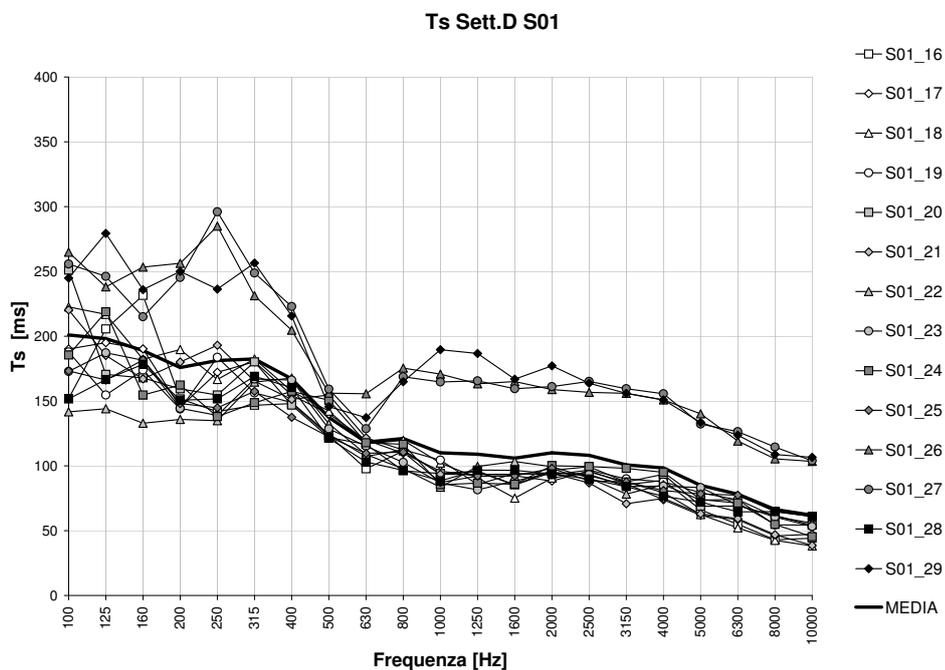


Figura 4.36:  $t_s$  analisi in frequenza settore D sorgente 01

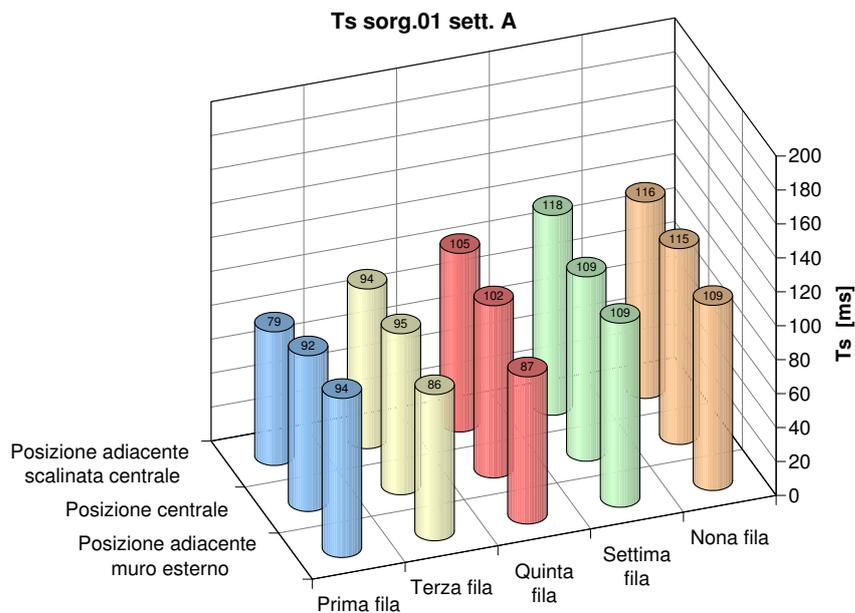


Figura 4.37:  $t_s$  media nei punti settore A sorgente 01

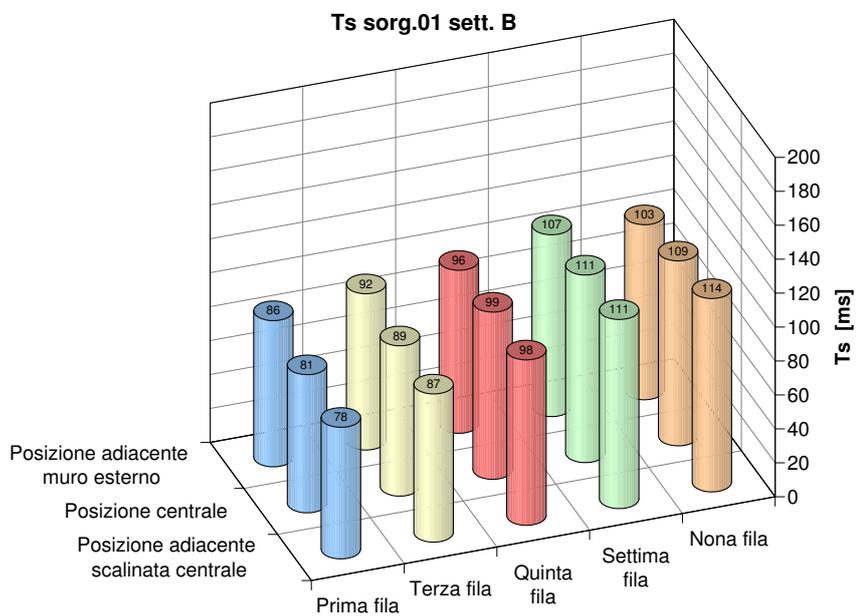


Figura 4.38:  $t_s$  media nei punti settore B sorgente 01

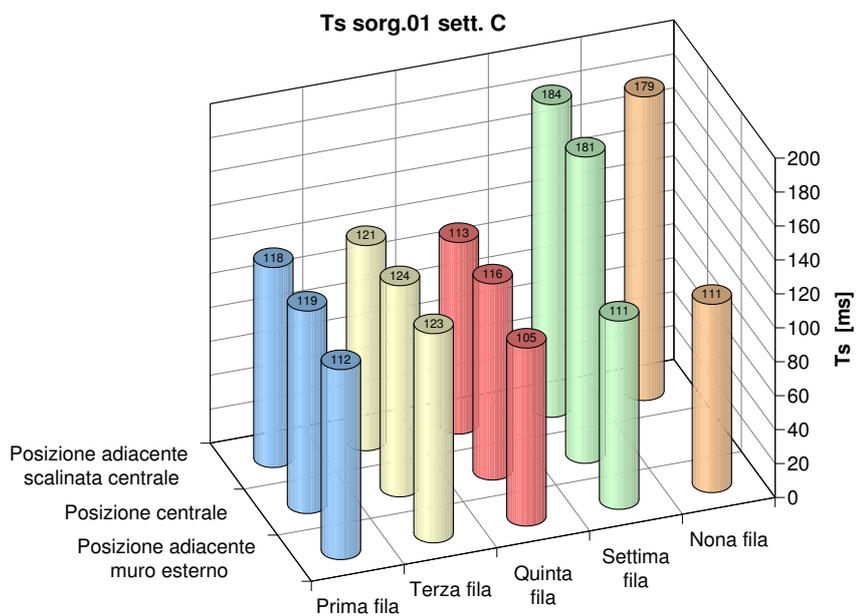


Figura 4.39:  $t_s$  media nei punti settore C sorgente 01

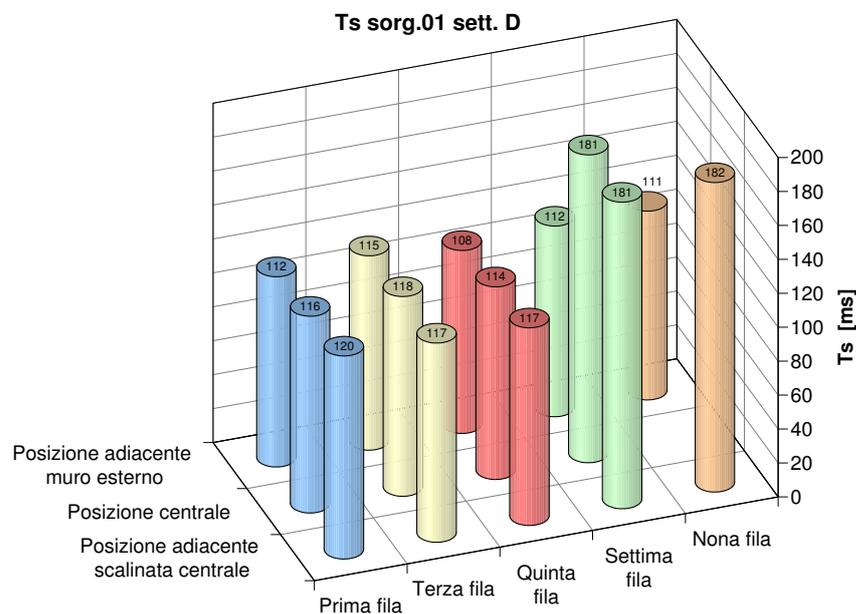


Figura 4.40:  $t_s$  media nei punti settore D sorgente 01

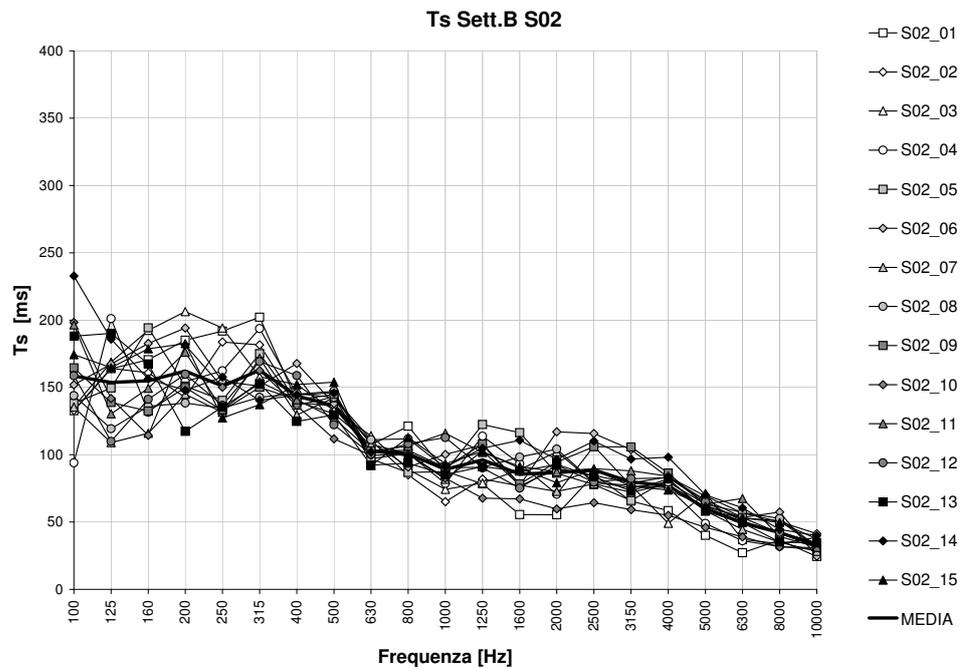
spaziale (Figura 4.46) è uniforme con una accennata tendenza all'aumento del valore del parametro, man mano che ci si allontana dalla parete laterale.

### Settore C

Andamento medio decrescente con massimo assoluto a 100 Hz pari a 186,1 ms, minimo relativo a 200 Hz, massimo relativo a 315 Hz e minimo assoluto 41,4 ms a 10 kHz (Figura 4.43). Valore medio totale 110,07 ms. Si può notare una maggior dispersione dei valori alle basse frequenze. La distribuzione delle medie fra le bande di frequenza sui singoli punti di misura mette in evidenza un andamento estremamente omogeneo e costante (Figura 4.47).

### Settore D

La situazione è pressochè identica al settore C (Figura 4.44). Andamento medio decrescente con massimo assoluto a 100 Hz pari a 195,6 ms, minimo relativo a 200 Hz, massimo relativo a 250 Hz e minimo assoluto 39,0 ms a 10 kHz. Valore medio totale 109,50 ms. Si può notare una maggior dispersione dei valori alle basse frequenze. La distribuzione delle medie fra le bande di frequenza sui singoli punti di misura mette in evidenza un andamento omogeneo e costante (Figura 4.48).

Figura 4.41:  $t_s$  analisi in frequenza settore A sorgente 02Figura 4.42:  $t_s$  analisi in frequenza settore B sorgente 02

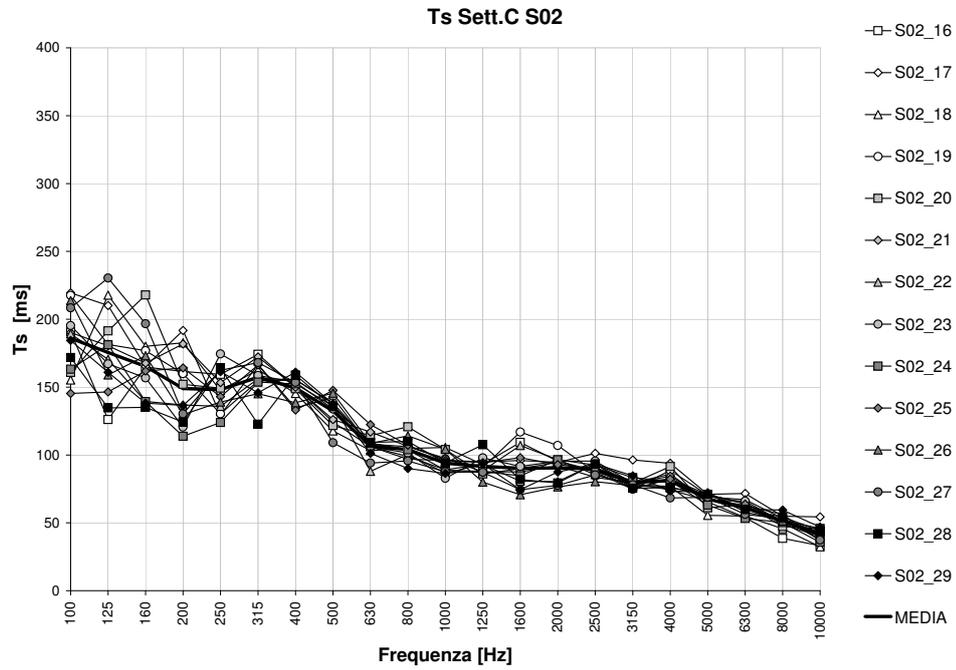


Figura 4.43:  $t_s$  analisi in frequenza settore C sorgente 02

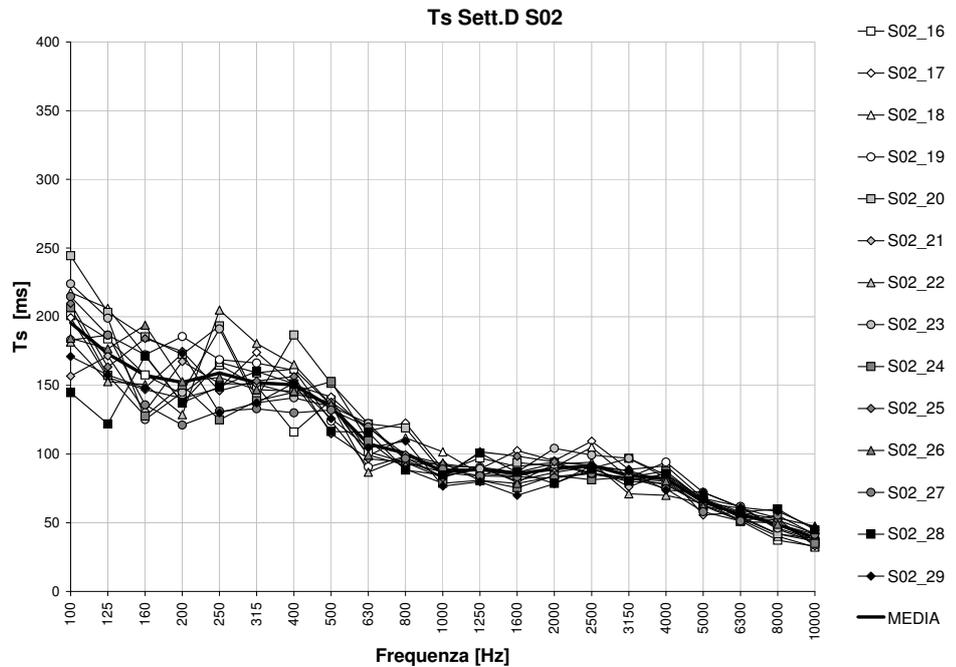


Figura 4.44:  $t_s$  analisi in frequenza settore D sorgente 02

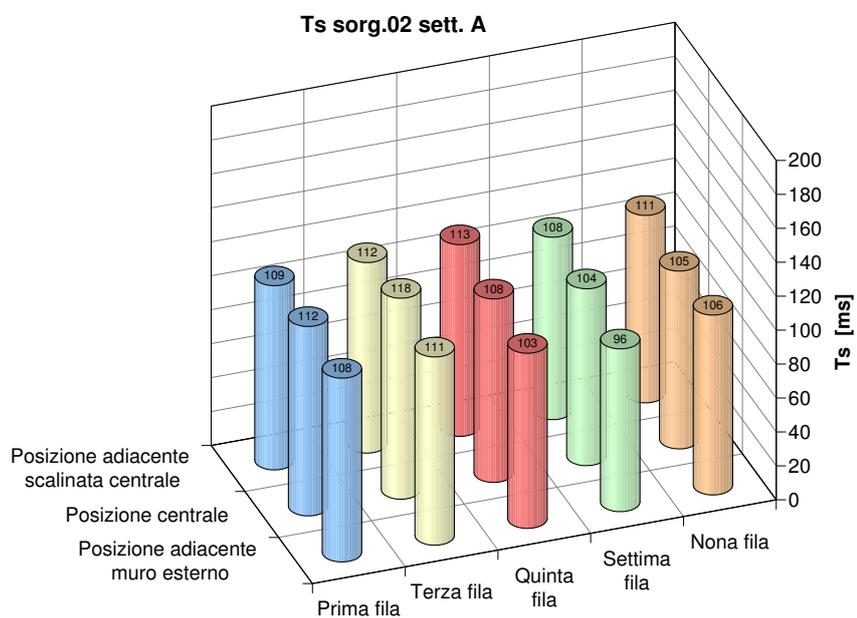


Figura 4.45:  $t_s$  media nei punti settore A sorgente 02

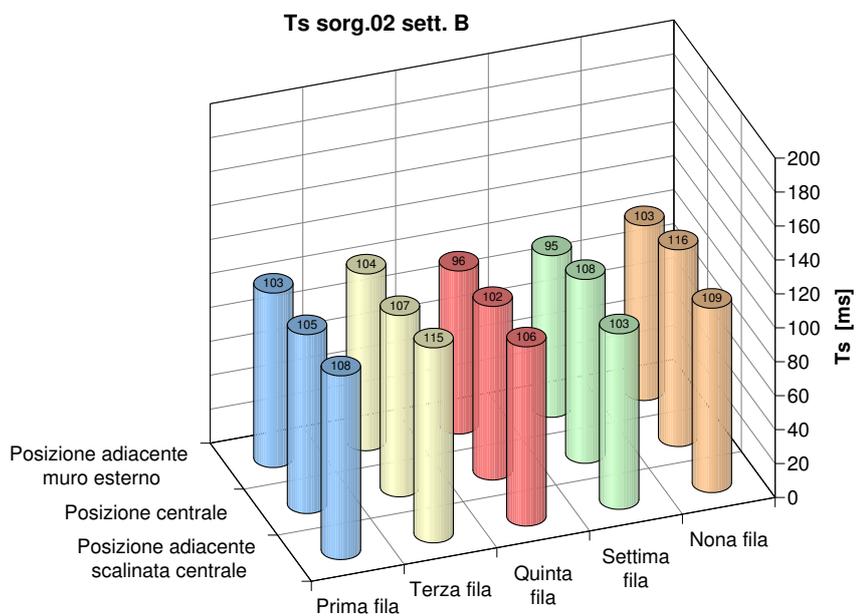


Figura 4.46:  $t_s$  media nei punti settore B sorgente 02

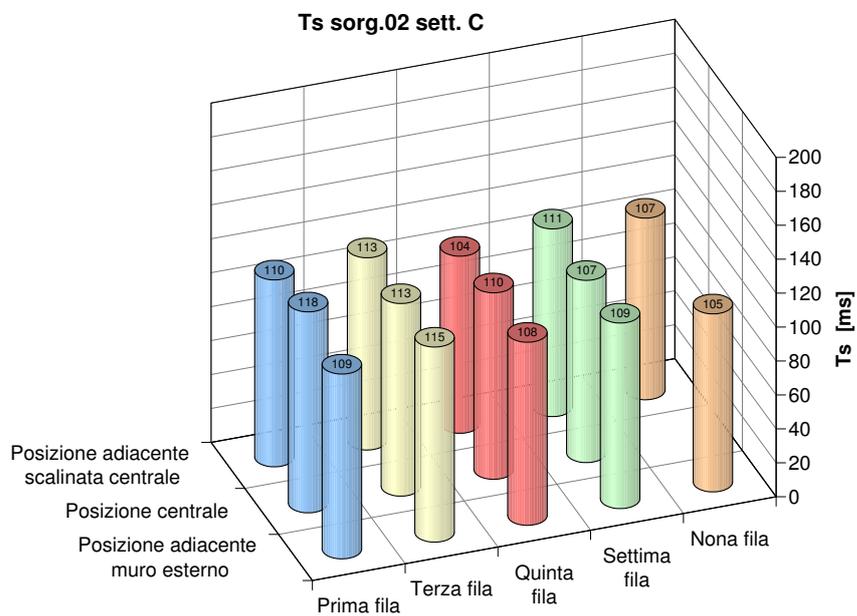


Figura 4.47:  $t_s$  media nei punti settore C sorgente 02

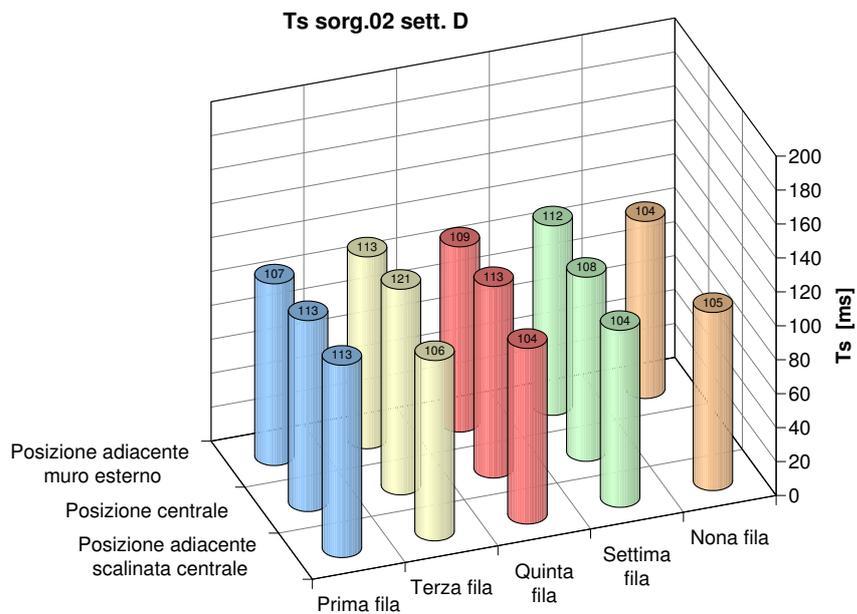


Figura 4.48:  $t_s$  media nei punti settore D sorgente 02

### 4.3.3 Analisi dei valori

#### **Confronto fra il comportamento della sala con le sorgenti in posizione 01 e 02**

Lo spostamento della sorgente comporta numerose variazioni sul comportamento del parametro  $T_s$  in sala. Nei settori A e B i valori aumentano con la sorgente in posizione 02 soprattutto nelle prime file, di conseguenza aumenta anche il valor medio. Nei settori C e D invece con la sorgente in posizione 02 i valori diminuiscono parecchio rispetto alla posizione 01 soprattutto perchè sparisce il comportamento anomalo dei tre punti per settore già segnalato in precedenza. In pratica con la sorgente in posizione 02 il parametro ha un valore estremamente omogeneo in tutti i punti della sala.

#### **Confronto con i valori di letteratura**

I valori medi ottenuti rientrano tutti nel range di letteratura indicato per la musica, ovvero:  $50 < T_s < 250ms$ . Tali valori non sono invece buoni per il parlato che richiederebbe  $0 < T_s < 50ms$ . Si può notare infine che la sala ha un miglior comportamento con la sorgente in posizione 02, in quanto i valori registrati risultano un po' più alti.

## 4.4 Early Decay Time, EDT

L'EDT è un parametro calcolato estrapolando a -60 dB la pendenza media dei primi 10 dB del decadimento del livello di pressione sonora di un suono interrotto bruscamente o di un segnale impulsivo. E' un parametro particolarmente sensibile alla localizzazione del microfono in relazione alla sua distanza dalla sorgente. Diminuisce infatti con l'allontanarsi del microfono dalla sorgente e diventa un parametro particolarmente significativo per confrontare diversi punti di una stessa sala. Questo parametro è collegato anche con la pienezza delle note. Valori dell'EDT leggermente superiori, circa del 10 per cento, rispetto al tempo di riverberazione portano ad un'accentuazione della percezione soggettiva di riverberazione e quindi aumentano la qualità della sala.

### 4.4.1 Sorgente 01

#### Settore A

Il parametro in esame ha un andamento medio fra i punti di misura con tendenza decrescente all'aumentare della frequenza (Figura 4.49), fatta eccezione per qualche oscillazione da questa regola (banda centrata su 160, 400, 630, 1600 Hz). Il massimo della media si ha a 160 Hz pari a 1,69 s il minimo 0,48 s a 10 kHz. La media totale è 1,32 s. I valori risultano distribuiti in modo compatto soprattutto alle alte frequenze. Una certa dispersione è visibile solo alle basse frequenze. In relazione alla distribuzione spaziale della media sui singoli punti di misura (Figura 4.53), si nota una buona omogeneità con una tendenza solo accennata ad avere in vicinanza alla parete laterale dei valori leggermente più bassi.

#### Settore B

Il parametro ha andamento medio molto simile al settore A con tendenza generale a diminuire con la frequenza (Figura 4.50). Vi sono sempre delle bande (160, 315, 400, 1600 Hz) che hanno un comportamento leggermente inverso. Il massimo è a 100 Hz pari a 1,87 s, il minimo 0,53 s è a 10 kHz. La media totale è di 1,36 s in linea con quella del settore A. Anche in questo caso la distribuzione dei valori è compatta intorno ai valori medi eccezion fatta per le basse frequenze. La distribuzione spaziale mostra uniformità con una tendenza a valori più alti in vicinanza alla parete (Figura 4.54), contrariamente al settore A. Comportamento imputabile all'asimmetria della disposizione della sorgente sul palco.

#### Settore C

Il parametro (Figura 4.51) ha in media una tendenza a diminuire all'aumentare della frequenza, con l'eccezione di qualche banda centrata su 160, 250, 500, 800 Hz. Il valore massimo dell'andamento medio è a 100 Hz pari a 2,07 s il minimo è 0,59 s a 10 kHz. La media totale è pari a 1,23 s, solo leggermente più bassa dei settori A e B. I valori risultano molto compatti alle alte frequenze e un po' più dispersi alle frequenze basse. La distribuzione spaziale della media sui singoli punti (Figura 4.55) è uniforme,

non evidenziando particolari andamenti se non una leggera diminuzione spostandosi verso il fondo della sala.

### Settore D

Comportamento molto simile al settore C con andamento decrescente all'aumentare della frequenza ad eccezione delle bande centrate su 160, 250, 630 e 2000 Hz (Figura 4.52). Il massimo della media è 100 Hz pari a 2,01 s, il minimo è 0,59 s a 10kHz. Il valore medio totale è 1,24 s, in linea con il settore C. I valori risultano, tranne per le basse frequenze, molto compatti attorno all'andamento medio. La distribuzione spaziale delle media sui singoli punti dà valori omogenei (Figura 4.56), con una leggera tendenza a diminuire all'allontanarsi dalla sorgente.

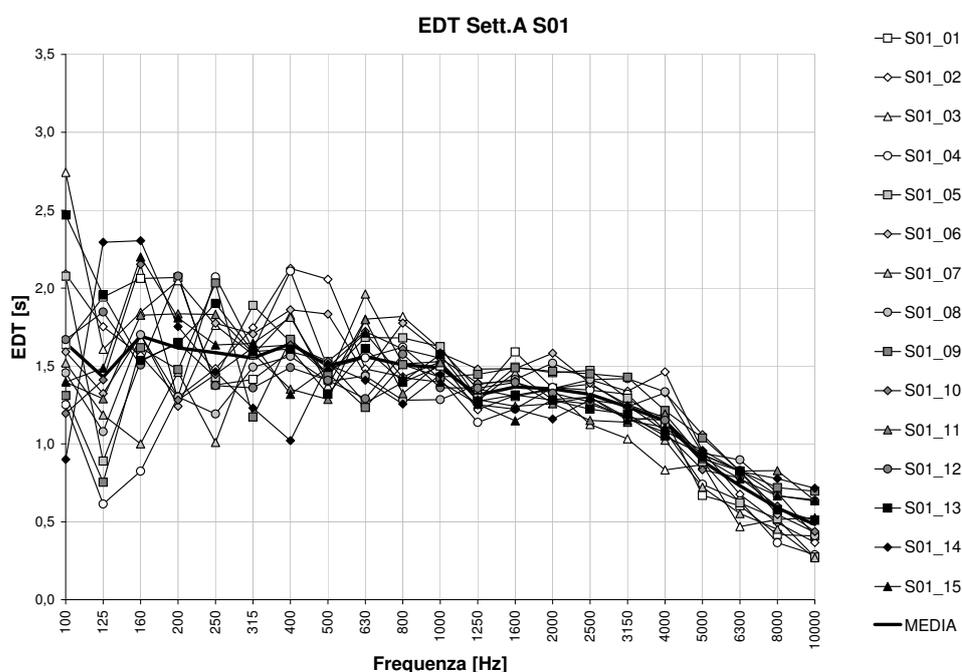


Figura 4.49: EDT analisi in frequenza settore A sorgente 01

## 4.4.2 Sorgente 02

### Settore A

Il parametro in esame ha un andamento medio fra i punti di misura con tendenza decrescente all'aumentare della frequenza (Figura 4.57), fatta eccezione per qualche oscillazione da questa regola (banda centrata su 315, 2500 Hz). Il massimo della media si ha a 100 Hz pari a 1,96 s il minimo 0,45 s a 10 kHz. La media totale è 1,41 s. I valori risultano distribuiti in modo compatto soprattutto alle alte frequenze. Una certa dispersione è visibile solo alle basse frequenze. In relazione alla distribuzione spaziale della

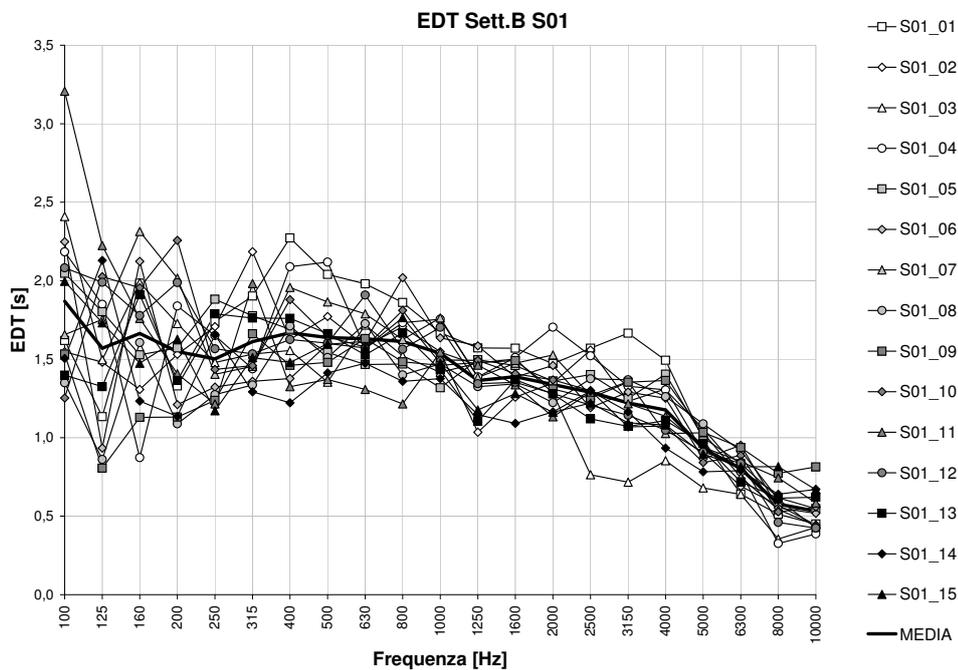


Figura 4.50: EDT analisi in frequenza settore B sorgente 01

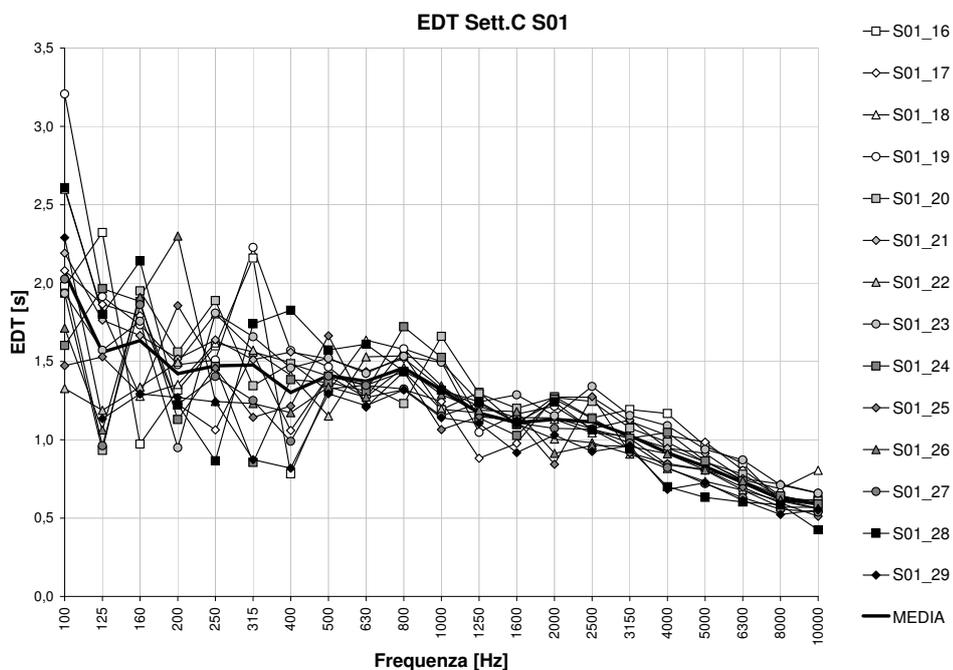


Figura 4.51: EDT analisi in frequenza settore C sorgente 01

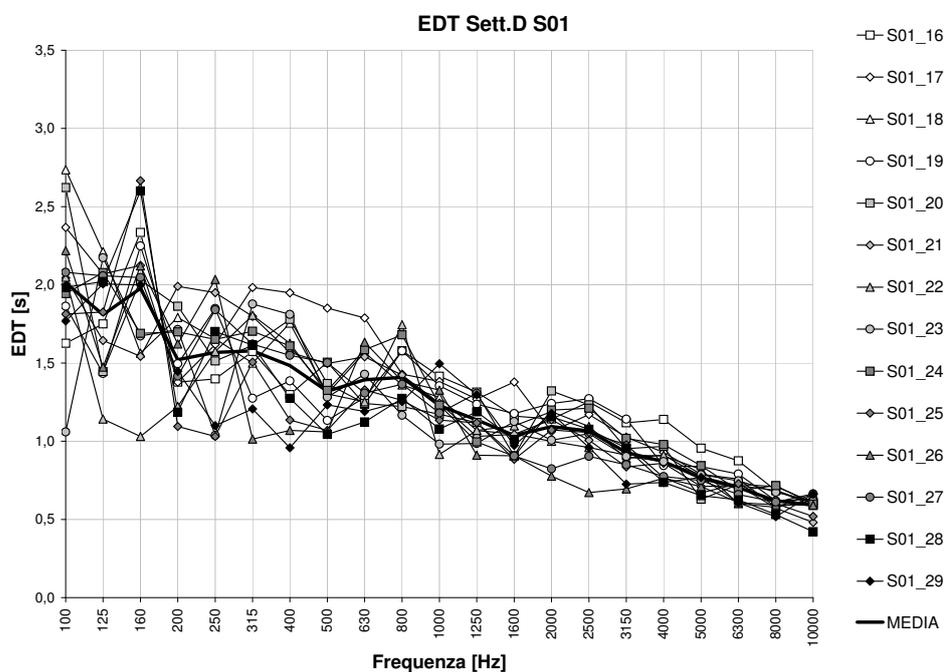


Figura 4.52: EDT analisi in frequenza settore D sorgente 01

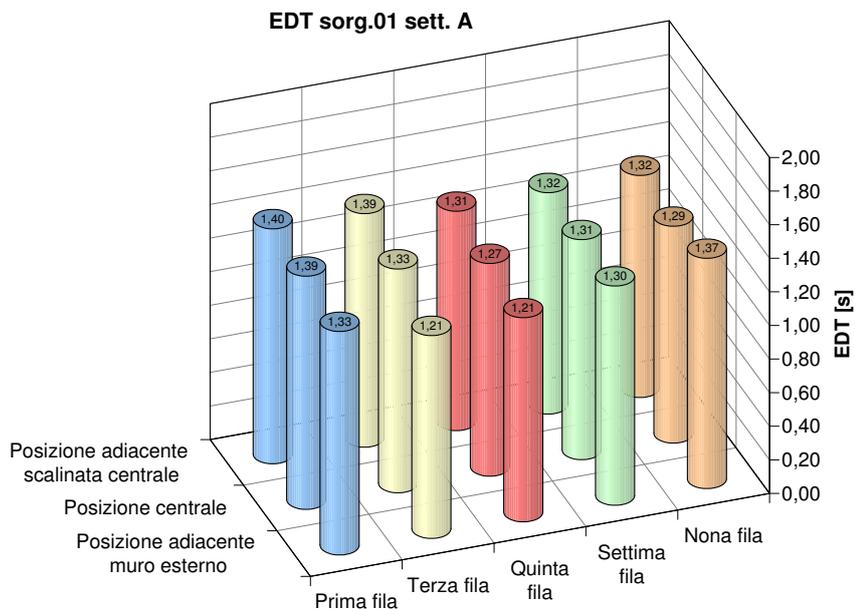


Figura 4.53: EDT media nei punti settore A sorgente 01

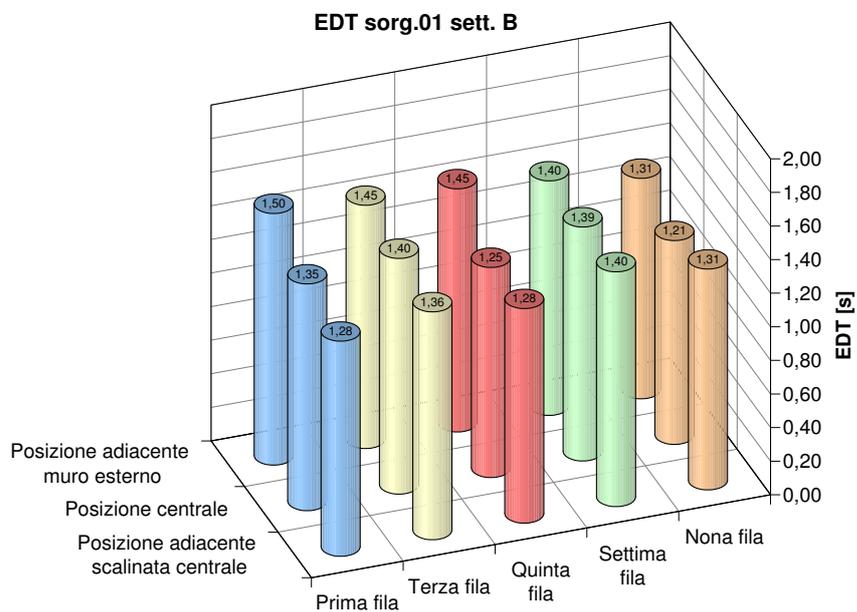


Figura 4.54: EDT media nei punti settore B sorgente 01

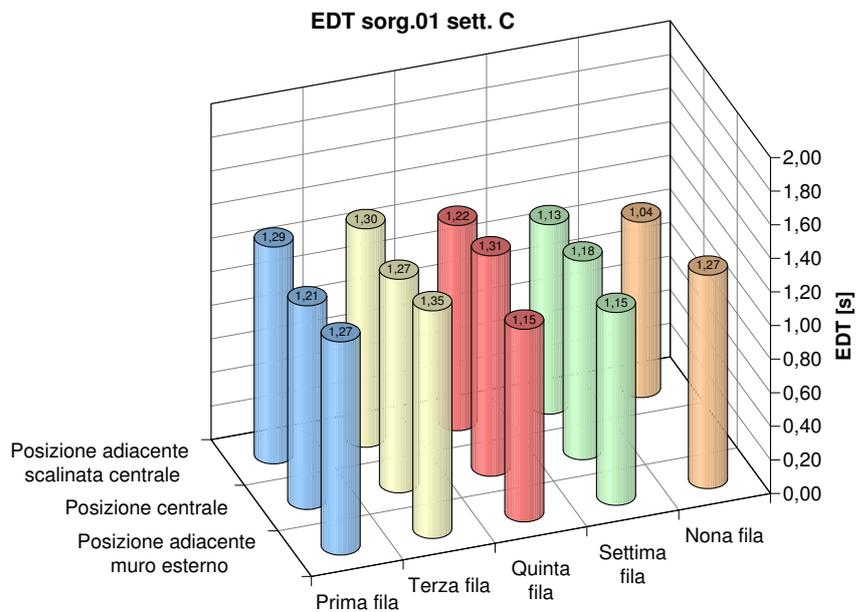


Figura 4.55: EDT media nei punti settore C sorgente 01

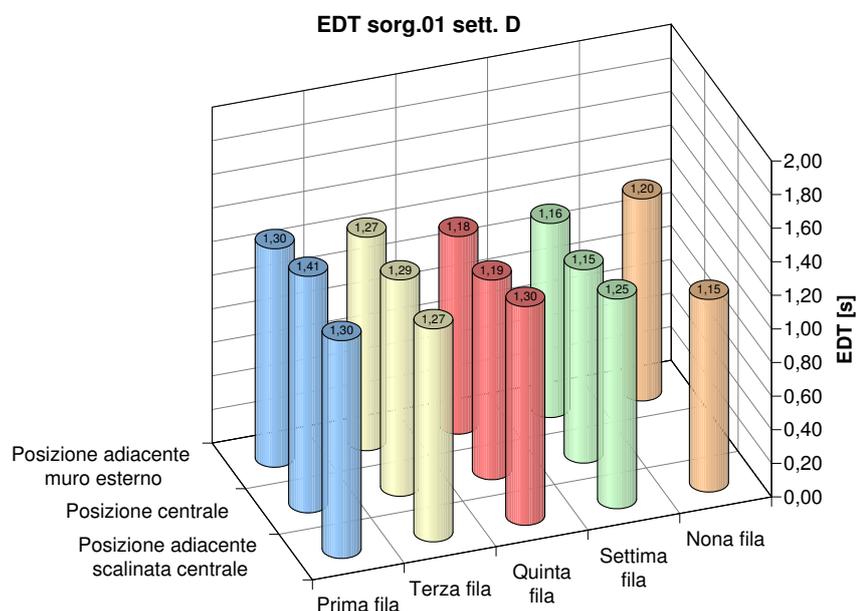


Figura 4.56: EDT media nei punti settore D sorgente 01

media sui singoli punti di misura (Figura 4.61), si nota buona omogeneità con una leggera tendenza al diminuire dei valori con l'allontanamento dalla sorgente; risulta non avere invece influenza costante la vicinanza alla superficie laterale.

### Settore B

Il parametro ha andamento medio molto simile al settore A con tendenza generale a diminuire con la frequenza (Figura 4.58). Vi sono sempre della bande (160, 315 Hz) che hanno un comportamento leggermente inverso. Il massimo è a 100 Hz pari a 1,86 s, il minimo 0,41 s è a 10 kHz. La media totale è di 1,43 s in linea con quella del settore A. Anche in questo caso la distribuzione dei valori è compatta intorno ai valori medi eccezion fatta per le basse frequenze. La distribuzione spaziale (Figura 4.62) mostra uniformità con una tendenza a valori più alti in vicinanza alla parete, si nota inoltre il diminuire dei valori all'allontanarsi dalla sorgente.

### Settore C

Il parametro ha in media una tendenza a diminuire all'aumentare della frequenza (Figura 4.59). Il valore massimo dell'andamento medio è a 125 Hz pari a 2,04 s il minimo è 0,44 s a 10 kHz. La media totale è pari a 1,25 s, solo leggermente più bassa dei settori A e B. I valori risultano molto compatti alle alte frequenze e un po' più dispersi alle frequenze basse. La distribuzione spaziale della media sui singoli punti evidenziando una leggera diminuzione spostandosi verso il fondo della sala e un comportamento non

regolare da fila a fila (Figura 4.63): è infatti visibile a file alternate un aumento o una diminuzione dei valori in corrispondenza della parete laterale e della scalinata centrale.

### Settore D

Comportamento molto simile al settore C, con andamento decrescente all'aumentare della frequenza ad eccezione delle bande centrate su 500 e 1250 Hz (Figura 4.60). Il massimo della media è 100 Hz pari a 2,00 s, il minimo è 0,42 s a 10 kHz. Il valore medio totale è 1,26 s, in linea con il settore C. I valori risultano, tranne per le basse frequenze, molto compatti attorno all'andamento medio. La distribuzione spaziale delle media sui singoli punti dà valori omogenei, con una leggera tendenza a diminuire all'allontanarsi dalla sorgente (Figura 4.64).

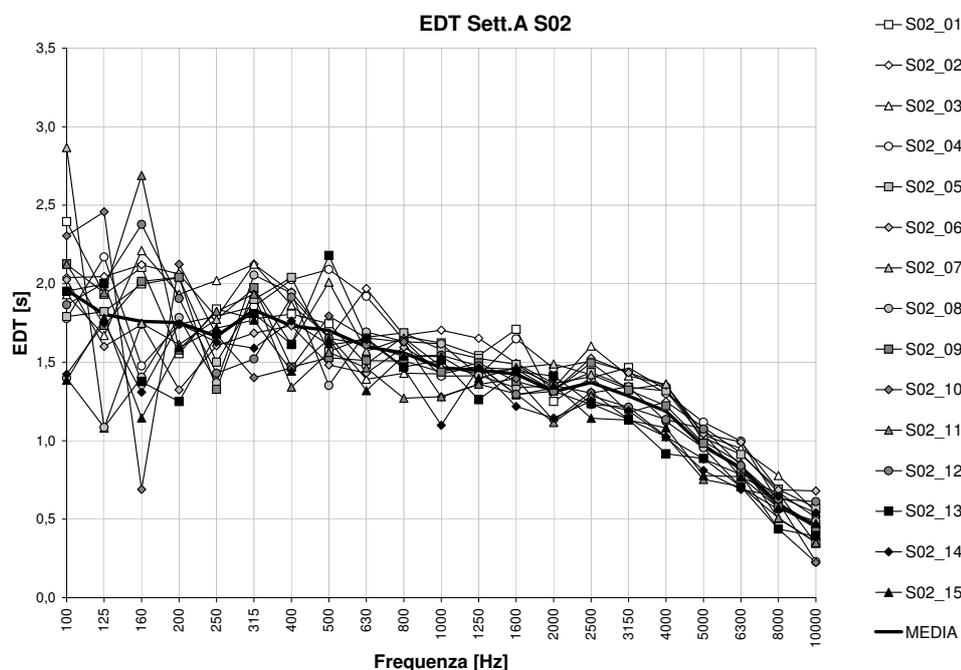


Figura 4.57: EDT analisi in frequenza settore A sorgente 02

### 4.4.3 Analisi dei valori

#### Confronto fra il comportamento della sala con le sorgenti in posizione 01 e 02

Con la sorgente più arretrata sul palco i valori dell'EDT sui settori A e B risultano leggermente più alti e uniformi sul settore, risentono inoltre in modo inferiore della vicinanza alla superficie laterale. Per quanto riguarda invece i settori C e D i valori medi risentono solo di una piccola variazione alle alte frequenze: i valori sono leggermente più bassi con la sorgente in posizione 02. Non vi sono invece variazioni sulla distribuzione spaziale della media sui singoli punti.

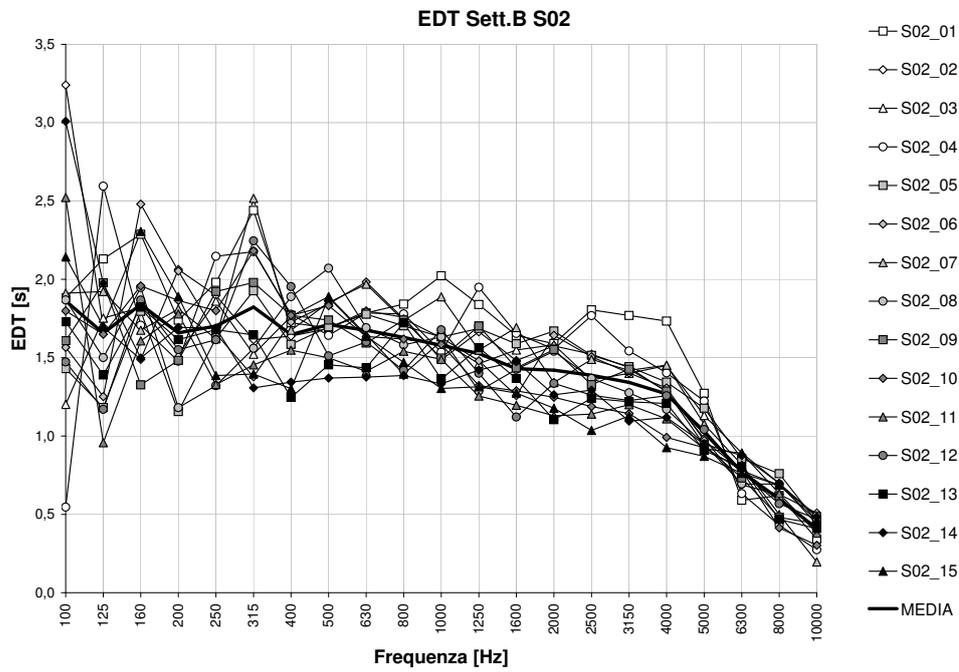


Figura 4.58: EDT analisi in frequenza settore B sorgente 02

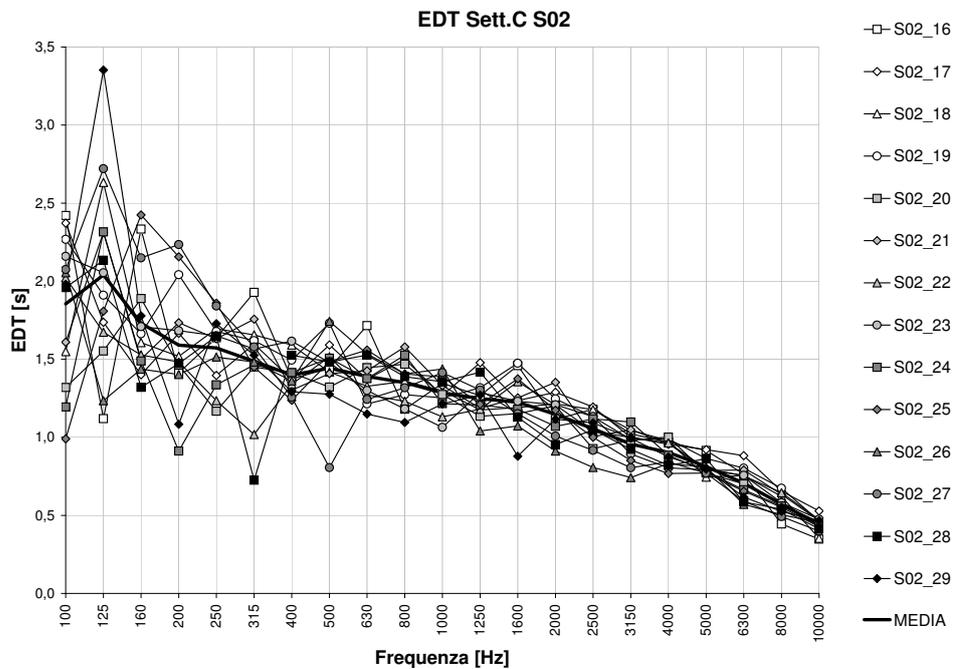


Figura 4.59: EDT analisi in frequenza settore C sorgente 02

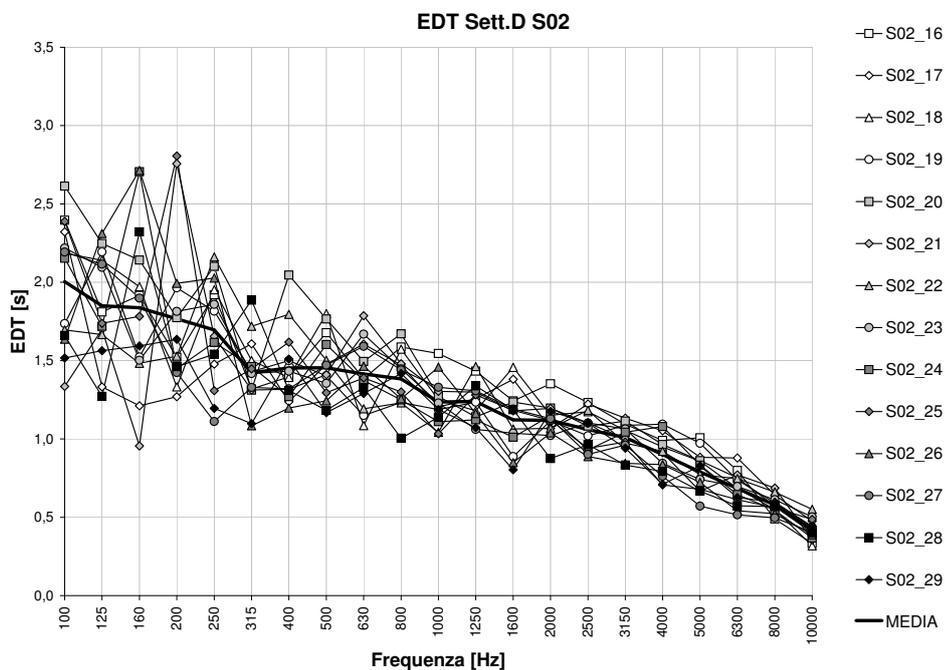


Figura 4.60: EDT analisi in frequenza settore D sorgente 02

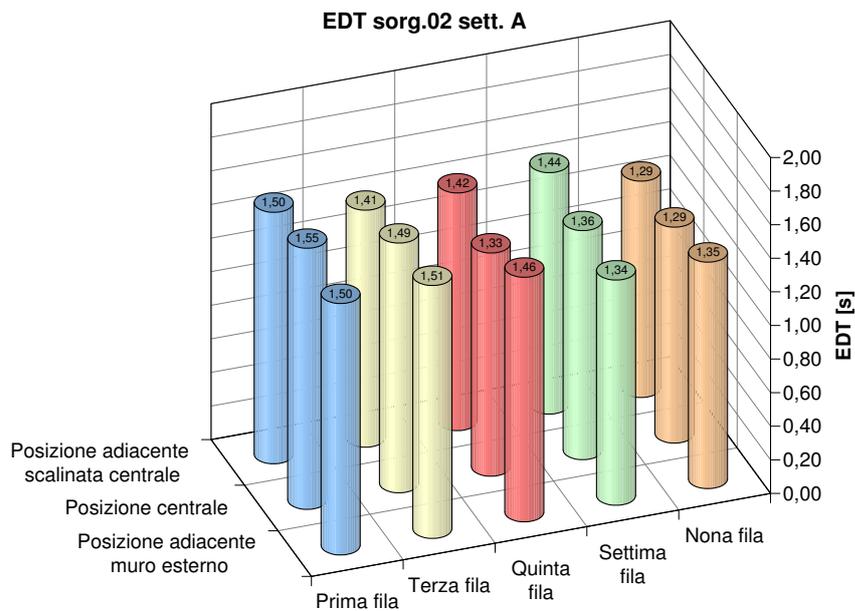


Figura 4.61: EDT media nei punti settore A sorgente 02

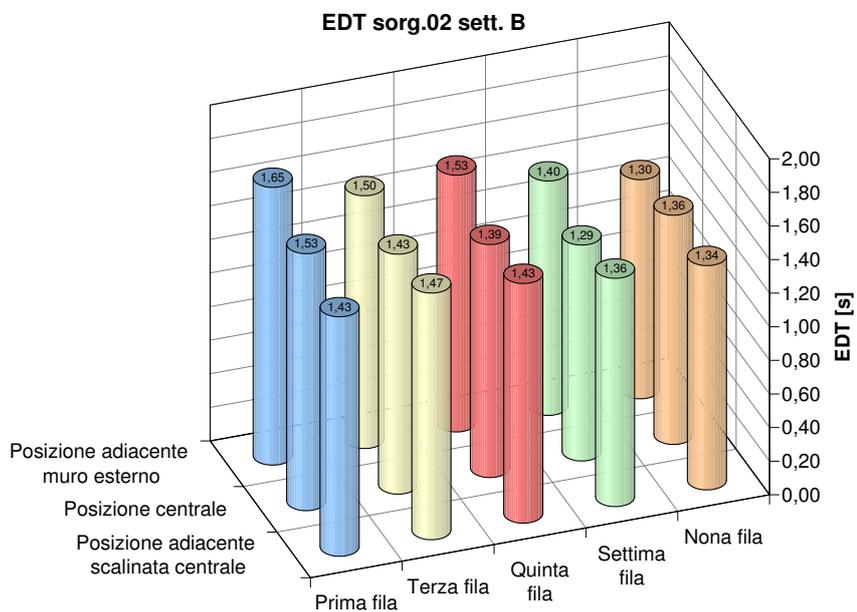


Figura 4.62: EDT media nei punti settore B sorgente 02

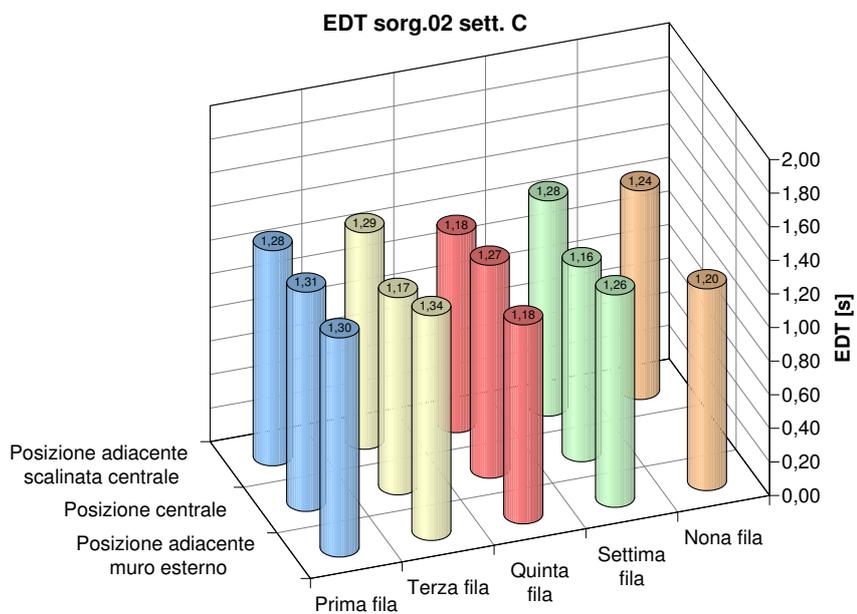


Figura 4.63: EDT media nei punti settore C sorgente 02

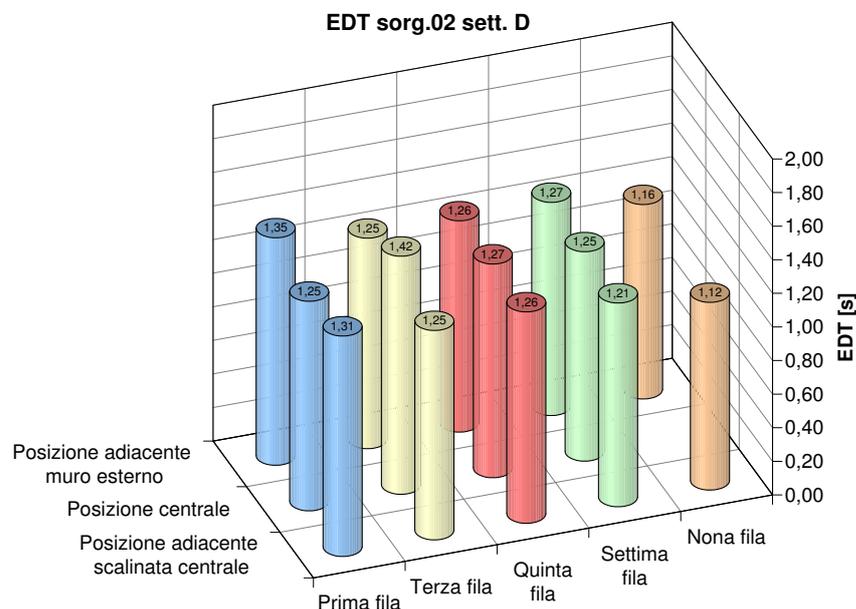


Figura 4.64: EDT media nei punti settore D sorgente 02

### Confronto con i valori di letteratura

L'EDT è un parametro che considerato in maniera unitaria ha un significato parziale, solitamente lo si mette in relazione ad altri parametri come per esempio il tempo di riverberazione. Questa analisi verrà effettuata nei successivi paragrafi. Tuttavia secondo le indicazioni di Jordan (1980) esso è ben collegato all'equilibrio tonale. Il giudizio su tale aspetto è positivo se non vi è grande diversità fra i valori a 250 Hz e a 2000 Hz, in modo tale che la loro differenza divisa per tre sia prossima al valore nullo. Tale verifica ha evidenziato un migliore comportamento nei settori A e B, comunque in tutta la sala si sono registrati valori massimi inferiori a 0,3 s.

## 4.5 Tempo di riverberazione, $T_{10}$

Il  $T_{10}$  è un parametro calcolato rapportando a -60 dB la pendenza media dei 10 dB del decadimento del livello di pressione sonora, compresi fra -5 dB e -15 dB.

### 4.5.1 Sorgente 01

#### Settore A

L'andamento della media del parametro fra i punti di misura è decrescente all'aumentare della frequenza (Figura 4.65). Il valore massimo del tempo di riverberazione si ha

a 100 Hz ed è pari a 2,01 s, il minimo è a 10 kHz pari a 0,52 s. La media totale di tutti i punti e tutte le frequenze è uguale a 1,37 s. I dati sono distribuiti in modo molto compatto attorno all'andamento medio, sono un po' più dispersi solamente alle basse frequenze. La distribuzione spaziale della media sui singoli punti risulta piuttosto uniforme (Figura 4.69), con differenze dell'ordine del decimo di secondo, si può notare che la vicinanza alla parete laterale fa aumentare il valore del parametro.

### **Settore B**

Andamento (Figura 4.66) simile a quello del settore A, ovvero decrescente con massimo a 100 Hz pari a 1,97 s, minimo a 10 kHz pari a 0,58 s e media totale fra i punti e le frequenze pari a 1,40 s. I dati risultano uniformemente compatti attorno alla media a esclusione delle basse frequenze. La distribuzione spaziale delle medie dei singoli punti è uniforme (Figura 4.70) e non evidenzia legami con la distanza dalla sorgente o dalla parete laterale.

### **Settore C**

Andamento della media pressochè identico agli altri settori, eccetto per le frequenze molto basse ove la media cresce con la frequenza fino al massimo a 160 Hz pari a 1,87 s (Figura 4.67), andamento decrescente fino al minimo a 10 kHz pari a 0,49 s. La media totale di tutto il settore risulta 1,32 s. I dati risultano leggermente dispersi solo alle basse frequenze. La distribuzione spaziale della media sui punti evidenzia omogeneità (Figura 4.71), si possono riconoscere solamente dei valori un po' più alti nei punti adiacenti il muro esterno.

### **Settore D**

Andamento della media pressochè identico al resto della sala (Figura 4.68). Massimo a 100 Hz pari a 2,09 s, valori decrescenti fino al minimo 0,45 s a 10 kHz. Il valore medio totale è pari a 1,38 s. La dispersione dei dati è la stessa degli altri settori: è presente solo alle basse frequenze. Distribuzione spaziale della media sui singoli punti molto uniforme senza particolari andamenti regolari (Figura 4.72).

## **4.5.2 Sorgente 02**

### **Settore A**

L'andamento della media del parametro fra i punti di misura è decrescente all'aumentare della frequenza (Figura 4.73). Il valore massimo del tempo di riverberazione si ha a 100 Hz ed è pari a 2,18 s, il minimo è a 10 kHz pari a 0,56 s. La media totale di tutti i punti e tutte le frequenze è uguale a 1,39 s. I dati sono distribuiti in modo molto compatto attorno all'andamento medio, sono un po' più dispersi solamente alle basse frequenze. La distribuzione spaziale della media sui singoli punti risulta piuttosto uniforme (Figura 4.77), con differenze dell'ordine del decimo di secondo, si può notare che i tempi si allungano leggermente in vicinanza della parete.

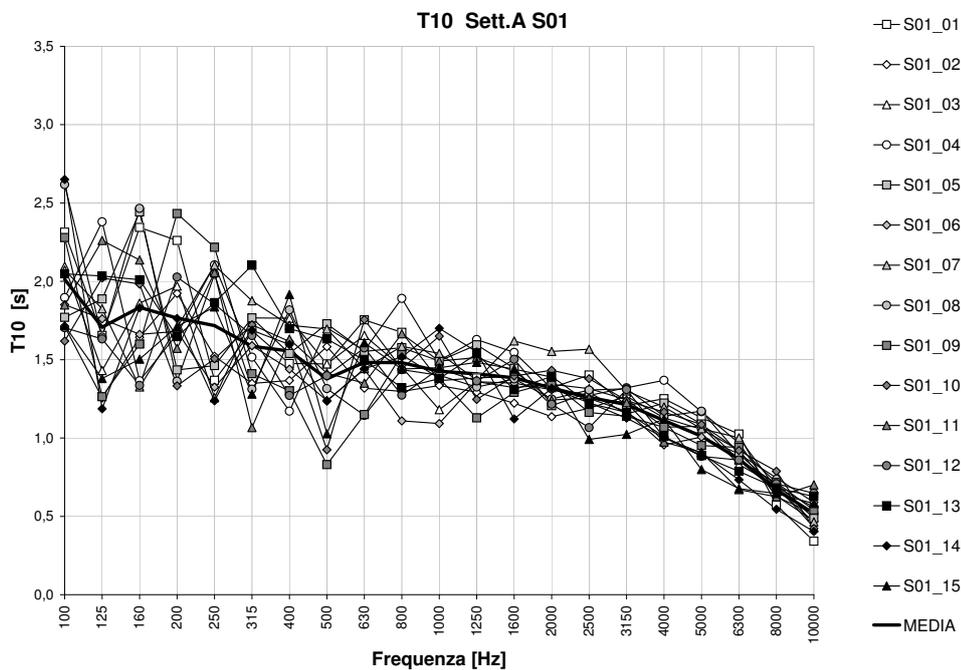


Figura 4.65:  $T_{10}$  analisi in frequenza settore A sorgente 01

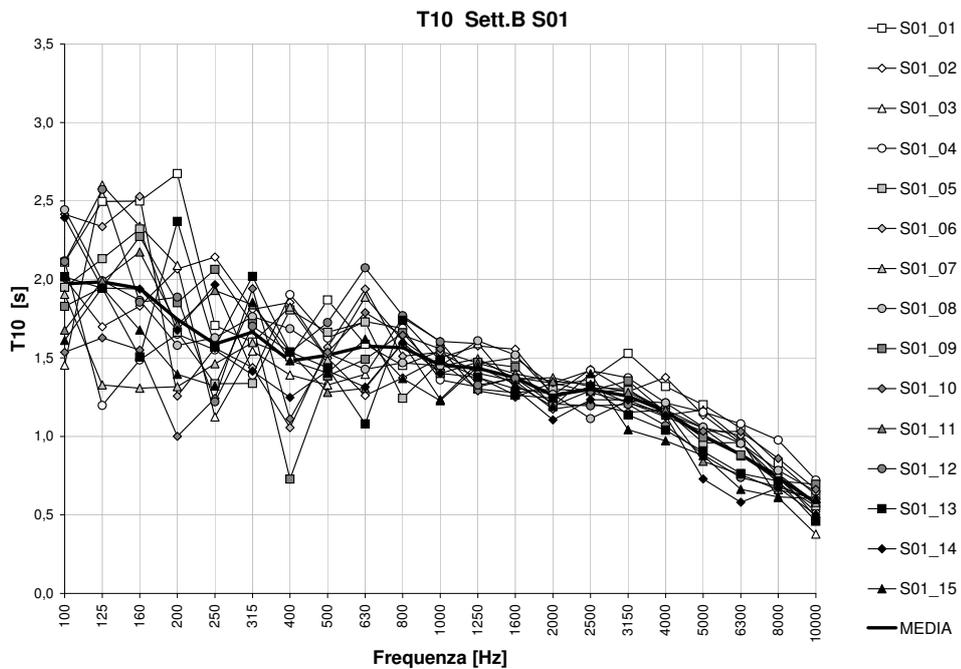
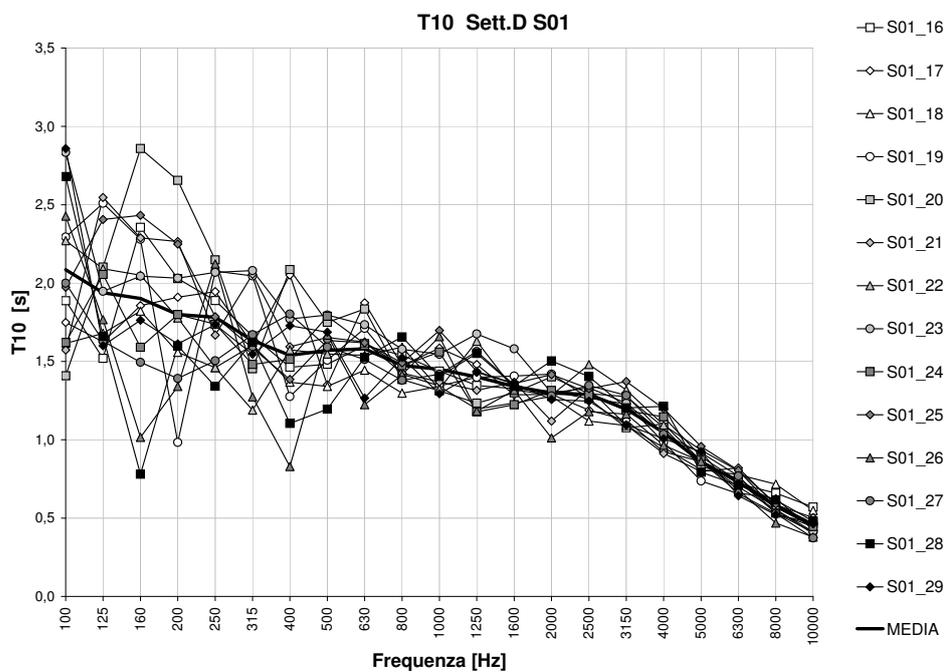


Figura 4.66:  $T_{10}$  analisi in frequenza settore B sorgente 01

Figura 4.67:  $T_{10}$  analisi in frequenza settore C sorgente 01Figura 4.68:  $T_{10}$  analisi in frequenza settore D sorgente 01

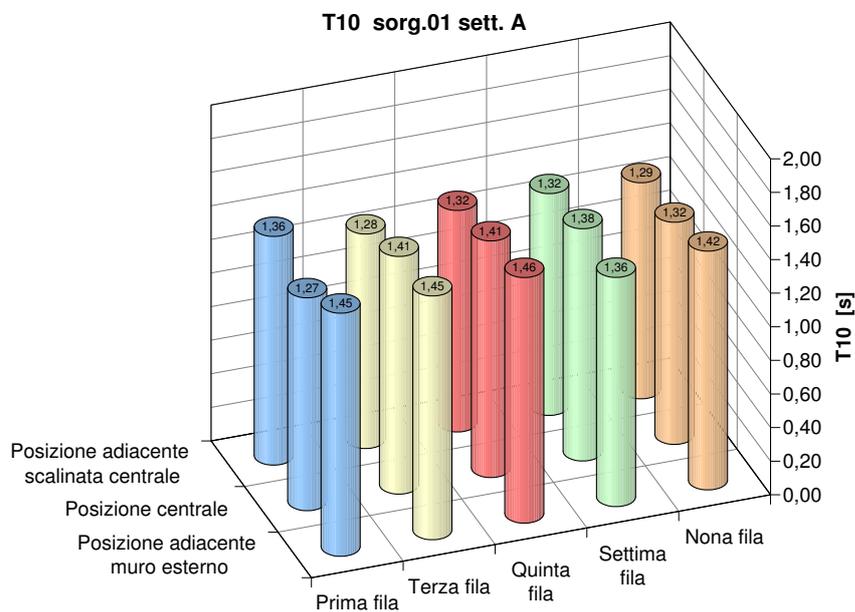


Figura 4.69:  $T_{10}$  media nei punti settore A sorgente 01

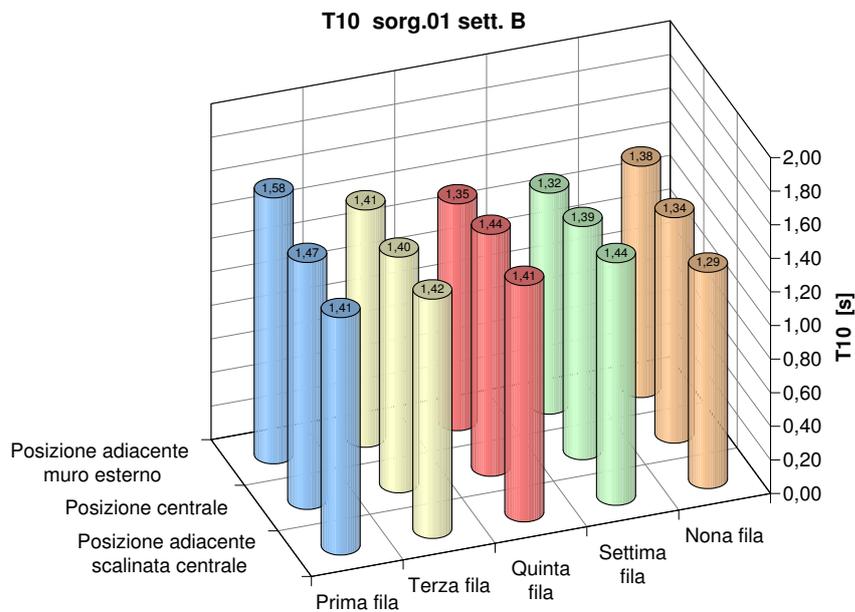


Figura 4.70:  $T_{10}$  media nei punti settore B sorgente 01

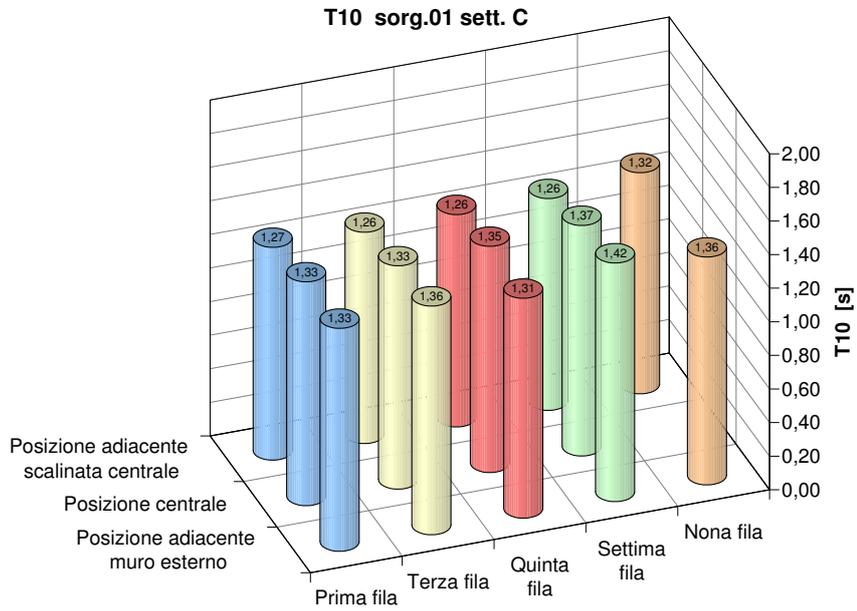


Figura 4.71:  $T_{10}$  media nei punti settore C sorgente 01

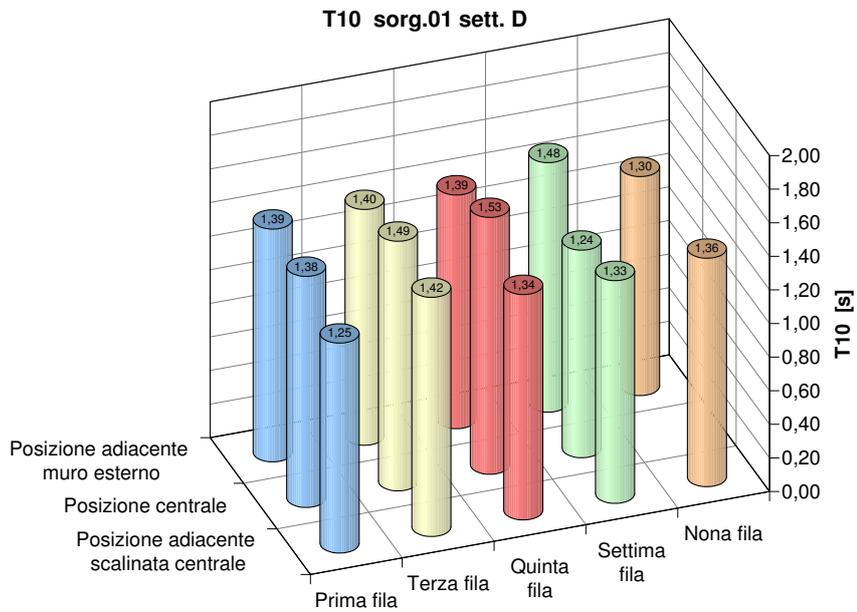


Figura 4.72:  $T_{10}$  media nei punti settore D sorgente 01

### Settore B

Andamento simile a quello del settore A (Figura 4.74), ovvero decrescente con massimo a 100 Hz pari a 1,96 s, minimo a 10 kHz pari a 0,62 s e media totale fra i punti e le frequenze pari a 1,43 s. I dati risultano uniformemente compatti attorno alla media a esclusione delle basse frequenze. La distribuzione spaziale delle medie dei singoli punti è uniforme e non evidenzia regolarità o legami con la distanza dalla sorgente o dalla parete laterale (Figura 4.78).

### Settore C

Andamento della media pressochè identico agli altri settori con massimo a 100 Hz pari a 2,10 s, andamento decrescente fino al minimo a 10 kHz pari a 0,49 s (Figura 4.75). La media totale di tutto il settore risulta 1,37 s. I dati risultano leggermente dispersi solo alle basse frequenze. La distribuzione spaziale delle media sui punti evidenzia omogeneità (Figura 4.79).

### Settore D

Andamento della media pressochè identico al resto della sala (Figura 4.76). Massimo a 125 Hz pari a 2,03 s, valori decrescenti fino al minimo 0,52 s a 10 kHz. Il valore medio totale è pari a 1,39 s. La dispersione dei dati è la stessa degli altri settori, è presente solo alle basse frequenze. Distribuzione spaziale della media sui singoli punti molto uniforme senza particolari andamenti irregolari (Figura 4.80).

## 4.5.3 Analisi dei valori

### Confronto fra il comportamento della sala con le sorgenti in posizione 01 e 02

Lo spostamento della sorgente sonora non provoca rilevanti variazioni sui valori medi del tempo di riverberazione. L'unica eccezione riguarda le prime file dei settori A e B: presentano livello più omogeneo e basso con la sorgente in posizione 02.

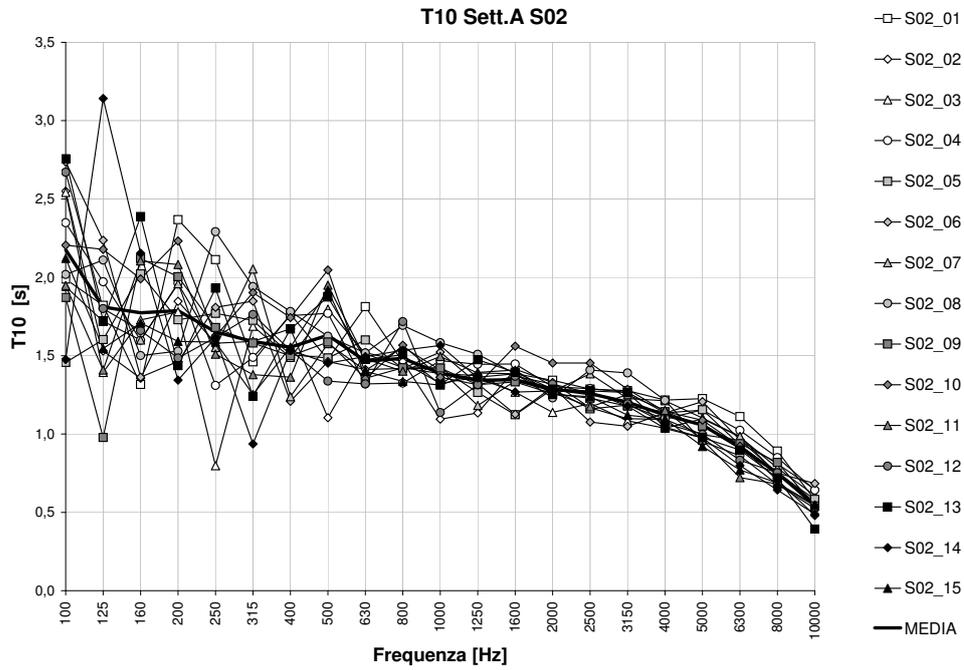
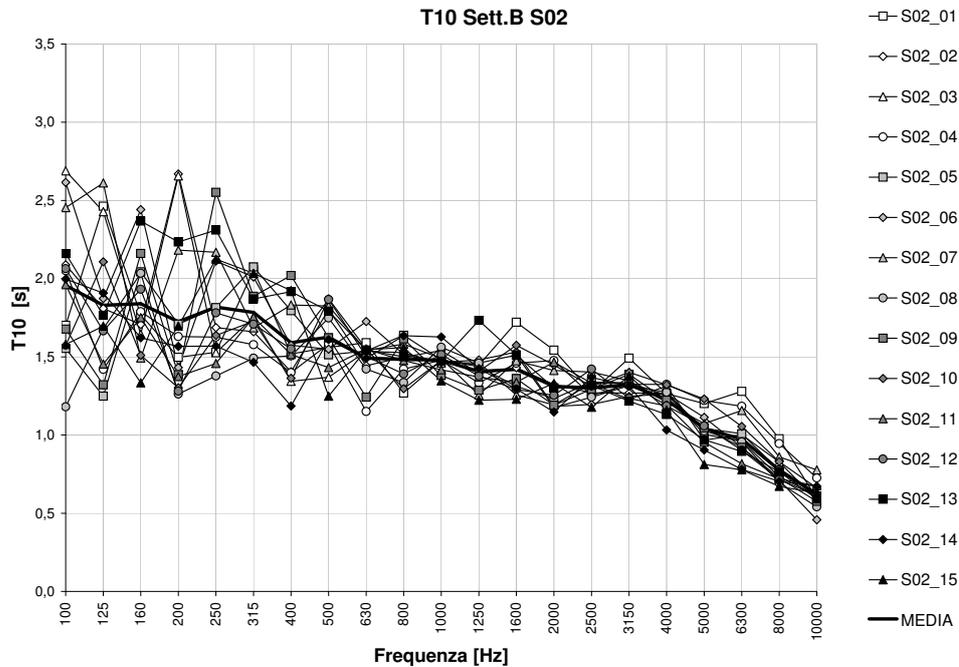
## 4.6 Tempo di riverberazione, $T_{20}$

Il  $T_{20}$  è un parametro introdotto da Kurer e Kurze (1967-1968) calcolato estrapolando a -60 dB la pendenza media dei 20 dB del decadimento del livello di pressione sonora compresi fra -5 dB e -25 dB.

### 4.6.1 Sorgente 01

#### Settore A

L'andamento della media del parametro fra i punti di misura è decrescente all'aumentare della frequenza (Figura 4.81). Il valore massimo del tempo di riverberazione si ha

Figura 4.73:  $T_{10}$  analisi in frequenza settore A sorgente 02Figura 4.74:  $T_{10}$  analisi in frequenza settore B sorgente 02

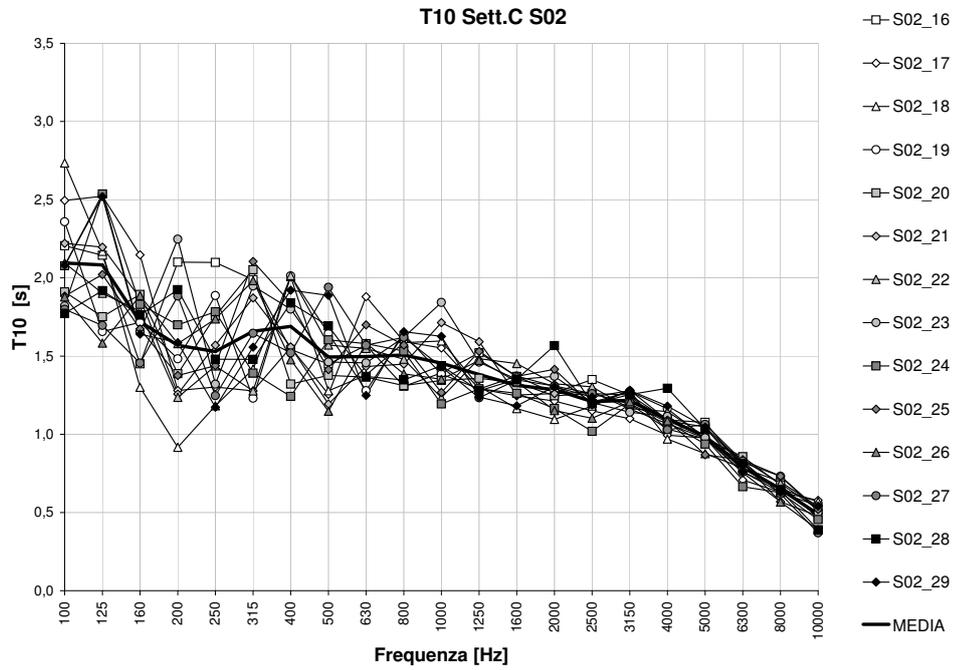


Figura 4.75:  $T_{10}$  analisi in frequenza settore C sorgente 02

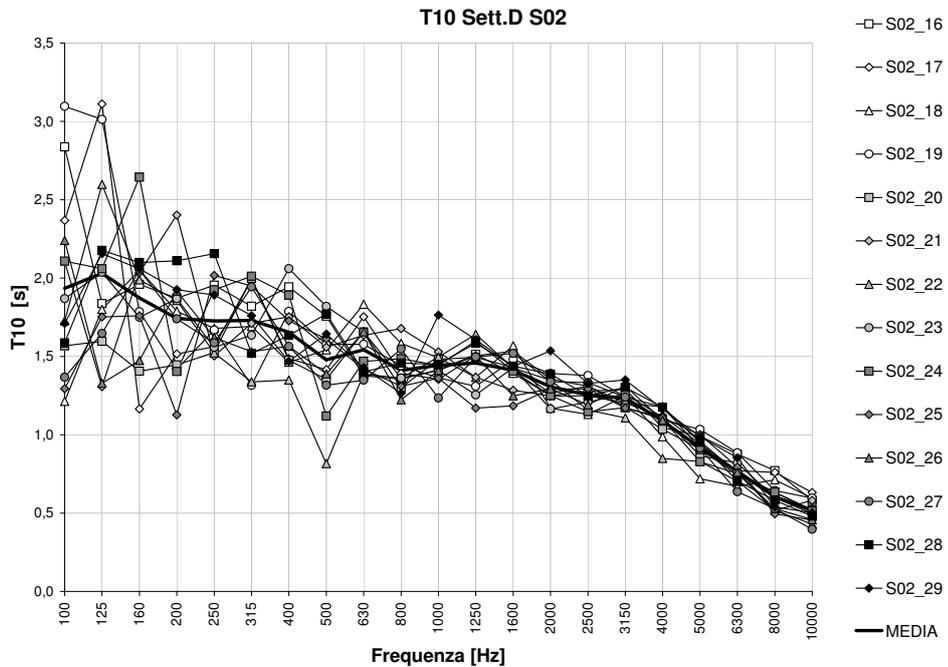


Figura 4.76:  $T_{10}$  analisi in frequenza settore D sorgente 02

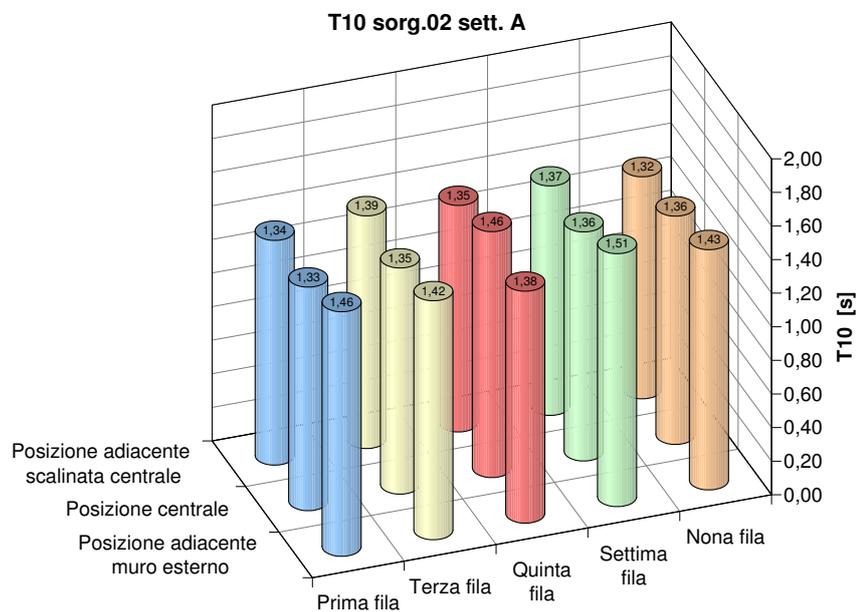


Figura 4.77:  $T_{10}$  media nei punti settore A sorgente 02

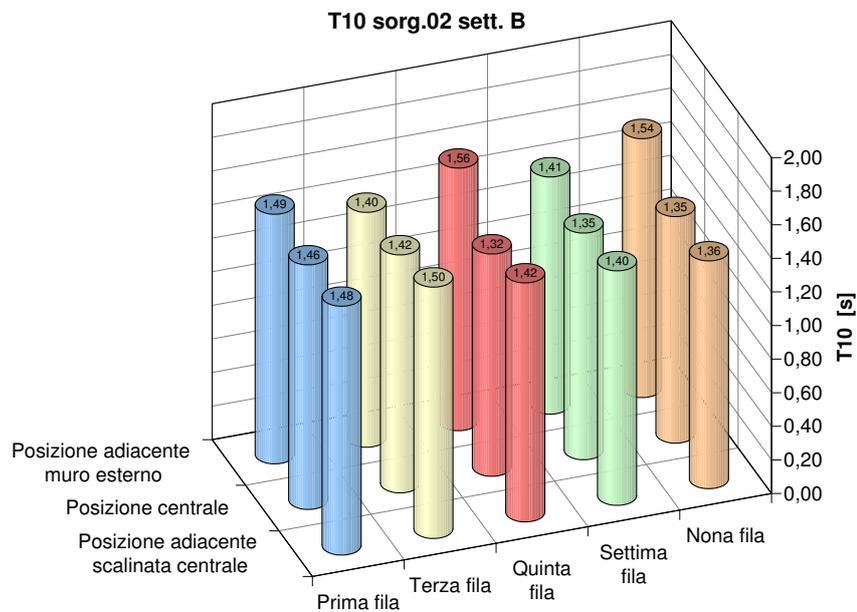


Figura 4.78:  $T_{10}$  media nei punti settore B sorgente 02

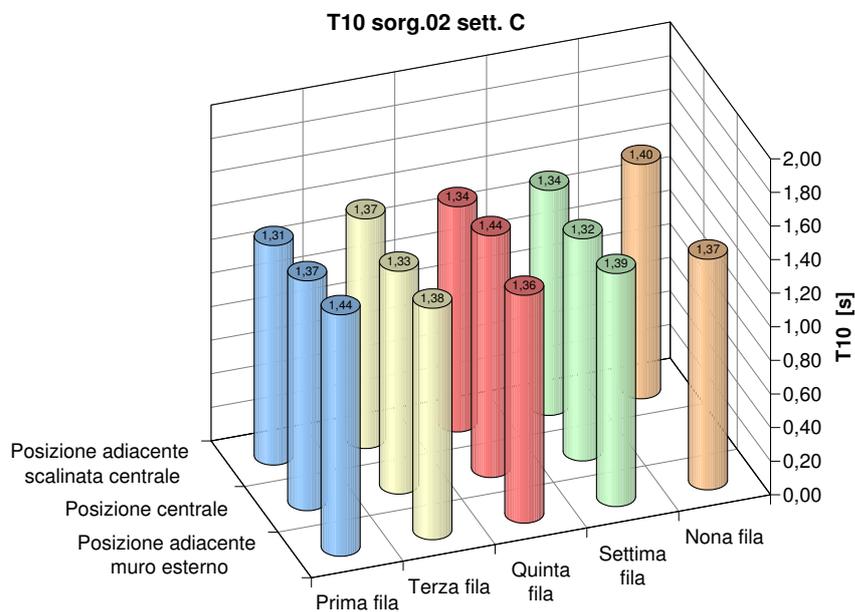


Figura 4.79:  $T_{10}$  media nei punti settore C sorgente 02

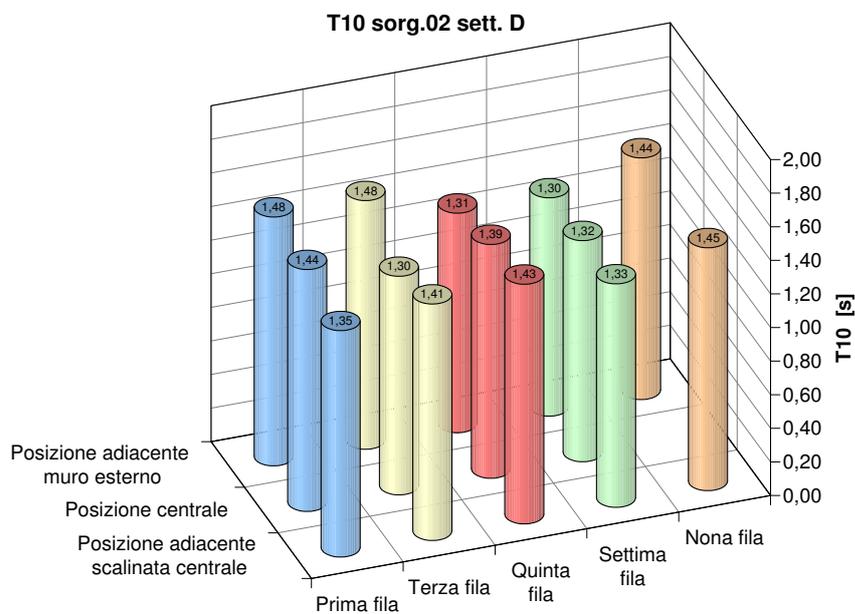


Figura 4.80:  $T_{10}$  media nei punti settore D sorgente 02

a 100 Hz ed è pari a 1,90 s, il minimo è a 10 kHz pari a 0,55 s. La media totale di tutti i punti e tutte le frequenze è uguale a 1,35 s. I dati sono distribuiti in modo molto compatto attorno all'andamento medio, sono un po' più dispersi solamente alle basse frequenze. La distribuzione spaziale della media sui singoli punti risulta piuttosto uniforme (Figura 4.85), con differenze dell'ordine del decimo di secondo, si può notare che i tempi si allungano leggermente all'allontanarsi dalla sorgente e che la vicinanza alla parete laterale fa aumentare il valore del parametro.

### **Settore B**

Andamento (Figura 4.82) simile a quello del settore A, ovvero decrescente con massimo a 100 Hz pari a 1,88 s, minimo a 10 kHz pari a 0,57 s e media totale fra i punti e le frequenze pari a 1,36 s. I dati risultano uniformemente compatti attorno alla media a esclusione delle basse frequenze. La distribuzione spaziale delle medie dei singoli punti è uniforme (Figura 4.86) e evidenzia un aumento di valori medi in vicinanza della sorgente.

### **Settore C**

Andamento della media pressochè identico agli altri settori con massimo a 160 Hz pari a 1,75 s (Figura 4.83), andamento decrescente fino al minimo a 10 kHz pari a 0,49 s. La media totale di tutto il settore risulta 1,32 s. I dati risultano leggermente dispersi solo alle basse frequenze. La distribuzione spaziale delle media sui punti evidenzia omogeneità (Figura 4.87), si possono riconoscere solamente dei valori un po' più alti nei punti adiacenti alla parete.

### **Settore D**

Andamento della media pressochè identico al resto della sala (Figura 4.84). Massimo a 125 Hz pari a 1,93 s, valori decrescenti fino al minimo 0,47 s a 10 kHz. Presenza di un minimo relativo a 250 Hz. Il valore medio totale è pari a 1,36 s. La dispersione dei dati è la stessa degli altri settori, è presente solo alle basse frequenze. Distribuzione spaziale della media sui singoli punti molto uniforme con valori leggermente più alti in prossimità della parete (Figura 4.88).

## **4.6.2 Sorgente 02**

### **Settore A**

L'andamento della media del parametro fra i punti di misura è decrescente all'aumentare della frequenza (Figura 4.89). Il valore massimo del tempo di riverberazione si ha a 100 Hz ed è pari a 1,90 s, il minimo è a 10 kHz pari a 0,57 s. La media totale di tutti i punti e tutte le frequenze è uguale a 1,36 s. I dati sono distribuiti in modo molto compatto attorno all'andamento medio, sono un po' più dispersi solamente alle basse frequenze. La distribuzione spaziale della media sui singoli punti risulta piuttosto uniforme (Figura 4.93), con differenze dell'ordine del decimo di secondo.

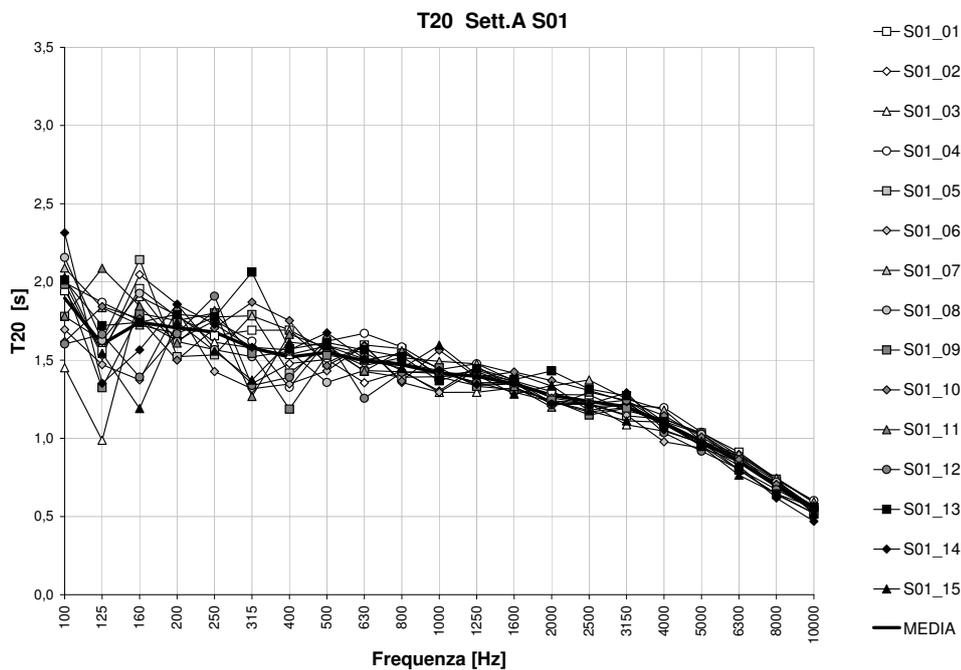


Figura 4.81:  $T_{20}$  analisi in frequenza settore A sorgente 01

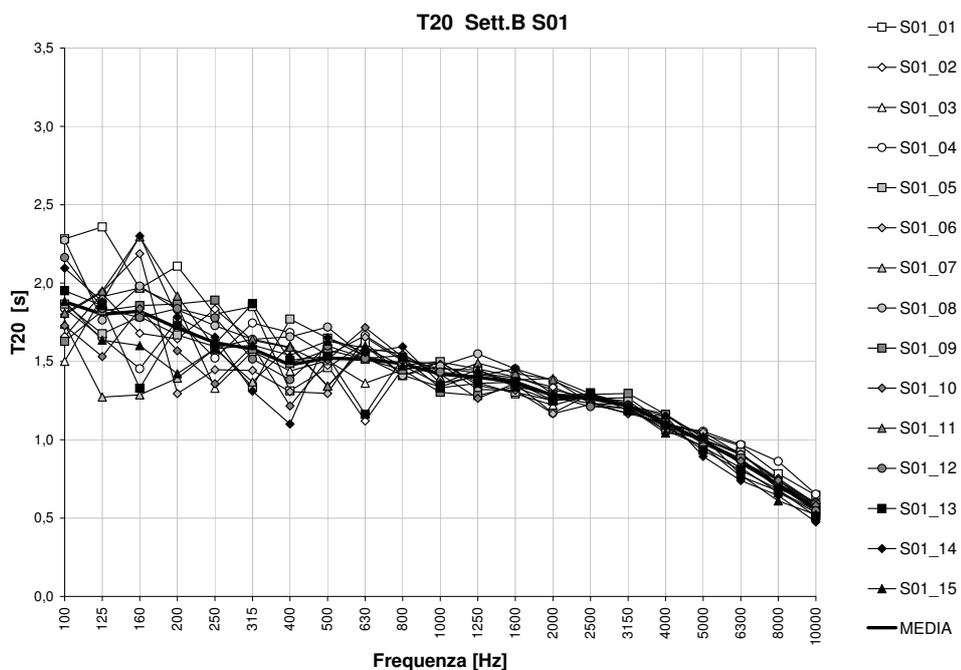
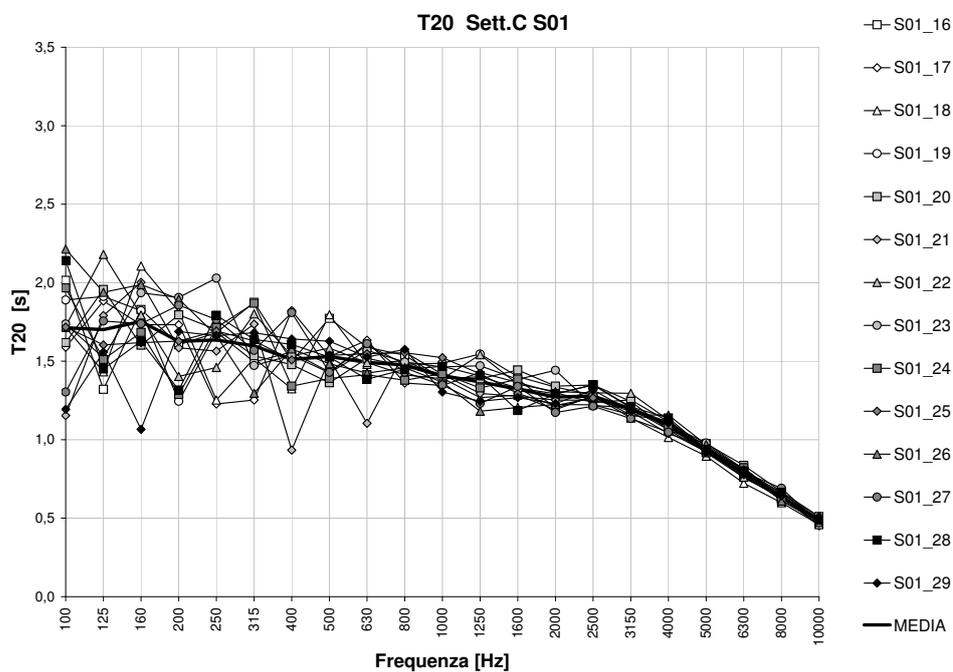
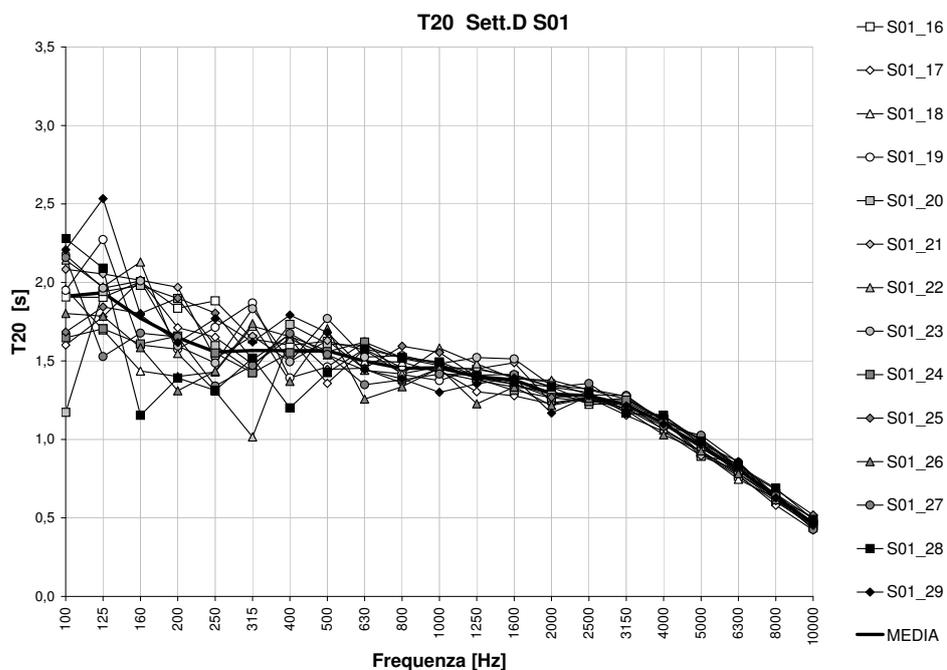


Figura 4.82:  $T_{20}$  analisi in frequenza settore B sorgente 01

Figura 4.83:  $T_{20}$  analisi in frequenza settore C sorgente 01Figura 4.84:  $T_{20}$  analisi in frequenza settore D sorgente 01

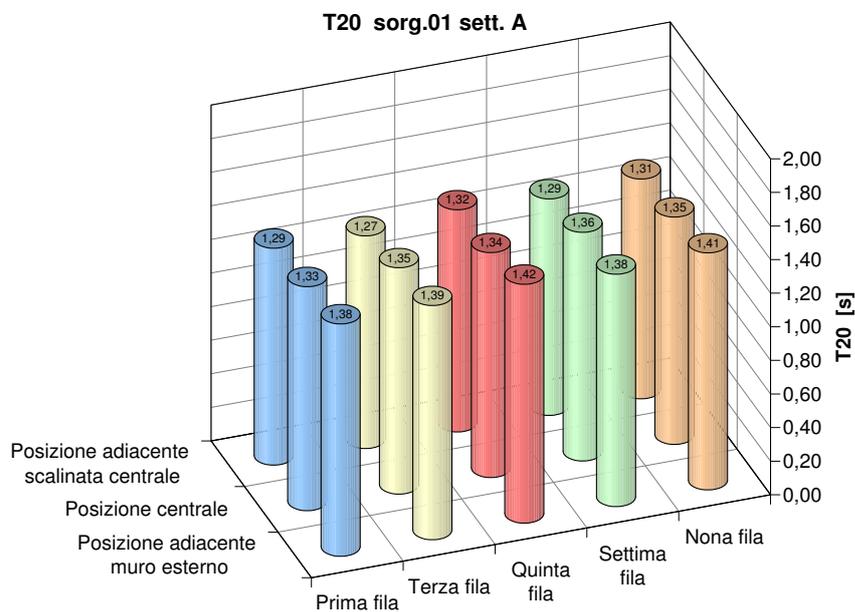


Figura 4.85:  $T_{20}$  media nei punti settore A sorgente 01

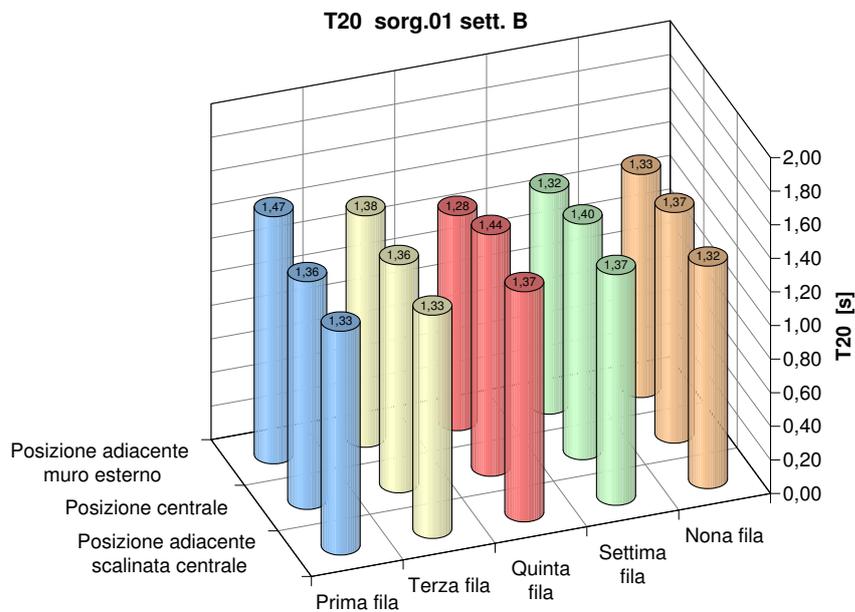


Figura 4.86:  $T_{20}$  media nei punti settore B sorgente 01

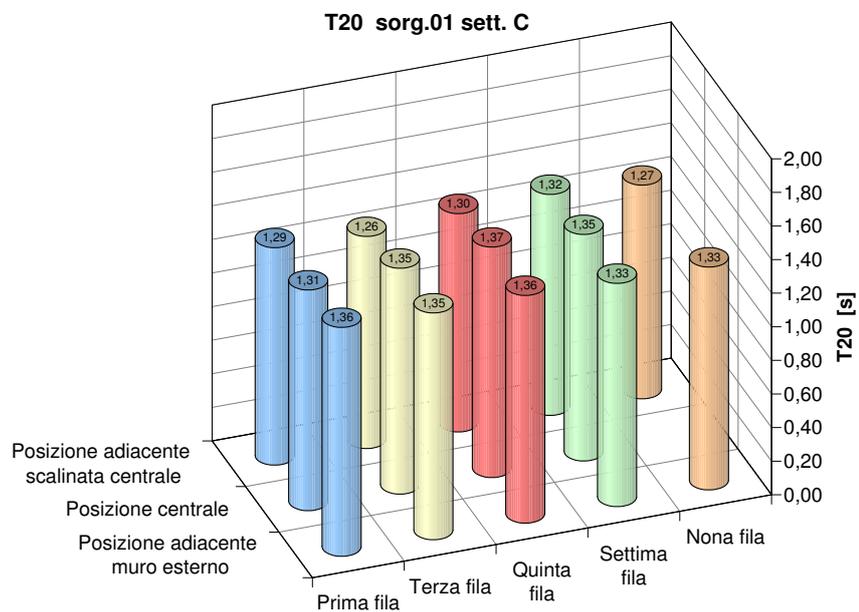


Figura 4.87:  $T_{20}$  media nei punti settore C sorgente 01

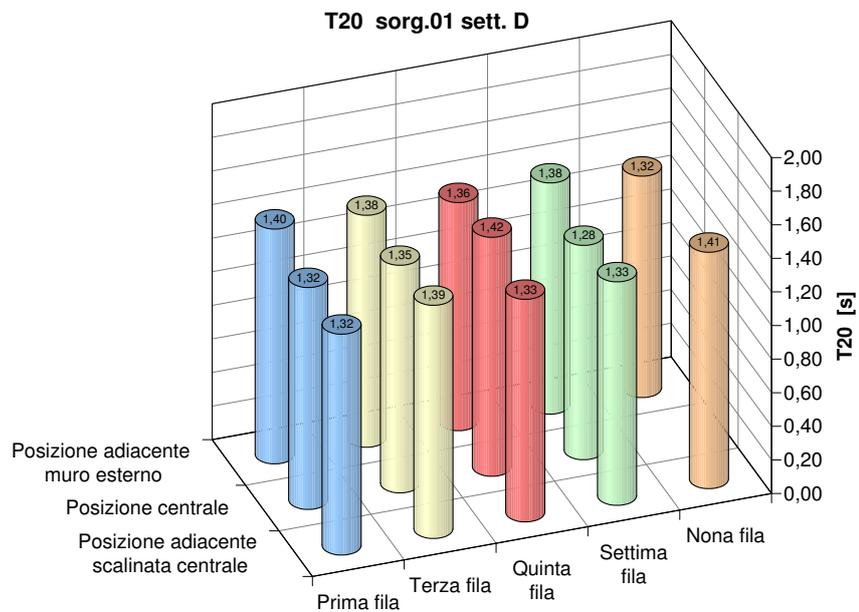


Figura 4.88:  $T_{20}$  media nei punti settore D sorgente 01

### **Settore B**

Andamento simile a quello del settore A (Figura 4.90), ovvero decrescente con massimo a 100 Hz pari a 1,89 s, minimo a 10 kHz pari a 0,59 s e media totale fra i punti e le frequenze pari a 1,37 s. I dati risultano uniformemente compatti attorno alla media a esclusione delle basse frequenze. La distribuzione spaziale delle medie dei singoli punti è uniforme e non evidenzia regolarità o legami con la distanza dalla sorgente o dalla parete laterale (Figura 4.94).

### **Settore C**

Andamento della media pressochè identico agli altri settori con massimo a 100 Hz pari a 1,91 s, andamento decrescente fino al minimo a 10 kHz pari a 0,53 s (Figura 4.91). La media totale di tutto il settore risulta 1,34 s. I dati risultano leggermente dispersi solo alle basse frequenze. La distribuzione spaziale delle media sui punti evidenzia omogeneità (Figura 4.95), si riconosce solamente una leggera diminuzione nella fila centrale.

### **Settore D**

Andamento della media pressochè identico al resto della sala (Figura 4.92). Massimo a 160 Hz pari a 1,82 s, valori decrescenti fino al minimo 0,50 s a 10 kHz. Il valore medio totale è pari a 1,37 s. La dispersione dei dati è la stessa degli altri settori, è presente solo alle basse frequenze. Distribuzione spaziale della media sui singoli punti molto uniforme senza particolari andamenti regolari (Figura 4.96).

## **4.6.3 Analisi dei valori**

### **Confronto fra il comportamento della sala con le sorgenti in posizione 01 e 02**

Lo spostamento della sorgente sonora non provoca rilevanti variazioni sui valori medi del tempo di riverberazione. L'unica eccezione riguarda le posizioni nei pressi delle pareti che risultano leggermente più alte con la sorgente in posizione 02.

## **4.7 Tempo di riverberazione, $T_{30}$**

Il  $T_{30}$  è un parametro calcolato estrapolando a -60 dB la pendenza media dei 30 dB del decadimento del livello di pressione sonora compresi fra -5 dB e -35 dB.

### **4.7.1 Sorgente 01**

#### **Settore A**

L'andamento della media del parametro fra i punti di misura è decrescente all'aumentare della frequenza (Figura 4.97). Il valore massimo del tempo di riverberazione si ha

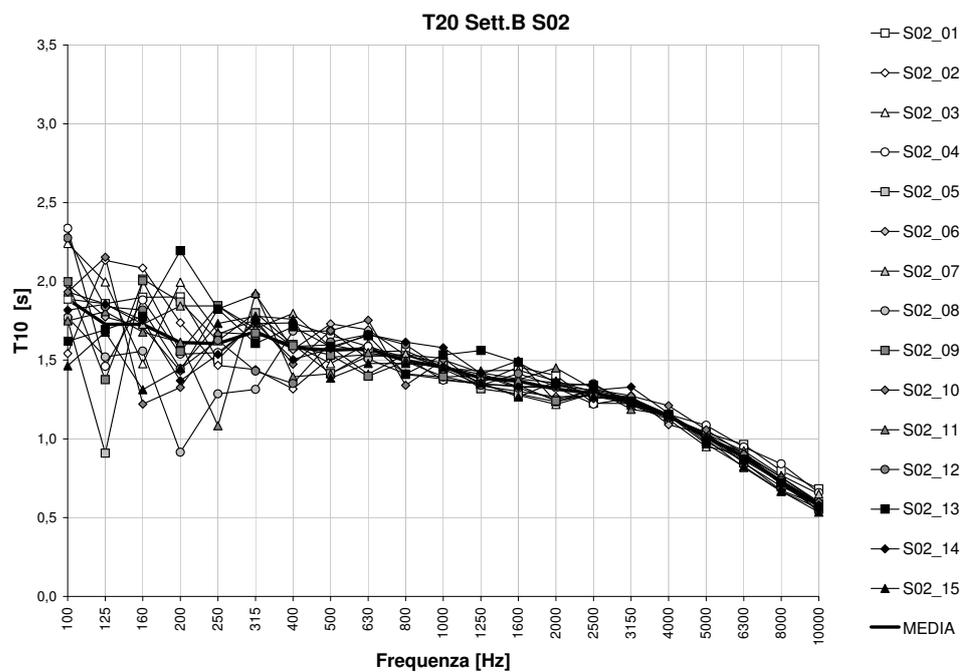
Figura 4.89:  $T_{20}$  analisi in frequenza settore A sorgente 02Figura 4.90:  $T_{20}$  analisi in frequenza settore B sorgente 02



Figura 4.91:  $T_{20}$  analisi in frequenza settore C sorgente 02

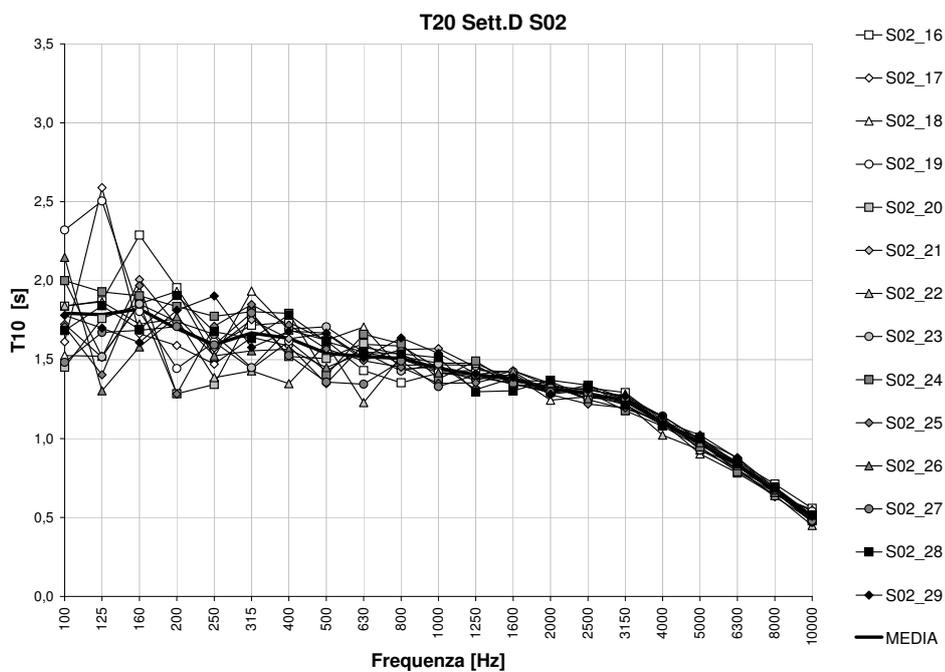


Figura 4.92:  $T_{20}$  analisi in frequenza settore D sorgente 02

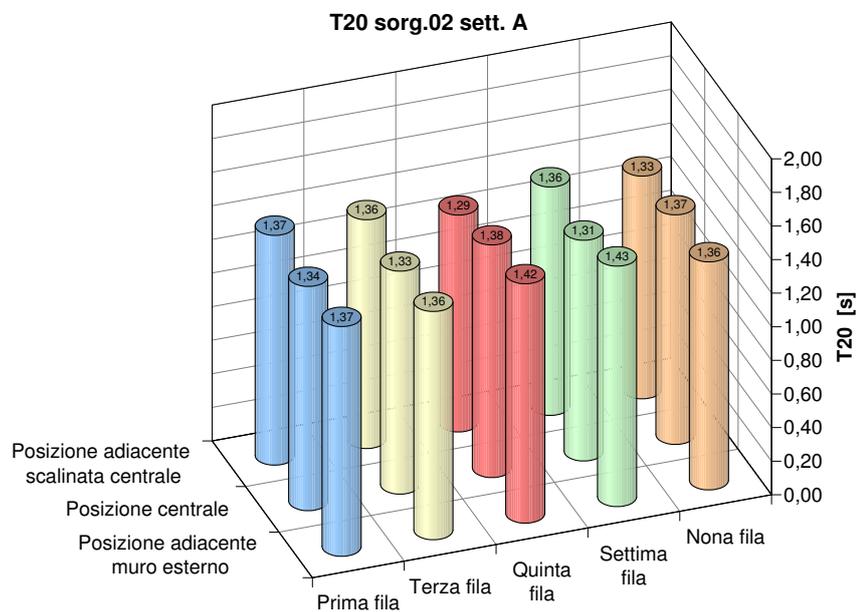


Figura 4.93:  $T_{20}$  media nei punti settore A sorgente 02

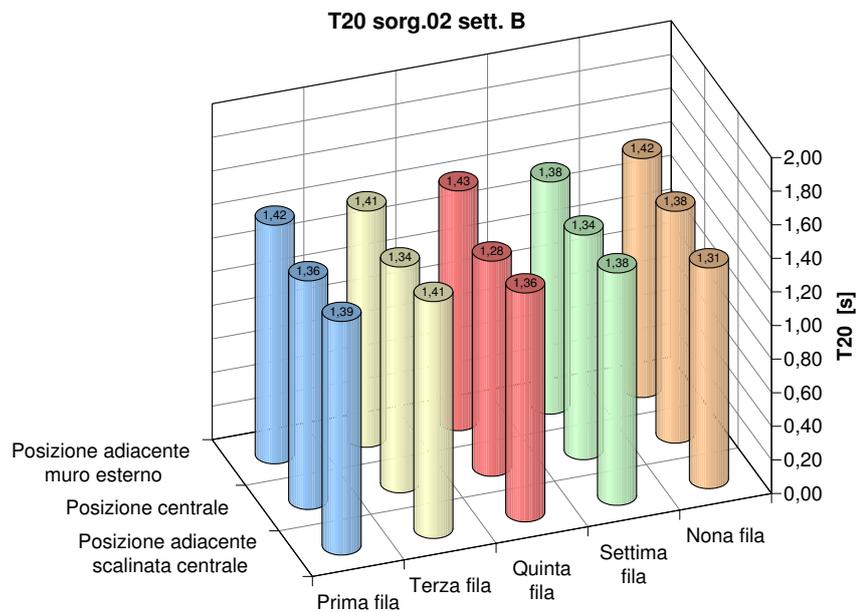


Figura 4.94:  $T_{20}$  media nei punti settore B sorgente 02

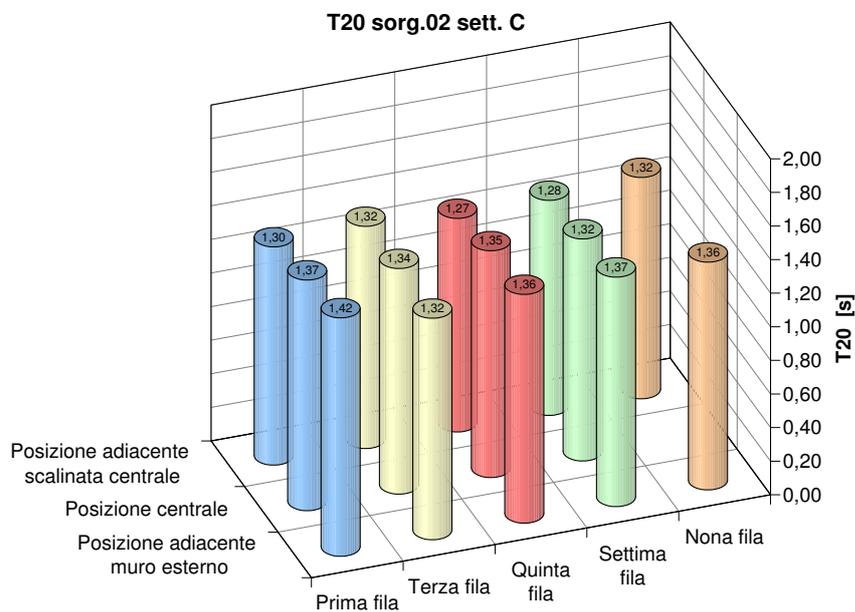


Figura 4.95:  $T_{20}$  media nei punti settore C sorgente 02

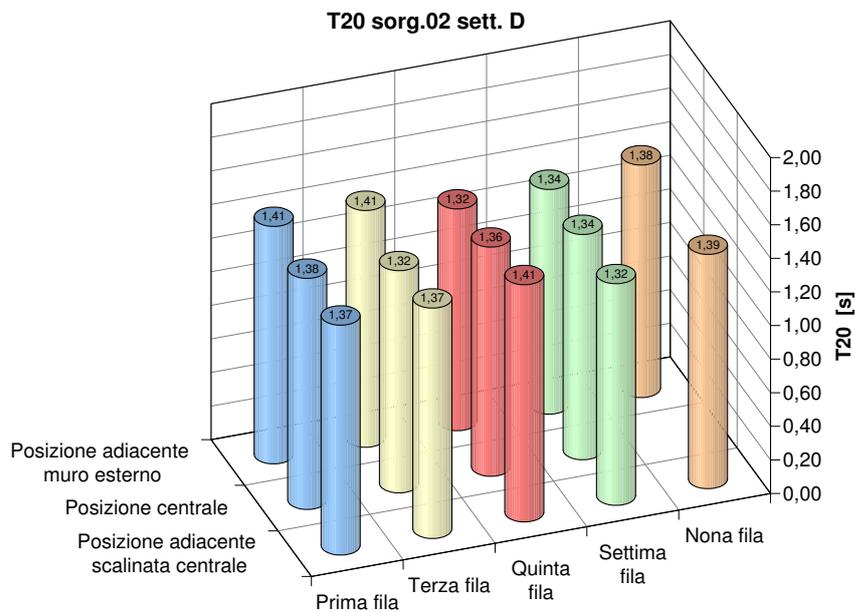


Figura 4.96:  $T_{20}$  media nei punti settore D sorgente 02

a 100 Hz ed è pari a 1,92 s, il minimo è a 10 kHz pari a 0,55 s. La media totale di tutti i punti e tutte le frequenze è uguale a 1,37 s. I dati sono distribuiti in modo molto compatto attorno all'andamento medio, sono un po' più dispersi solamente alle basse frequenze. La distribuzione spaziale della media sui singoli punti risulta piuttosto uniforme (Figura 4.101), con differenze dell'ordine del decimo di secondo, si può notare che i tempi si allungano leggermente all'allontanarsi dalla sorgente e che la vicinanza alla parete laterale fa aumentare il valore del parametro.

### **Settore B**

Andamento (Figura 4.98) simile a quello del settore A, ovvero decrescente con massimo a 100 Hz pari a 1,97 s, minimo a 10 kHz pari a 0,56 s e media totale fra i punti e le frequenze pari a 1,38 s. I dati risultano uniformemente compatti attorno alla media a esclusione delle basse frequenze. La distribuzione spaziale delle medie dei singoli punti è uniforme (Figura 4.102) e non evidenzia legami con la distanza dalla sorgente o dalla parete laterale.

### **Settore C**

Andamento della media pressochè identico agli altri settori con massimo a 100 Hz pari a 1,82 s (Figura 4.99), andamento decrescente fino al minimo a 10 kHz pari a 0,50 s. La media totale di tutto il settore risulta 1,36 s. I dati risultano leggermente dispersi solo alle basse frequenze. La distribuzione spaziale delle media sui punti evidenzia omogeneità (Figura 4.103), si possono riconoscere solamente dei valori un po' più alti nei punti centrali di ogni fila.

### **Settore D**

Andamento della media pressochè identico al resto della sala (Figura 4.100). Massimo a 100 Hz pari a 1,92 s, valori decrescenti fino al minimo 0,48 s a 10 kHz. Presenza di un minimo relativo a 250 Hz. Il valore medio totale è pari a 1,38 s. La dispersione dei dati è la stessa degli altri settori, è presente solo alle basse frequenze. Distribuzione spaziale della media sui singoli punti molto uniforme senza particolari andamenti regolari (Figura 4.104).

## **4.7.2 Sorgente 02**

### **Settore A**

L'andamento della media del parametro fra i punti di misura è decrescente all'aumentare della frequenza (Figura 4.105). Il valore massimo del tempo di riverberazione si ha a 100 Hz ed è pari a 1,88 s, il minimo è a 10 kHz pari a 0,55 s. La media totale di tutti i punti e tutte le frequenze è uguale a 1,38 s. I dati sono distribuiti in modo molto compatto attorno all'andamento medio, sono un po' più dispersi solamente alle basse

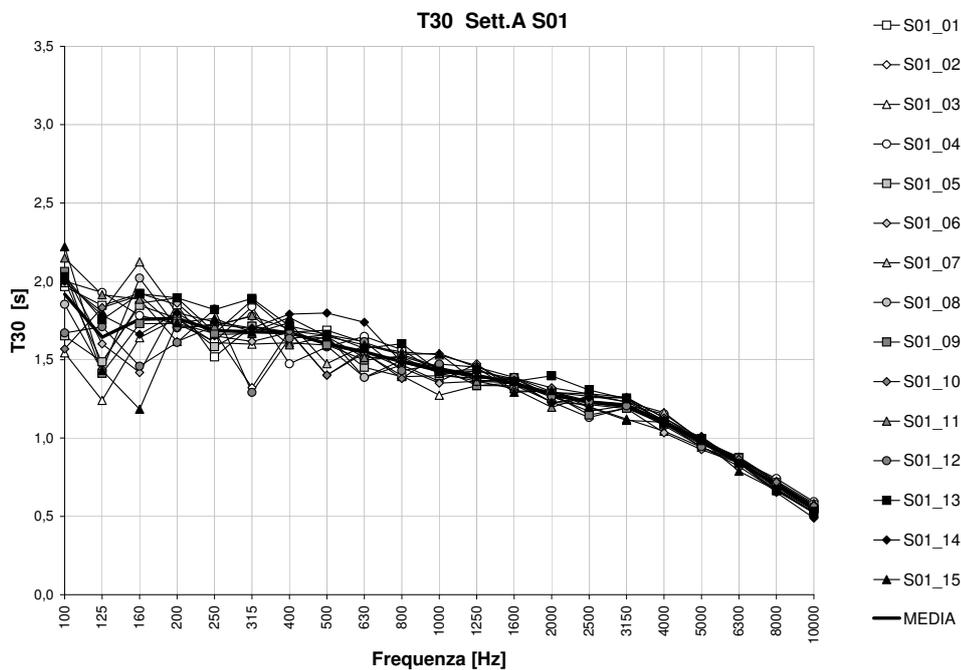


Figura 4.97:  $T_{30}$  analisi in frequenza settore A sorgente 01

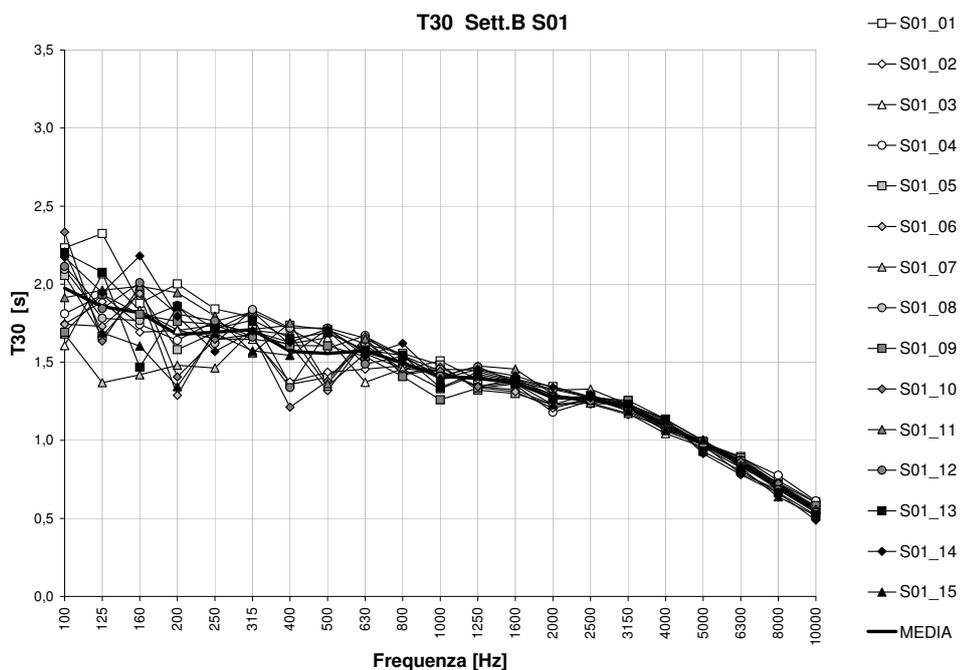
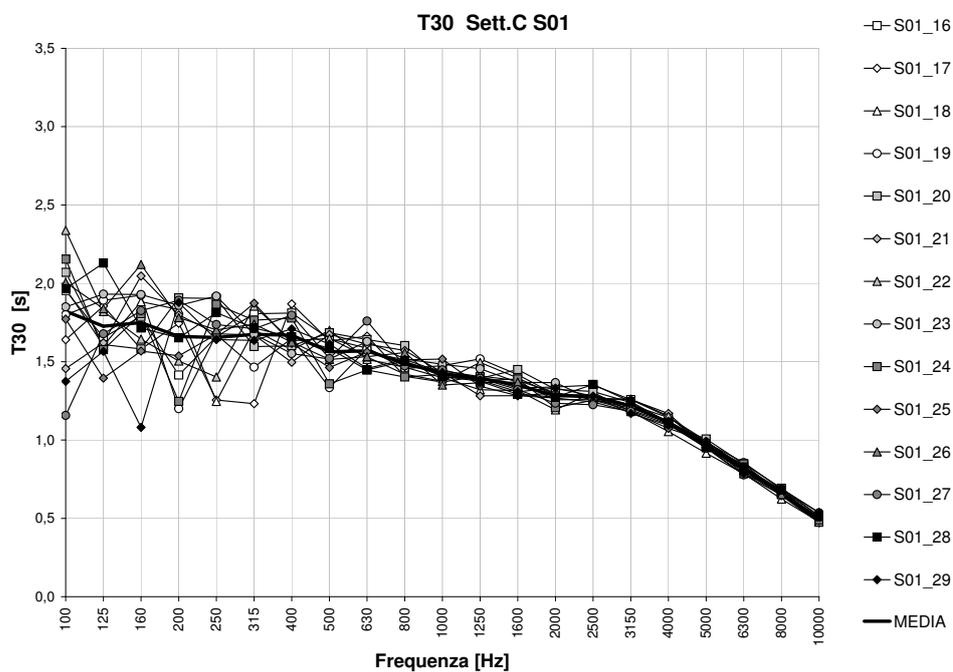


Figura 4.98:  $T_{30}$  analisi in frequenza settore B sorgente 01

Figura 4.99:  $T_{30}$  analisi in frequenza settore C sorgente 01Figura 4.100:  $T_{30}$  analisi in frequenza settore D sorgente 01

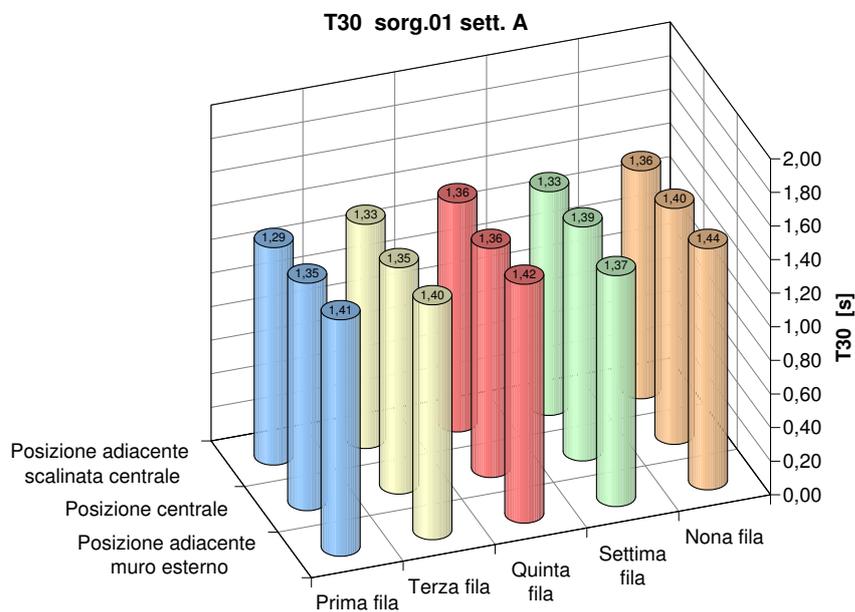


Figura 4.101:  $T_{30}$  media nei punti settore A sorgente 01

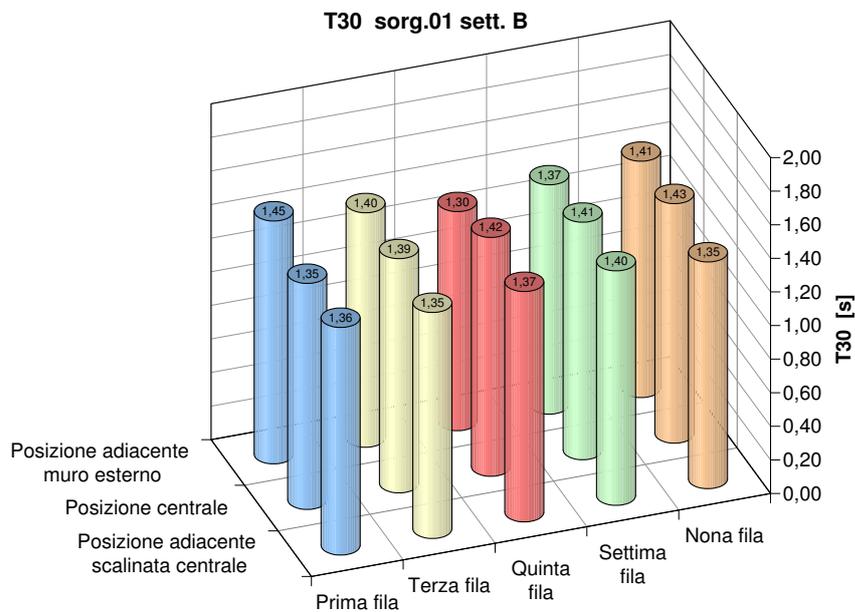


Figura 4.102:  $T_{30}$  media nei punti settore B sorgente 01

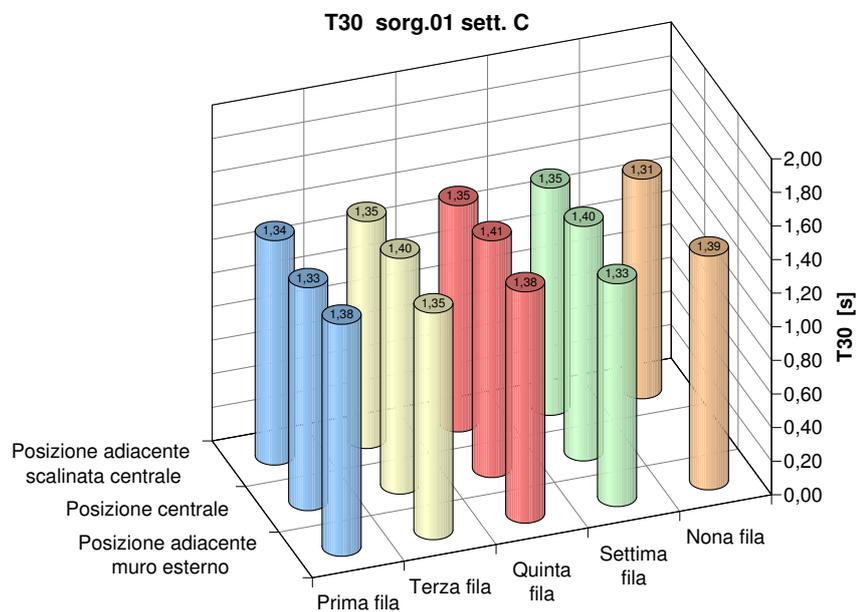


Figura 4.103:  $T_{30}$  media nei punti settore C sorgente 01

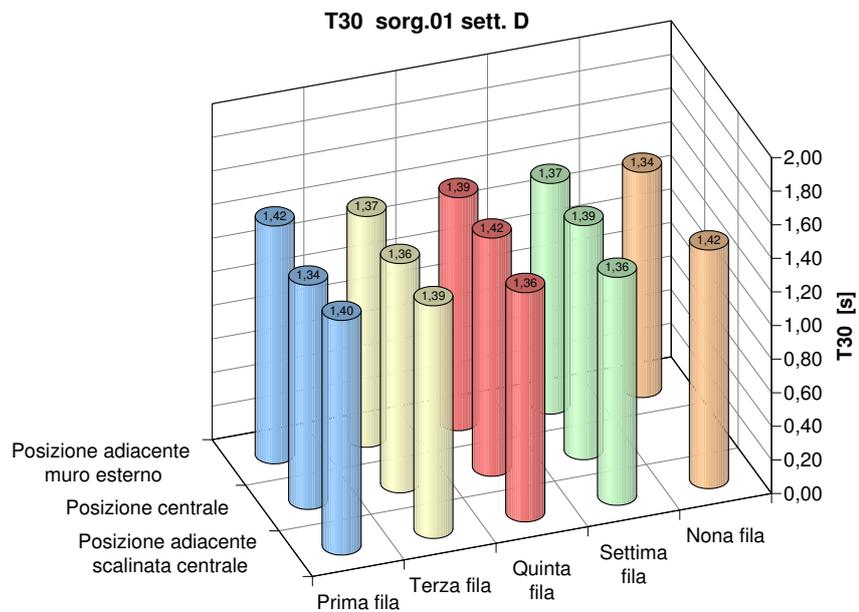


Figura 4.104:  $T_{30}$  media nei punti settore D sorgente 01

frequenze. La distribuzione spaziale della media sui singoli punti risulta piuttosto uniforme (Figura 4.109), con differenze dell'ordine del decimo di secondo, si può notare che i tempi si allungano leggermente all'allontanarsi dalla sorgente.

### **Settore B**

Andamento simile a quello del settore A (Figura 4.106), ovvero decrescente con massimo a 100 Hz pari a 1,90 s, minimo a 10 kHz pari a 0,57 s e media totale fra i punti e le frequenze pari a 1,39 s. I dati risultano uniformemente compatti attorno alla media a esclusione delle basse frequenze. La distribuzione spaziale delle medie dei singoli punti è uniforme e non evidenzia regolarità o legami con la distanza dalla sorgente o dalla parete laterale (Figura 4.110).

### **Settore C**

Andamento della media pressochè identico agli altri settori con massimo a 100 Hz pari a 1,95 s, andamento decrescente fino al minimo a 10 kHz pari a 0,53 s (Figura 4.107). La media totale di tutto il settore risulta 1,37 s. I dati risultano leggermente dispersi solo alle basse frequenze. La distribuzione spaziale delle media sui punti evidenzia omogeneità (Figura 4.111), si riconosce solamente una leggera diminuzione dei valori spostandosi verso le ultime file.

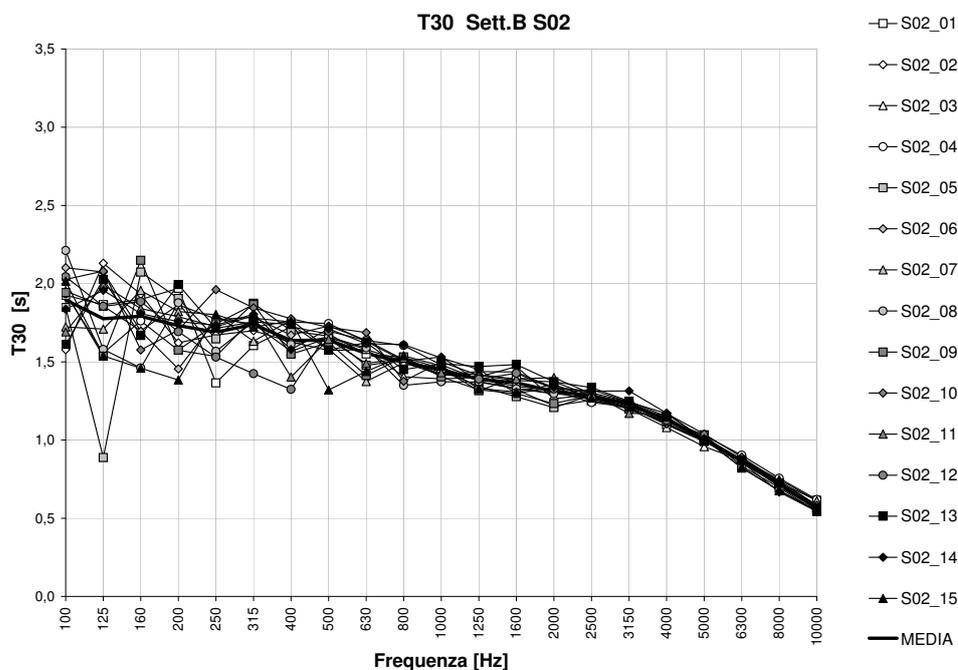
### **Settore D**

Andamento della media pressochè identico al resto della sala (Figura 4.108). Massimo a 100 Hz pari a 1,89 s, valori decrescenti fino al minimo 0,52 s a 10 kHz. Il valore medio totale è pari a 1,39 s. La dispersione dei dati è la stessa degli altri settori, è presente solo alle basse frequenze. Distribuzione spaziale della media sui singoli punti molto uniforme senza particolari andamenti regolari (Figura 4.112).

## **4.7.3 Analisi dei valori**

### **Confronto fra il comportamento della sala con le sorgenti in posizione 01 e 02**

Lo spostamento della sorgente sonora non provoca rilevanti variazioni sui valori medi del tempo di riverberazione. L'unica eccezione riguarda le prime file di ogni settore: i settori A e B presentano livello più omogeneo e basso con la sorgente in posizione 02, al contrario le prime file dei settori C e D hanno un livello maggiore di  $T_{30}$  con la sorgente proprio nella posizione 02.

Figura 4.105:  $T_{30}$  analisi in frequenza settore A sorgente 02Figura 4.106:  $T_{30}$  analisi in frequenza settore B sorgente 02

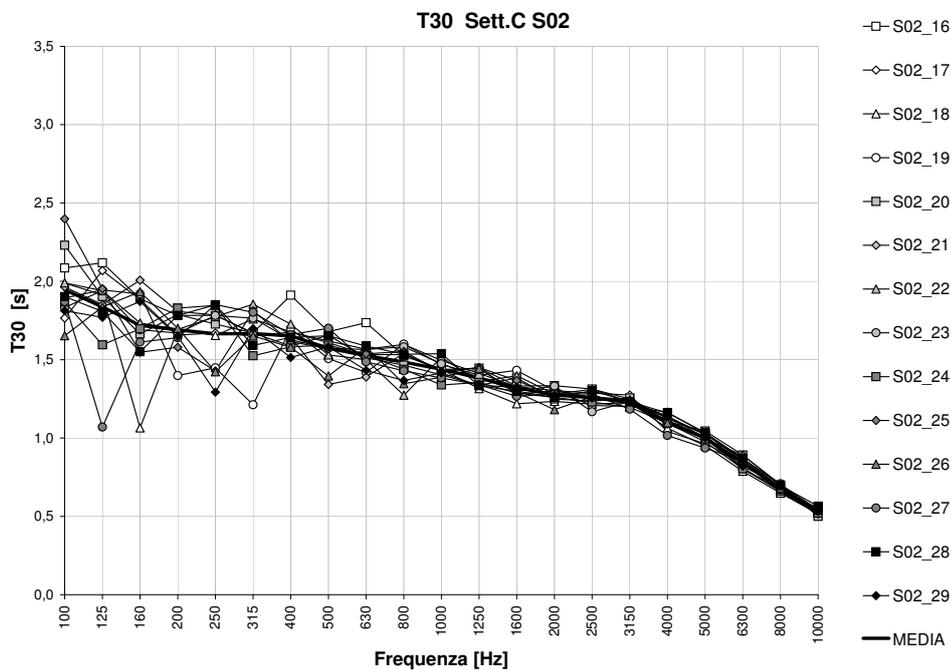


Figura 4.107:  $T_{30}$  analisi in frequenza settore C sorgente 02

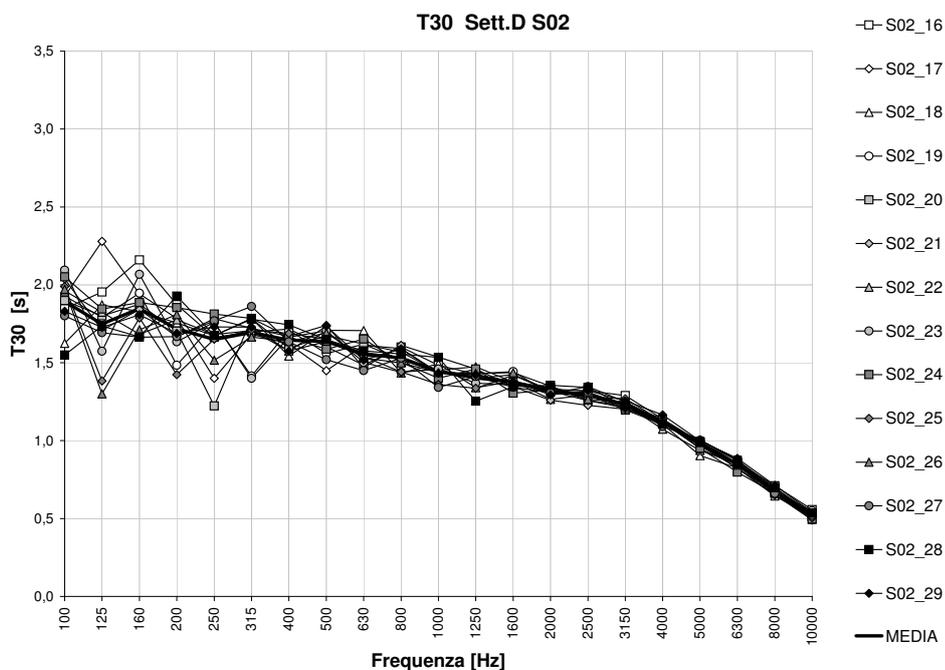


Figura 4.108:  $T_{30}$  analisi in frequenza settore D sorgente 02

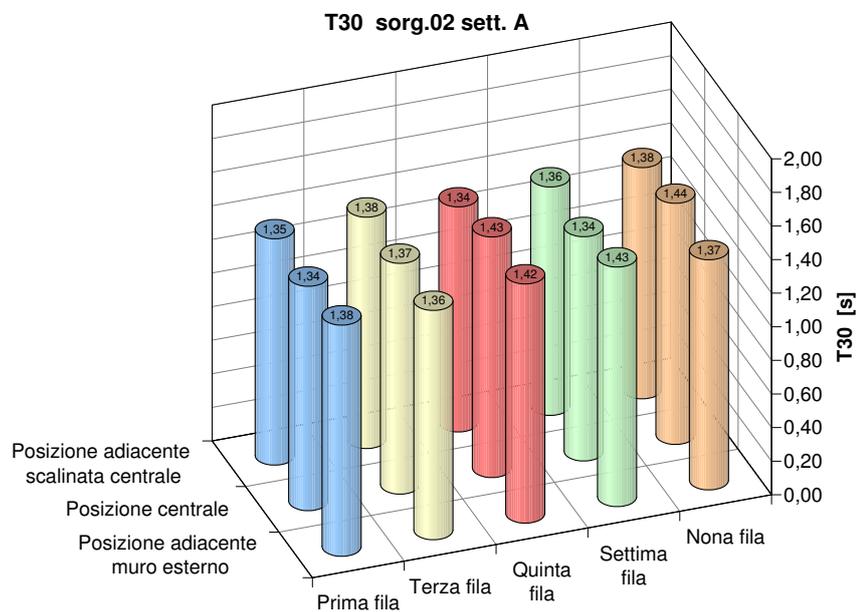


Figura 4.109:  $T_{30}$  media nei punti settore A sorgente 02

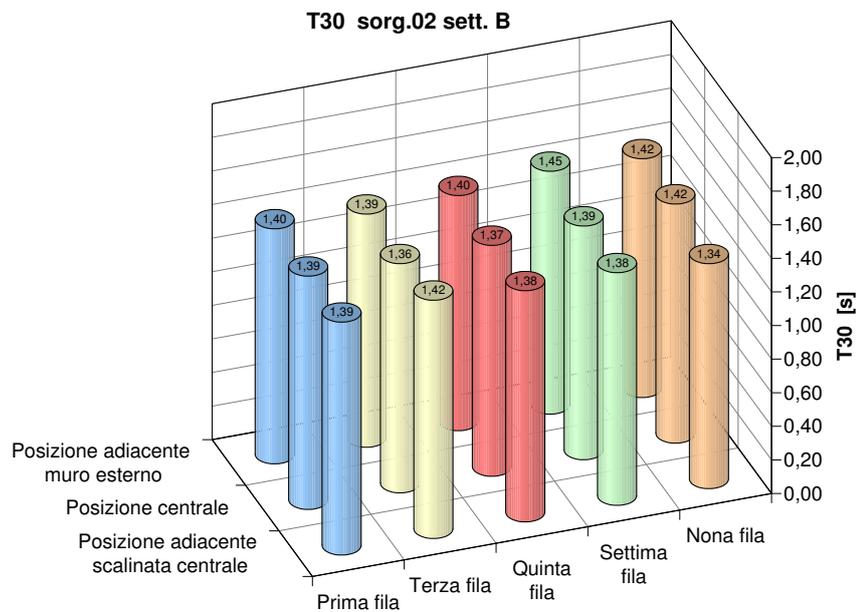


Figura 4.110:  $T_{30}$  media nei punti settore B sorgente 02

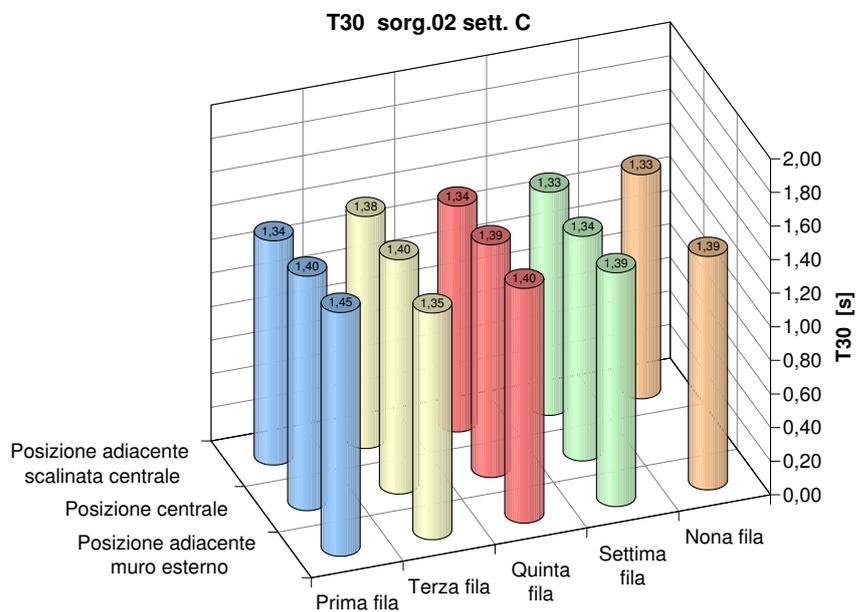


Figura 4.111:  $T_{30}$  media nei punti settore C sorgente 02

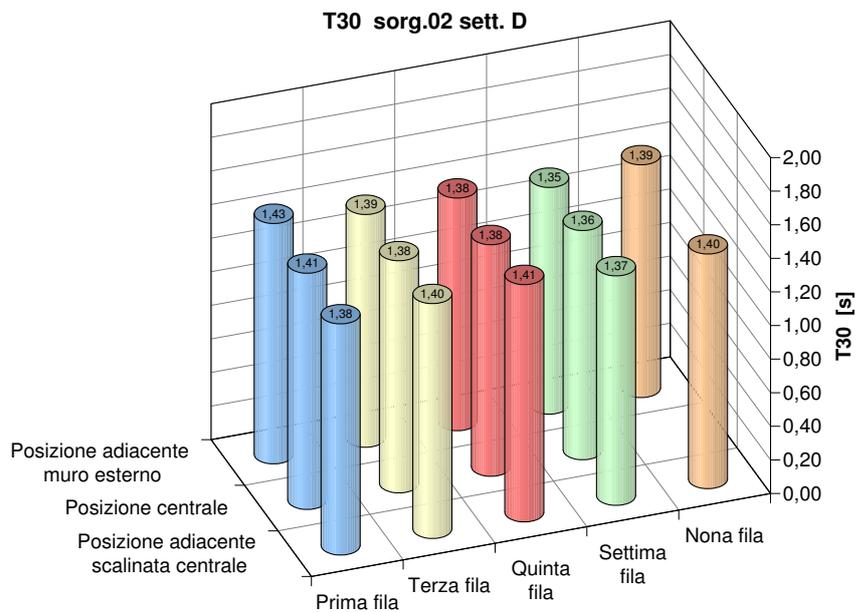


Figura 4.112:  $T_{30}$  media nei punti settore D sorgente 02

## 4.8 Analisi del tempo di riverberazione

### 4.8.1 Confronto fra i metodi di misura

In questo paragrafo si intende valutare i risultati ottenuti con i vari metodi di misura del tempo di riverberazione. L'analisi viene effettuata con gli andamenti medi per settore ricavati dalle misure effettuate con entrambe le sorgenti solo sui settori A e C. Dai grafici (Figura 4.113, 4.114, 4.115, 4.116) risulta evidente che i valori ottenuti in ogni caso da  $T_{10}$ ,  $T_{20}$  e  $T_{30}$  sono molto uniformi fatta eccezione per qualche singola banda di frequenza. Si può quindi indifferentemente usare uno qualsiasi di questi tre parametri per identificare il tempo di riverberazione. Diversa è la situazione per l'EDT che invece presenta valori uguali o leggermente più alti (sorgente 02) degli altri parametri nel settore A. Nel settore C invece i valori sono nettamente più bassi dell'andamento medio. Ciò ben si accorda con la variabilità di tale parametro in funzione della distanza dalla sorgente.

### 4.8.2 Confronto con i valori di letteratura

I valori ottimali per un sala di volumetria pari all'auditorium (circa  $5800 m^3$ ) sono  $1,4 < T_{30} < 2s$ . Tali valori sono adatti soprattutto per la musica da camera, il repertorio sinfonico richiederebbe tempi di riverberazione più lunghi di circa 0,3 s. La sala presenta in generale tempi compresi fra 1,3 s e 1,4 s; risulta quindi sufficientemente adeguata per la musica da camera, carente ma comunque accettabile per la musica sinfonica. L'EDT per essere ottimale dovrebbe avere valori superiori al tempo di riverberazione di circa il 10%, nel nostro caso invece tale condizione non è mai rispettata. Nel settore A si hanno valori analoghi al  $T_{30}$ , nel settore C sempre inferiore. Tale difetto può essere imputato alla scarsità di prime riflessioni.

## 4.9 Rapporto dei bassi, *BR*

Certi aspetti della timbrica percepita in una sala da concerto sono legati all'andamento del tempo di riverberazione in funzione della frequenza. Beranek ((1996)?? definisce l'attributo soggettivo Warmth (Calore) come la sensazione soggettiva della vivezza e della pienezza dei bassi, rispetto a quelle dei medi, e ritiene che il suo descrittore oggettivo è il Rapporto dei Bassi (Bass Ratio, *BR*).

### 4.9.1 Andamento del parametro

Il parametro non segue andamenti particolari, non presenta dipendenze regolari dalla vicinanza a pareti laterali o di fondo. Nemmeno lo spostamento della sorgente sul palco modifica sostanzialmente il comportamento della sala in relazione a questo descrittore.

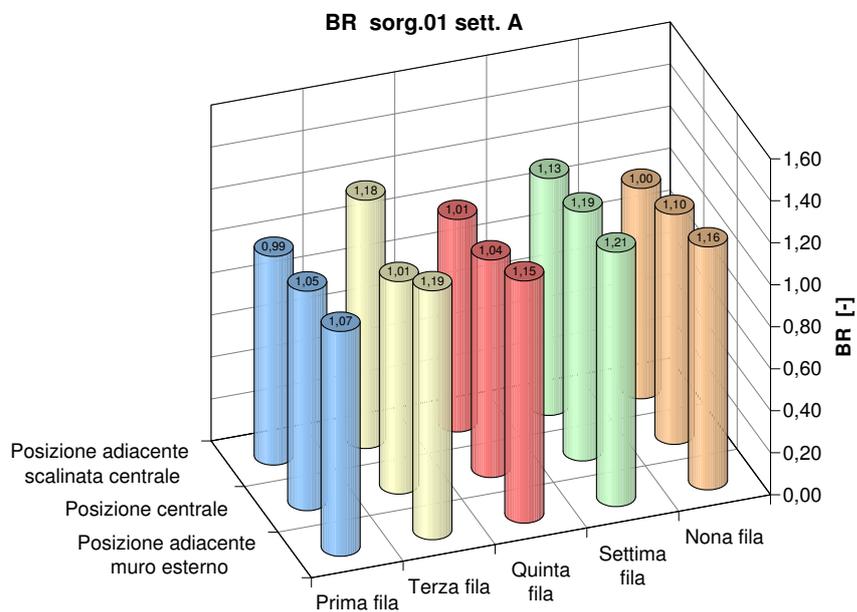


Figura 4.113: BR media nei punti settore A sorgente 01

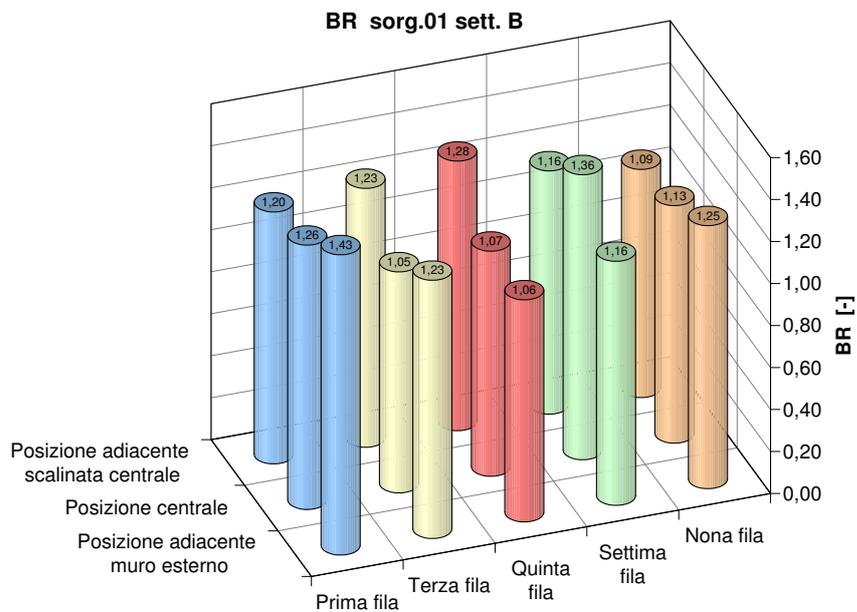


Figura 4.114: BR media nei punti settore B sorgente 01

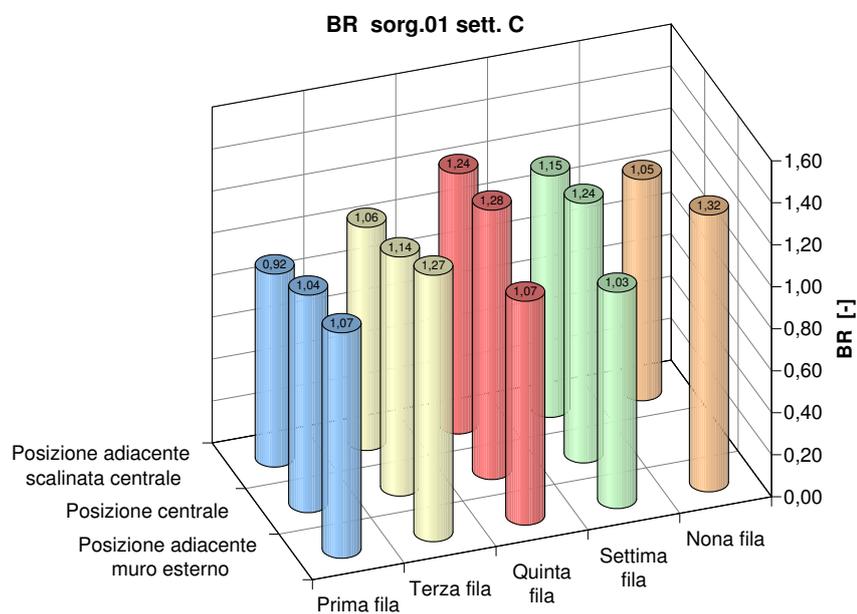


Figura 4.115: *BR* media nei punti settore C sorgente 01

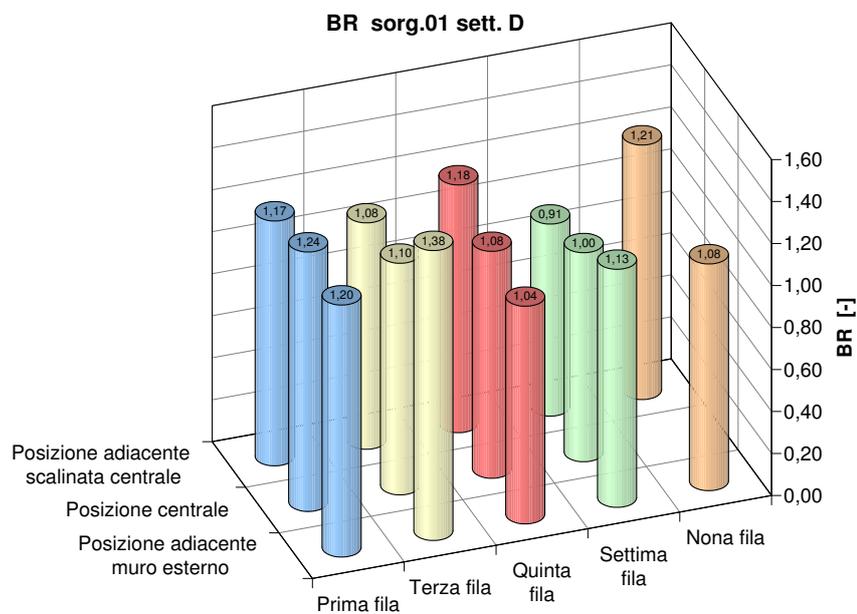


Figura 4.116: *BR* media nei punti settore D sorgente 01

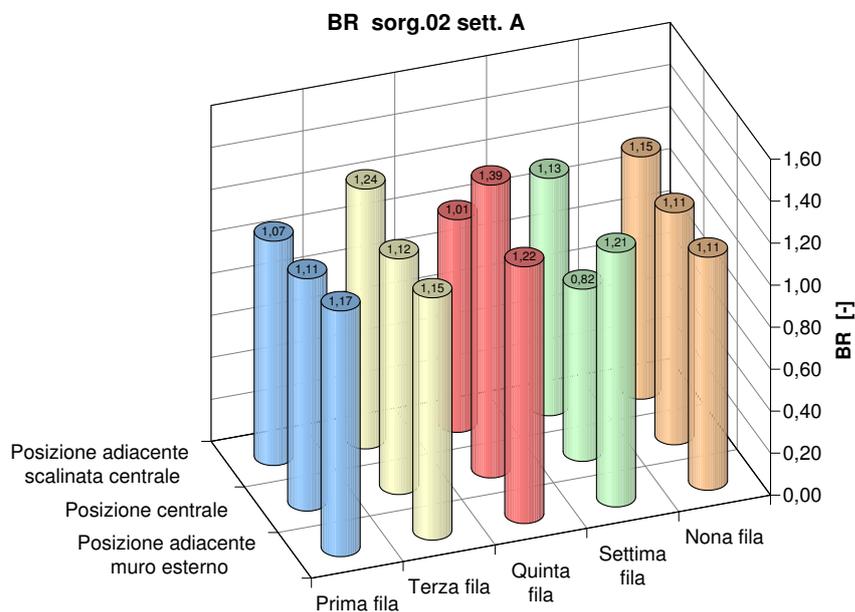


Figura 4.117: BR media nei punti settore A sorgente 02

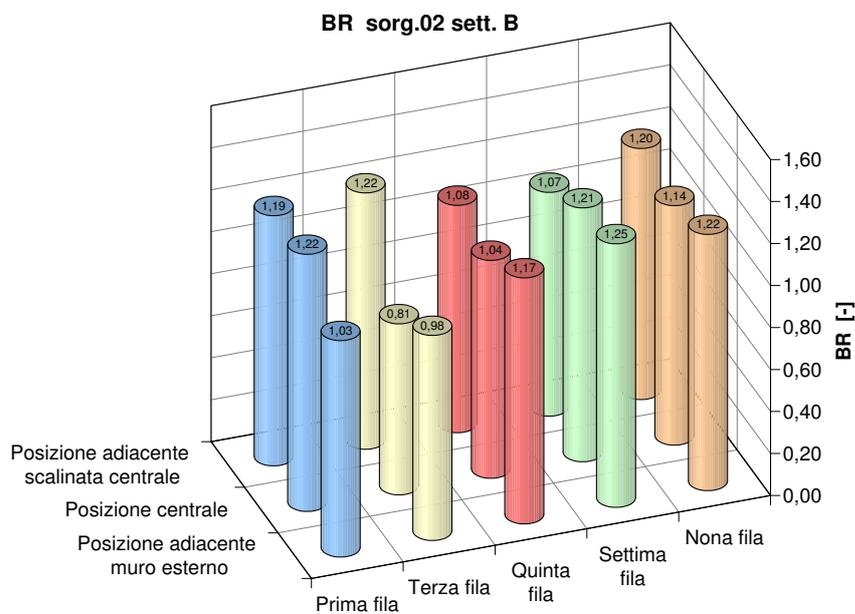


Figura 4.118: BR media nei punti settore B sorgente 02

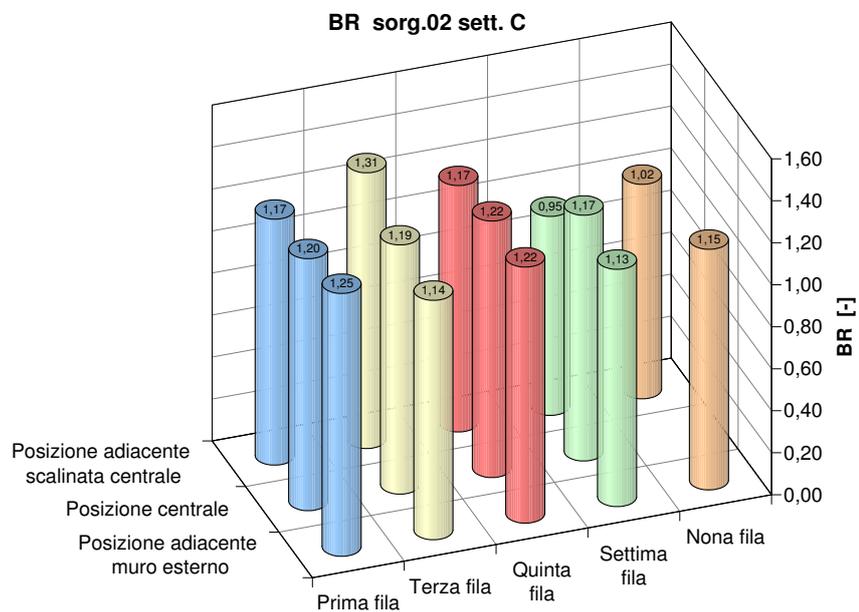


Figura 4.119: *BR* media nei punti settore C sorgente 02

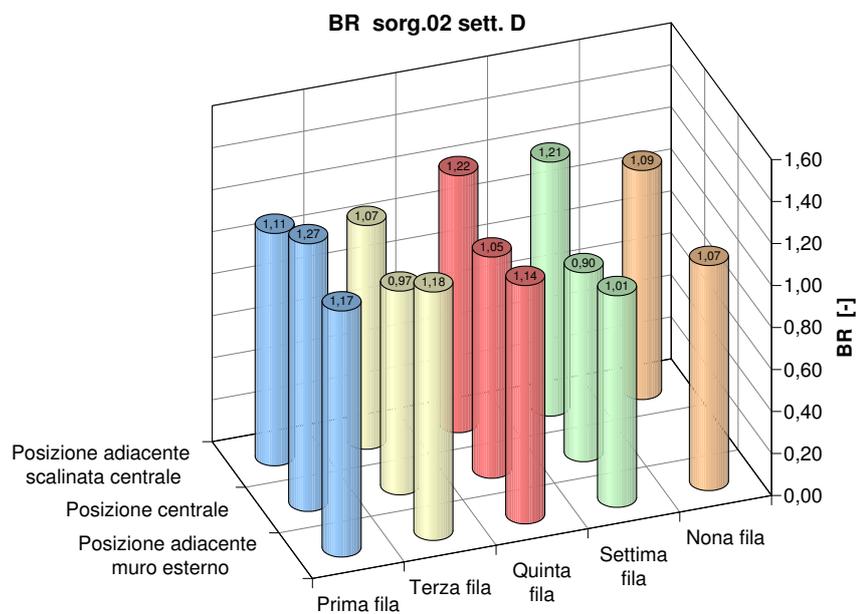


Figura 4.120: *BR* media nei punti settore D sorgente 02

### 4.9.2 Confronto con i valori di letteratura

I valori di letteratura tipici per questo parametro sono  $1,2 < BR < 1,25$ . In sala le medie sui settori rientrano nel range  $1,10 < BR < 1,20$ . I valori sono perciò più bassi di quelli ottimali, ciò significa che i tempi di riverberazione alle basse frequenze sono troppo corti in relazione a quelli alle alte frequenze.

## 4.10 Vivezza, $T_{med}$

Secondo Beranek (1996)??, la riverberazione adeguata conferisce alla musica pienezza delle note e vivezza (Fullness of tone, Liveness), attributi normalmente apprezzati dall'ascoltatore in una sala e non percepibili all'aperto. Questo arricchimento della percezione dipende dal prolungamento temporale delle note e dall'incremento del livello della pressione sonora causato dalla sala.

### 4.10.1 Andamento del parametro

Il parametro non segue andamenti particolari, non presenta dipendenze regolari dalla vicinanza a pareti laterali o di fondo. Nemmeno lo spostamento della sorgente sul palco modifica sostanzialmente il comportamento della sala in relazione a questo descrittore.

### 4.10.2 Confronto con i valori di letteratura

I valori di letteratura tipici per questo parametro sono  $T_{med} = 1,9$  s per orchestra sinfonica media,  $T_{med} = 1,5$  s per opera italiana e  $T_{med} = 1,7$  s per opera wagneriana. In sala le medie sui settori rientrano nel range  $1,45 < T_{med} < 1,55$  s. I valori sono perciò più bassi di quelli ottimali per la musica sinfonica, risultano invece ottimi per l'opera italiana. Ciò è collegato in generale ai tempi di riverberazione corti misurati in sala.

## 4.11 Coefficiente di correlazione mutua interaurale, $IACC_{0,80}$

La funzione di correlazione mutua interaurale appare come la misura più diretta della somiglianza delle pressioni sonore alle orecchie di un ascoltatore. Questa relazione traduce il diverso grado di pressione sonora che giunge a ciascun orecchio nei primi 80 ms, creando una correlazione tra le due diverse percezioni che risulta connessa all'impressione spaziale. Spesso viene utilizzato il parametro alternativo ( $1 - IACC_{0,80}$ ), misura della dissomiglianza interaurale, che è correlato in senso crescente con la spazialità.

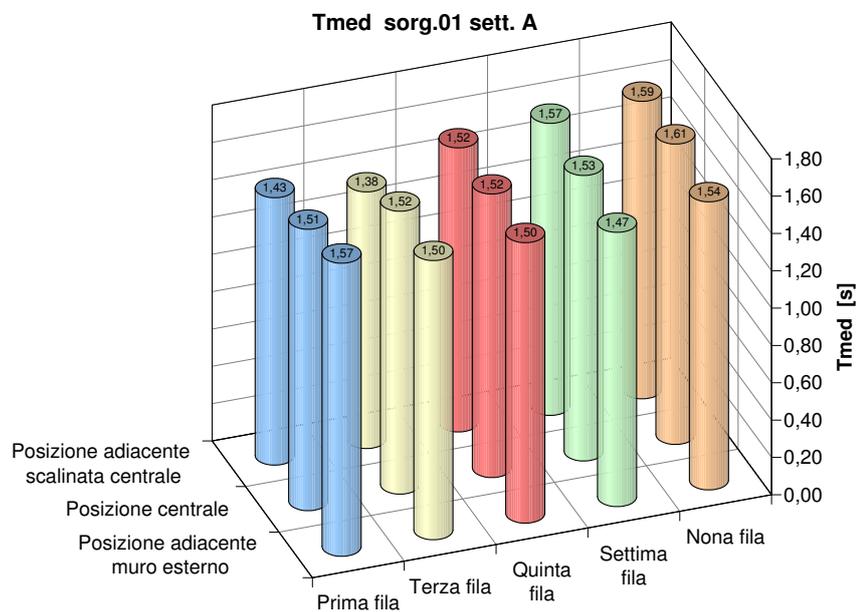


Figura 4.121:  $T_{med}$  nei punti settore A sorgente 01

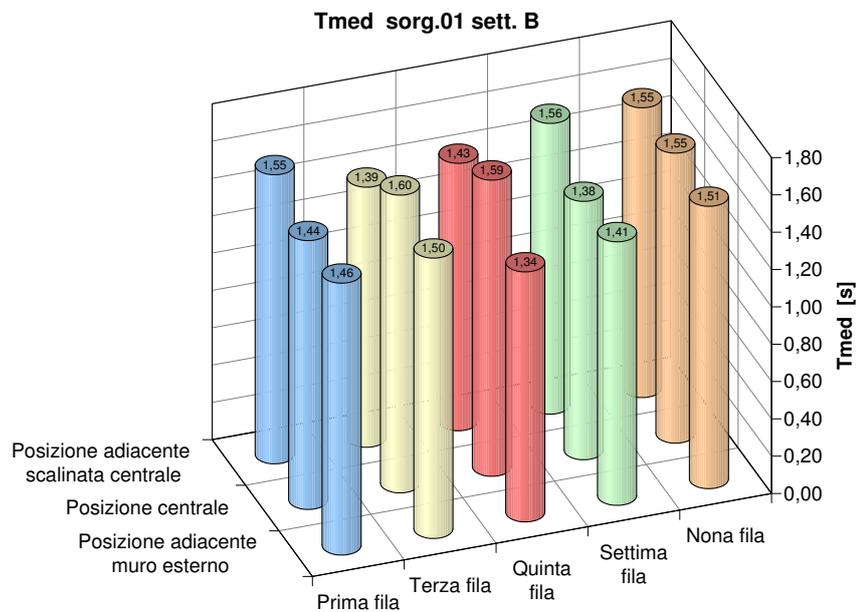


Figura 4.122:  $T_{med}$  nei punti settore B sorgente 01

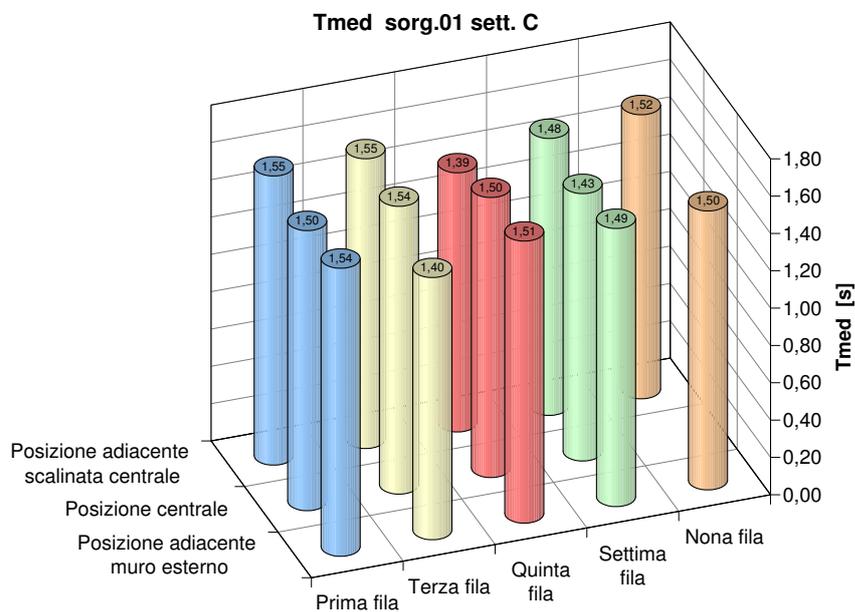


Figura 4.123:  $T_{med}$  nei punti settore C sorgente 01

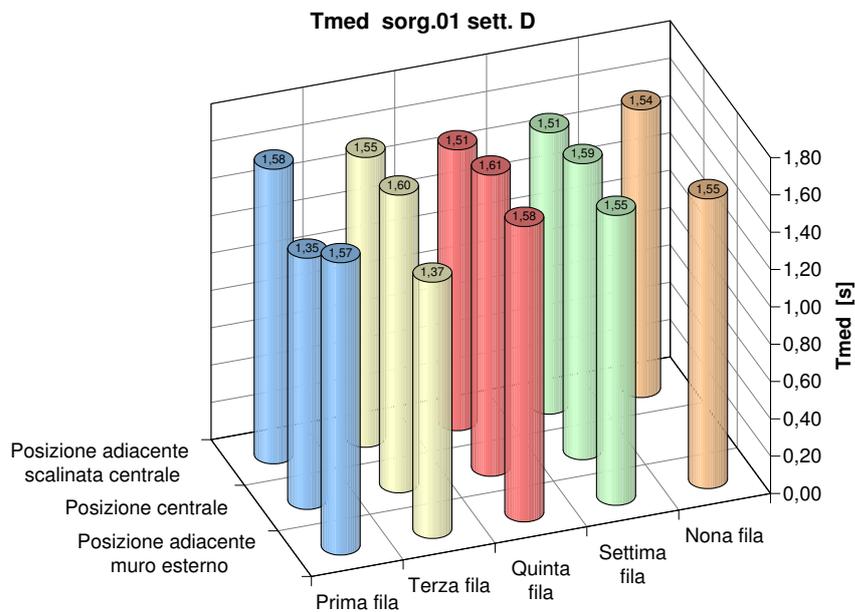


Figura 4.124:  $T_{med}$  nei punti settore D sorgente 01

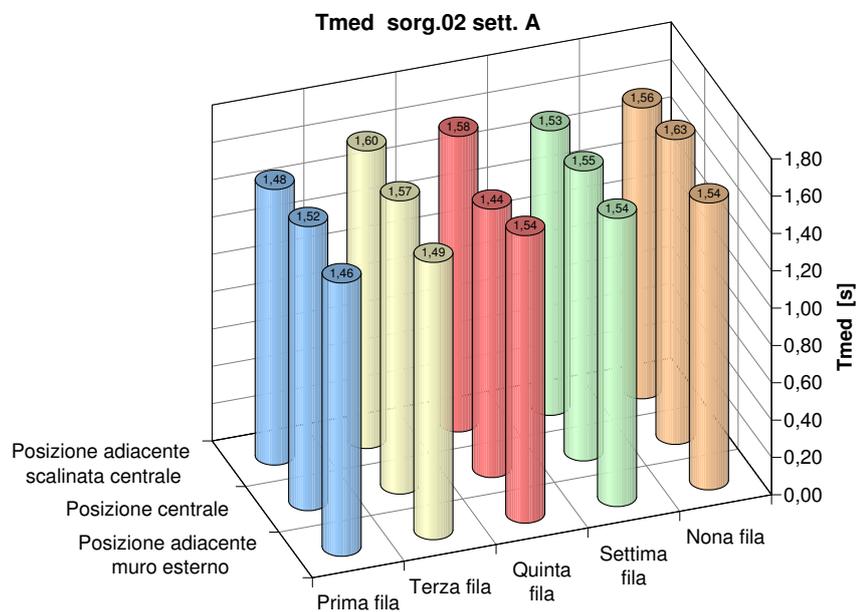


Figura 4.125:  $T_{med}$  nei punti settore A sorgente 02

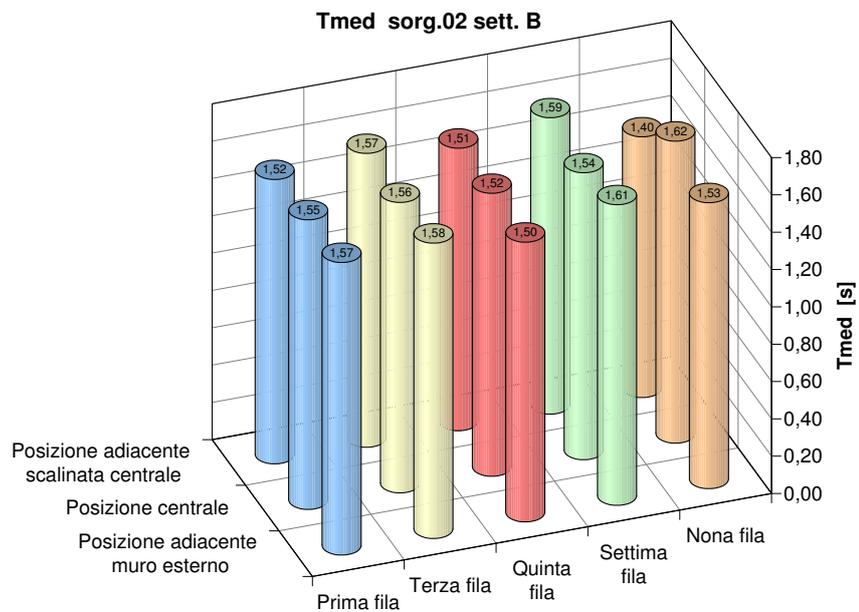


Figura 4.126:  $T_{med}$  nei punti settore B sorgente 02

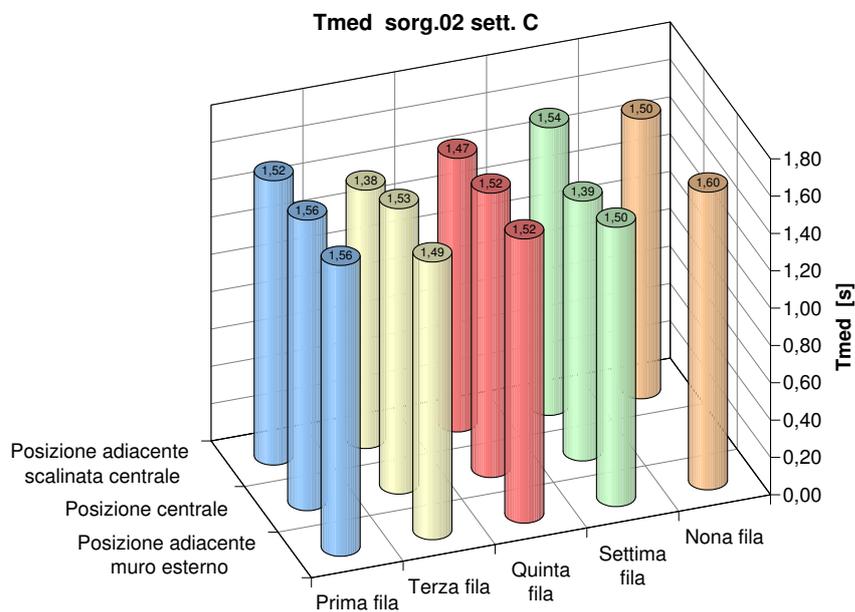


Figura 4.127:  $T_{med}$  nei punti settore C sorgente 02

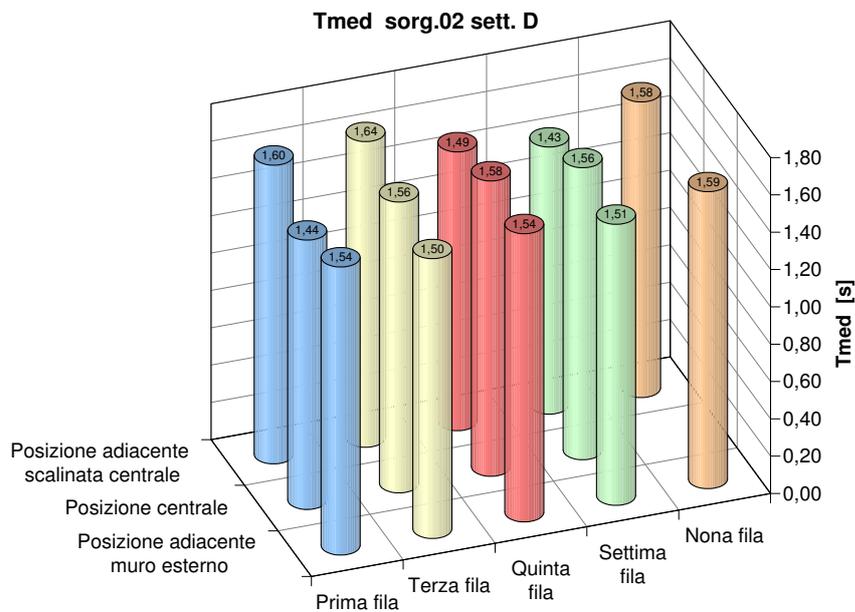


Figura 4.128:  $T_{med}$  nei punti settore D sorgente 02

### 4.11.1 Sorgente 01

#### Settore A

Il parametro ha un andamento medio fra i punti di misura che diminuisce notevolmente all'aumentare della frequenza (Figura 4.129). Fanno eccezione alcune frequenze centrali di banda (125, 630, 1000, 2500, 10000 Hz) cui corrisponde un massimo relativo. Il massimo di questo andamento è a 125 Hz pari a 0,97, il minimo è a 8 kHz pari a 0,18. Il valore medio totale è invece pari a 0,55. I valori risultano molto vari e dispersi rispetto all'andamento medio soprattutto alle medie frequenze. La distribuzione spaziale della media dei singoli punti risulta molto condizionata dalla vicinanza alla parete (Figura 4.133), in effetti lungo tutto il settore i punti vicini alla parete hanno valori decisamente più bassi di quelli più vicini al centro della sala. La distanza dalla sorgente non sembra invece avere nessun effetto sugli esiti in quanto i valori registrati sono analoghi fila per fila.

#### Settore B

Andamento della media fra i punti analogo al settore A: generalmente in diminuzione con la frequenza (Figura 4.130) con l'eccezione di alcune bande centrate su 125, 1600, 10000 Hz. Il massimo è a 125 Hz pari a 0,98, il minimo a 8 kHz pari a 0,20. La media totale invece si pone sul valore 0,57. I dati anche in questo caso risultano molto dispersi alle frequenze medie. La distribuzione spaziale della media sui singoli punti segue l'andamento visto nel settore A, con i punti vicini alla parete che presentano valori più bassi del parametro, in più in questo settore si nota un appiattimento delle oscillazioni da punto a punto man mano che ci si allontana dalla sorgente (Figura 4.134).

#### Settore C

L'andamento della media fra i punti è particolare (Figura 4.131): risulta diminuire all'aumentare della frequenza da 125 a 800 Hz, poi aumenta fino agli 1250 Hz e torna a diminuire fino a 8000 Hz, per risalire ai 10 kHz. Il valore massimo si ha a 100 Hz pari a 0,97, il valore minimo a 8 kHz pari a 0,16. La media totale invece risulta 0,51, più bassa dei settori A e B. La distribuzione dei valori è compatta a bassa frequenze nella banda degli 800 e 8000 Hz, dispersa nelle restanti bande. La distribuzione delle medie sui punti mette ancora in evidenza che in vicinanza alla superficie laterale i valori del parametro sono più bassi, questo effetto svanisce avvicinandosi alla parete di fondo (Figura 4.135).

#### Settore D

Andamento della media del parametro praticamente identica al settore C con massimo a 125 Hz pari a 0,96, minimo a 8 kHz pari a 0,16, un minimo relativo agli 800 Hz e un aumento del valore medio a 10 kHz (Figura 4.132). La media totale è pari a 0,49 in linea col settore C appunto e quindi più bassa dei settori A e B. I dati risultano

piuttosto compatti solo intorno alle basse frequenze e agli 800 Hz. La distribuzione spaziale della media sui punti risente ancora una volta della vicinanza della parete laterale con valori più bassi man mano che ci si avvicina a questa, effetto che stavolta non svanisce nemmeno nelle ultime file della sala (Figura 4.136).

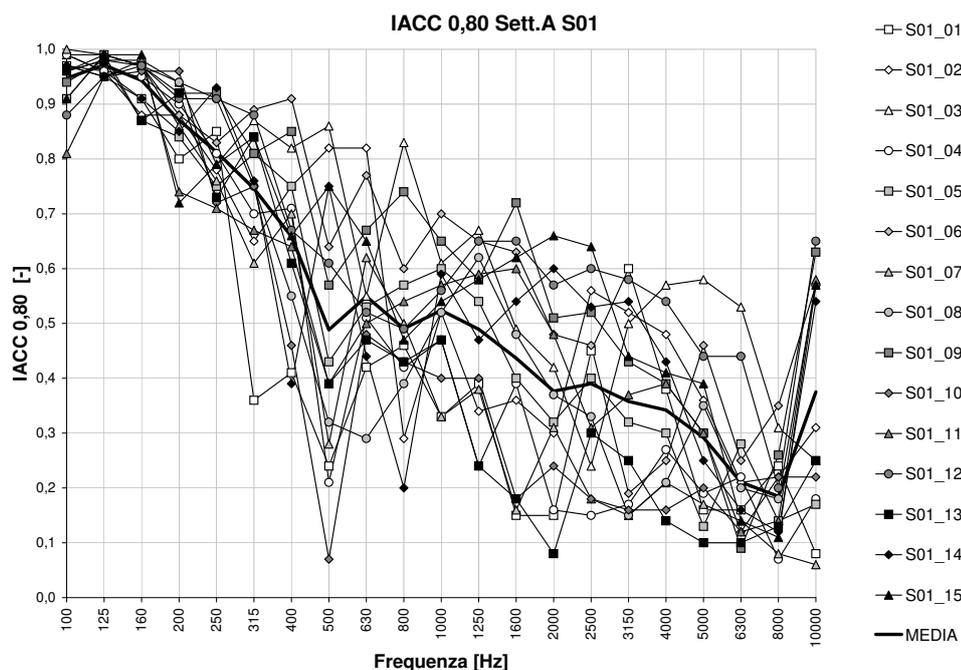
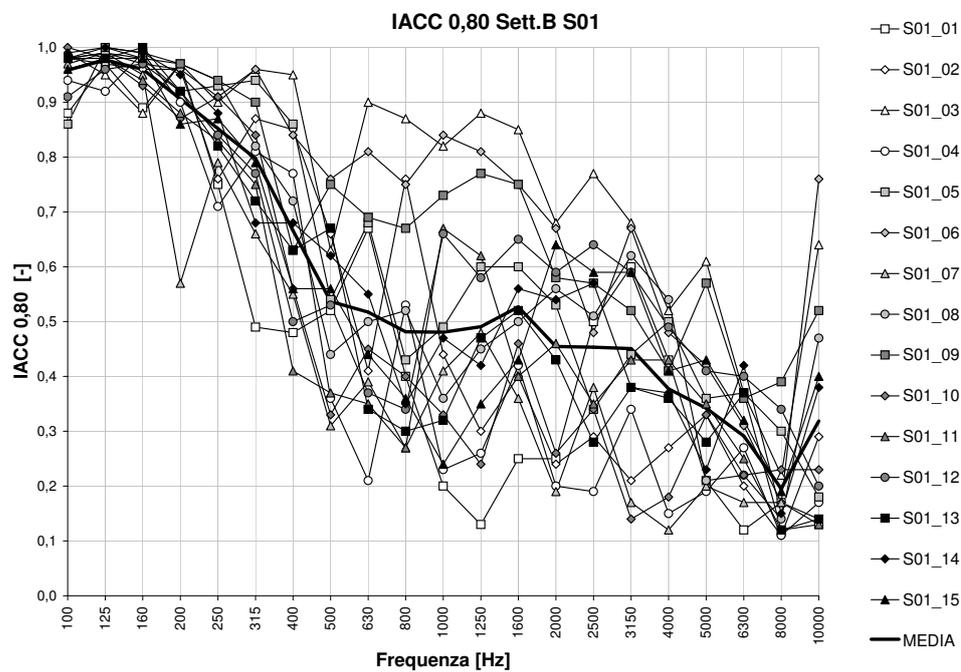
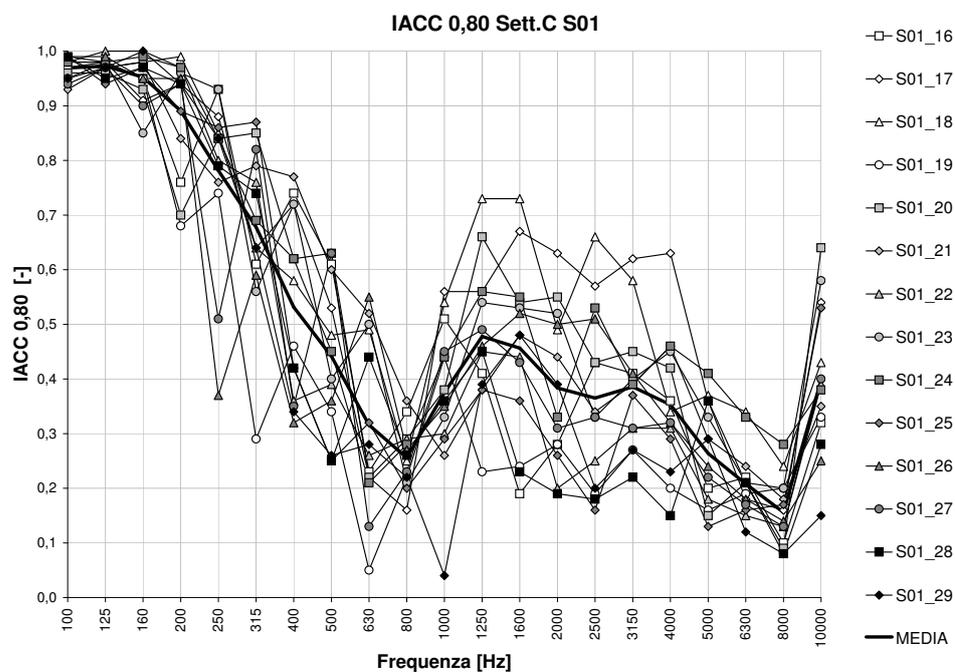


Figura 4.129:  $IACC_{0,80}$  analisi in frequenza settore A sorgente 01

## 4.11.2 Sorgente 02

### Settore A

Il parametro ha un andamento medio fra i punti di misura che diminuisce notevolmente all'aumentare della frequenza (Figura 4.137). Fanno eccezione alcune frequenze centrali di banda (125, 400, 1000, 2000, 4000, 10000 Hz) cui corrisponde un massimo relativo. Vi è in conseguenza a questo andamento un minimo relativo a 800 Hz. Il massimo di questo andamento è a 125 Hz pari a 0,97, il minimo è a 8 kHz pari a 0,17. Il valore medio totale è invece pari a 0,55. I valori risultano molto vari e dispersi rispetto all'andamento medio soprattutto alle medie frequenze. La distribuzione spaziale della media dei singoli punti risulta molto condizionata dalla vicinanza alla parete, in effetti lungo tutto il settore i punti vicini alla parete hanno valori decisamente più bassi di quelli più vicini al centro della sala (Figura 4.141). La distanza dalla sorgente non sembra invece avere grossi effetti sugli esiti in quanto i valori registrati sono analoghi fila per fila tranne per un leggero aumento verso il fondo della sala.

Figura 4.130:  $IACC_{0,80}$  analisi in frequenza settore B sorgente 01Figura 4.131:  $IACC_{0,80}$  analisi in frequenza settore C sorgente 01

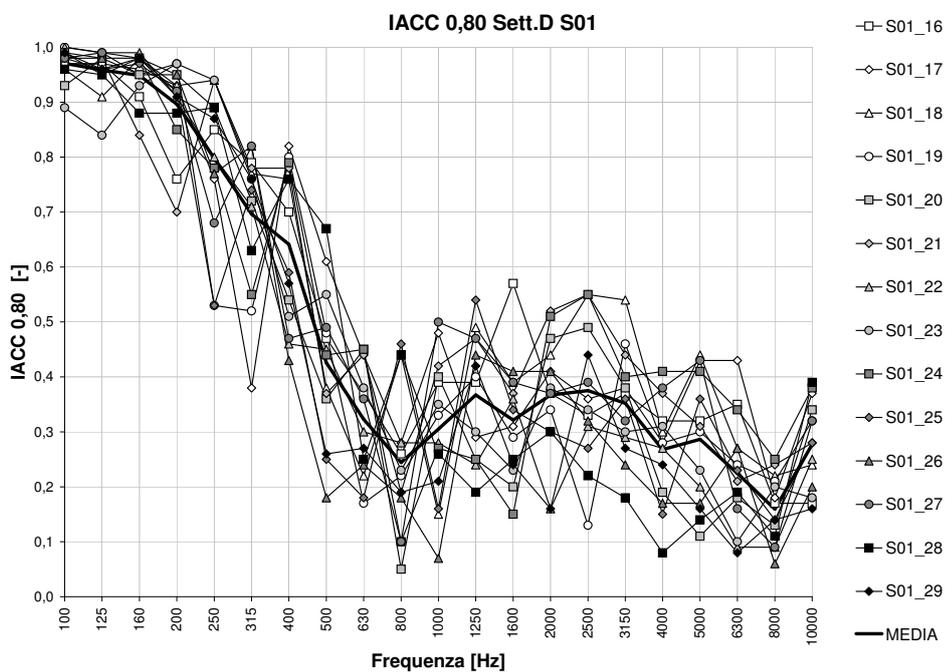


Figura 4.132:  $IACC_{0,80}$  analisi in frequenza settore D sorgente 01

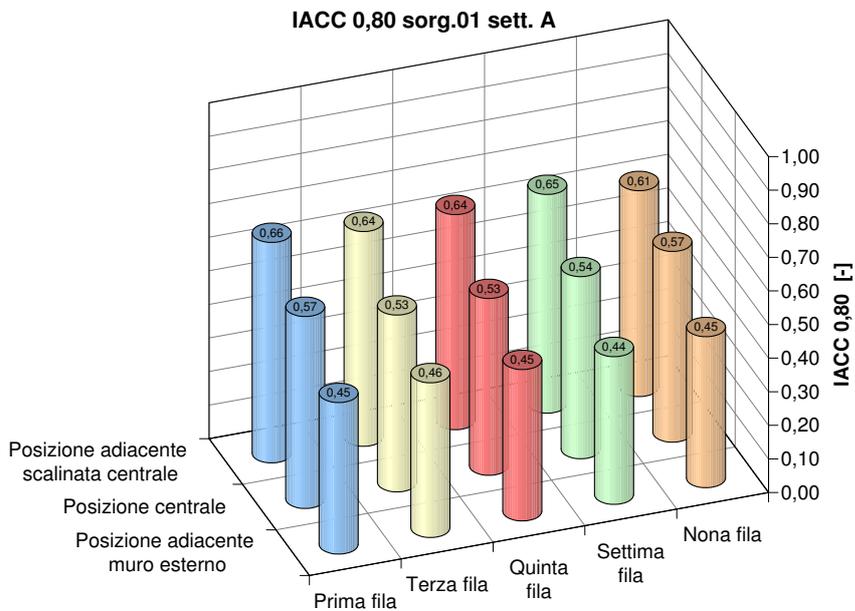


Figura 4.133:  $IACC_{0,80}$  media nei punti settore A sorgente 01

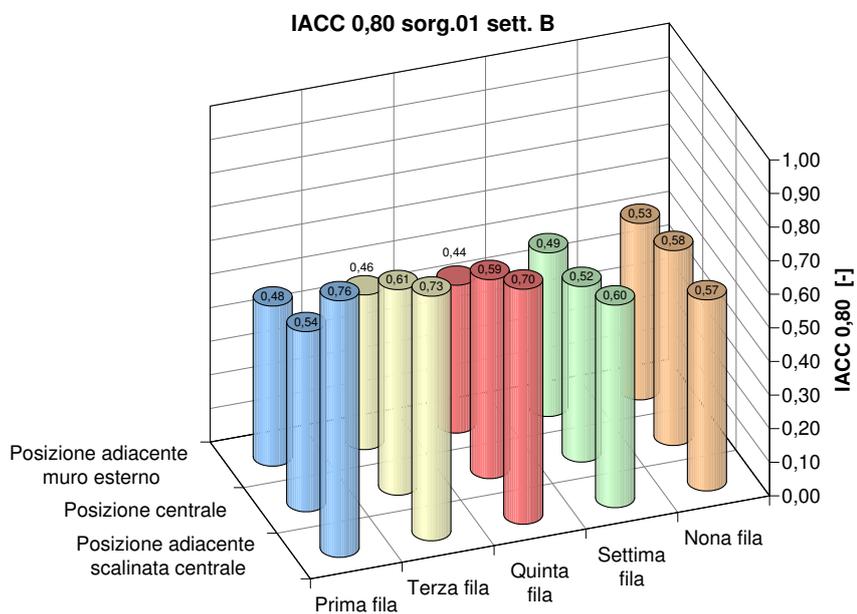


Figura 4.134:  $IACC_{0,80}$  media nei punti settore B sorgente 01

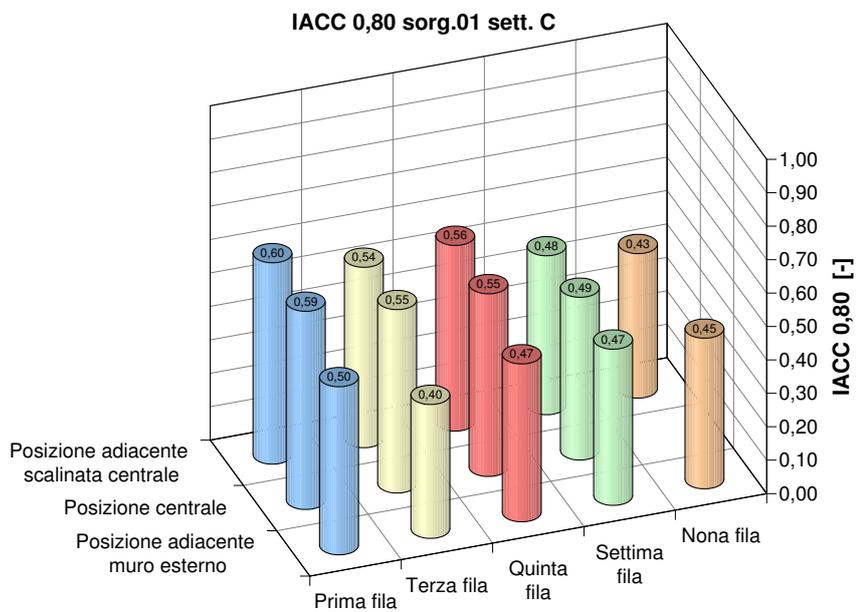


Figura 4.135:  $IACC_{0,80}$  media nei punti settore C sorgente 01

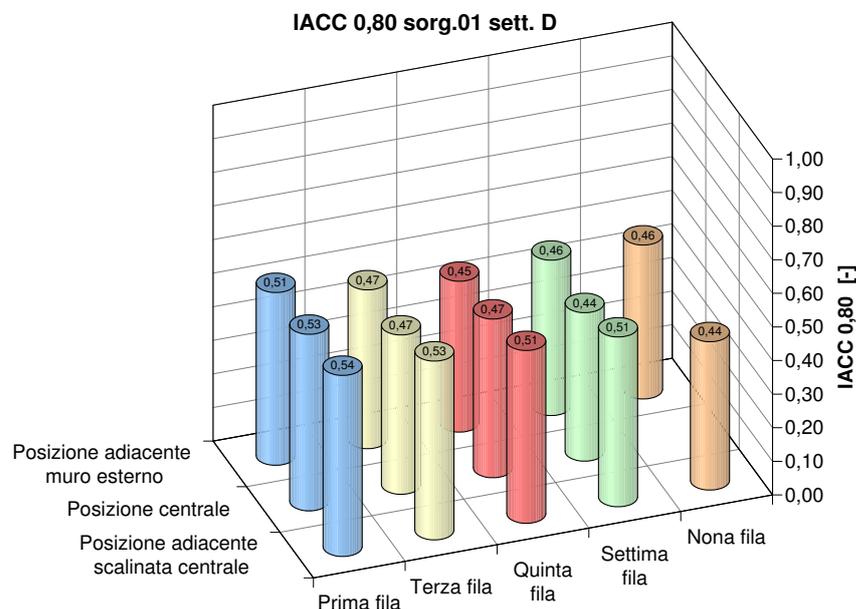


Figura 4.136:  $IACC_{0,80}$  media nei punti settore D sorgente 01

### Settore B

Andamento della media fra i punti analogo al settore A: generalmente in diminuzione con la frequenza con l'eccezione di alcune bande centrate su 125, 1600, 10000 Hz (Figura 4.138). Il massimo è a 100 Hz pari a 0,96, il minimo a 8 kHz pari a 0,24. La media totale invece si pone sul valore 0,59. I dati anche in questo caso risultano molto dispersi alle frequenze medie. La distribuzione spaziale della media sui singoli punti segue l'andamento visto nel settore A, con i punti vicini alla parete che presentano valori più bassi del parametro (Figura 4.142).

### Settore C

L'andamento della media fra i punti è particolare, simile a quella del settore A, risulta diminuire all'aumentare della frequenza da 125 a 800 Hz, poi aumenta fino agli 1250 Hz e torna a diminuire fino a 8000 Hz, per risalire ai 10 kHz (Figura 4.139). Il valore massimo si ha a 160 Hz pari a 0,96, il valore minimo a 8 kHz pari a 0,16. La media totale invece risulta 0,48, solo leggermente più bassa dei settori A e B. La distribuzione dei valori è compatta solo a bassa frequenze, dispersa nelle restanti bande. La distribuzione delle medie sui punti mette ancora in evidenza che in genere in vicinanza alla superficie laterale i valori del parametro sono più bassi, questo effetto svanisce avvicinandosi alla parete di fondo (Figura 4.143).

## Settore D

Andamento della media del parametro molto simile al settore C con massimo a 160 Hz pari a 0,98, minimo a 8 kHz pari a 0,18, un minimo relativo agli 800 Hz e ai 1600 Hz e un aumento del valore medio a 10 kHz (Figura 4.140). La media totale è pari a 0,48, in linea col settore C e quindi leggermente più bassa dei settori A e B. I dati risultano piuttosto compatti solo intorno alle basse frequenze. La distribuzione spaziale della media sui punti risente ancora una volta della vicinanza della parete laterale con valori più bassi man mano che ci si avvicina a questa, effetto che svanisce nelle ultime file della sala (Figura 4.144)

### 4.11.3 Analisi dei valori

#### Confronto fra il comportamento della sala con le sorgenti in posizione 01 e 02

Per il parametro  $IACC_{0,80}$  la due posizioni della sorgente non danno evidenti variazioni dei valori rilevati, soprattutto per quel che riguarda la media dei settori. Si può solamente notare un leggero abbassamento dell'effetto dovuto alla vicinanza della parete laterale, in pratica una maggior uniformità nella sala, fermo restando la diminuzione del parametro dal palco alla parete di fondo dietro la platea.

#### Confronto con i valori di letteratura

I valori ottimali vengono forniti per il parametro  $(1 - IACC_{0,80})$ , che deve risultare compreso fra 0,62 e 0,71 nelle sale da concerto. I valori medi misurati nei vari settori rientrano nell'intervallo  $0,40 < (1 - IACC_{0,80}) < 0,55$ . Tale parametro è correlato in modo crescente con il senso di spazialità, in sala dunque tale caratteristica non risulta ottimale.

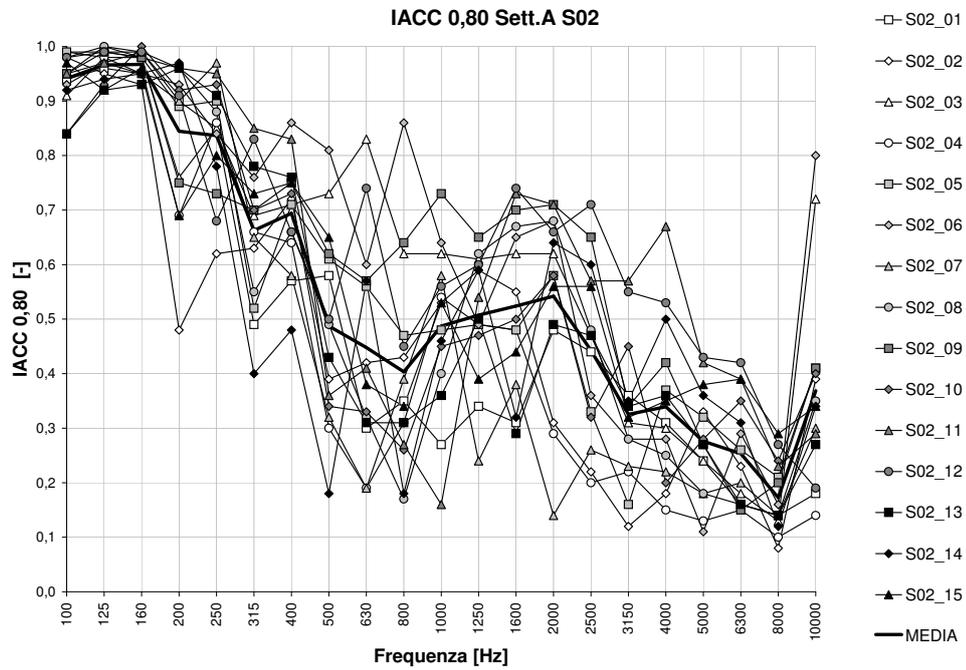


Figura 4.137:  $IACC_{0,80}$  analisi in frequenza settore A sorgente 02

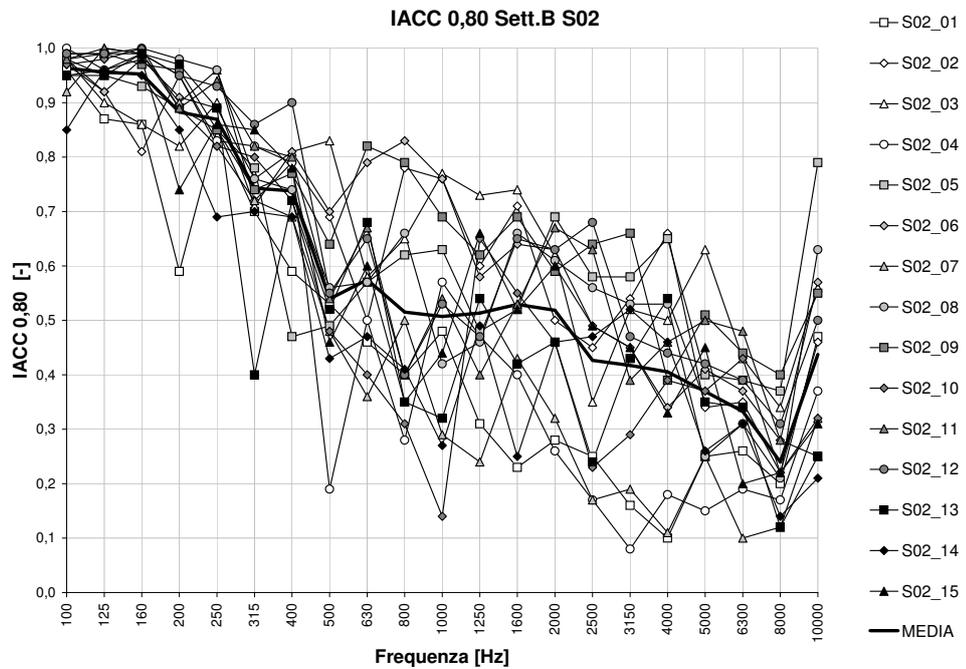
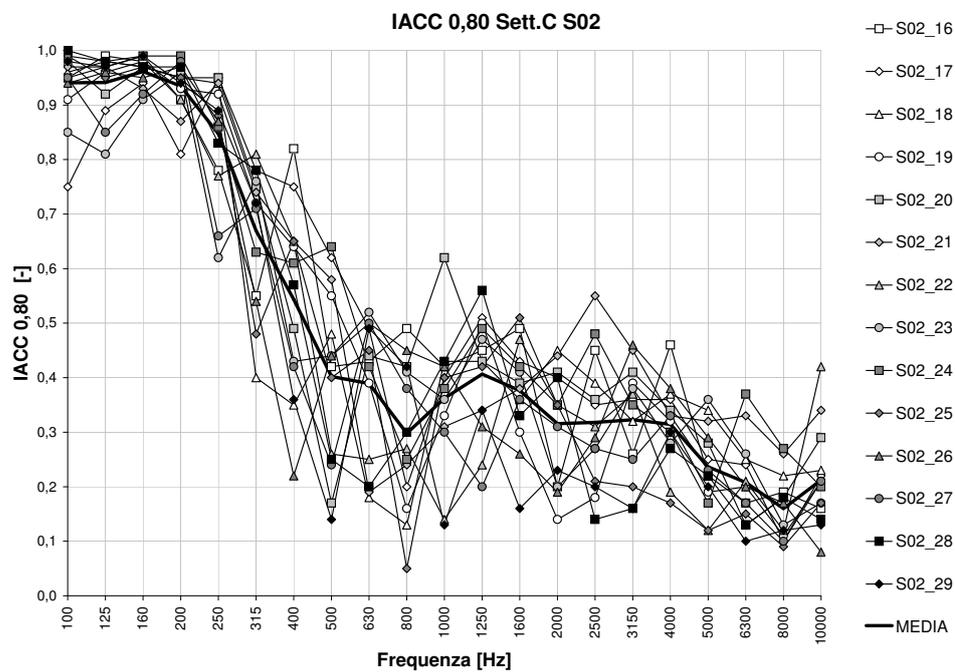
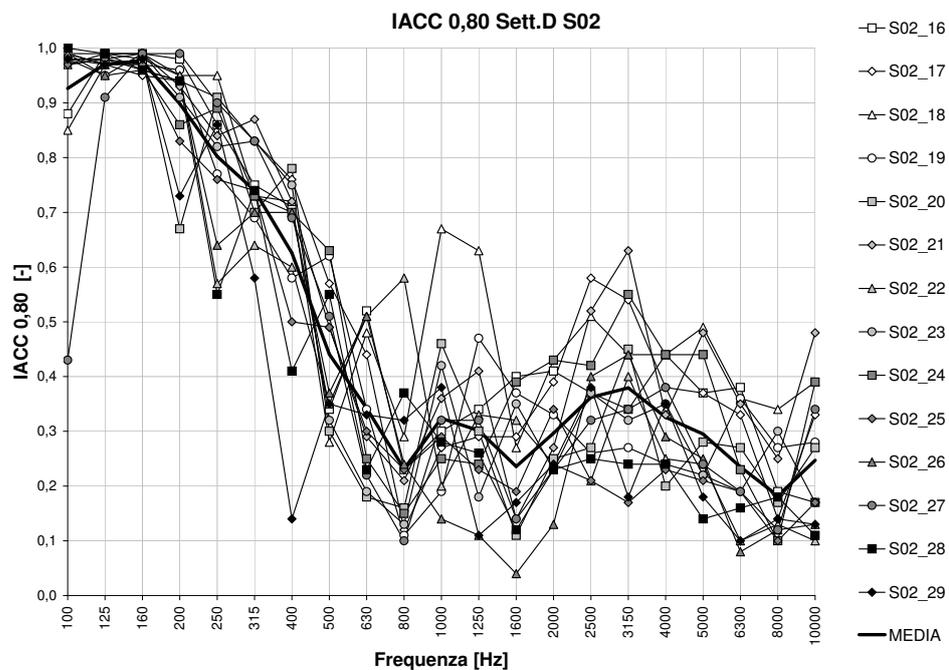


Figura 4.138:  $IACC_{0,80}$  analisi in frequenza settore B sorgente 02

Figura 4.139:  $IACC_{0,80}$  analisi in frequenza settore C sorgente 02Figura 4.140:  $IACC_{0,80}$  analisi in frequenza settore D sorgente 02

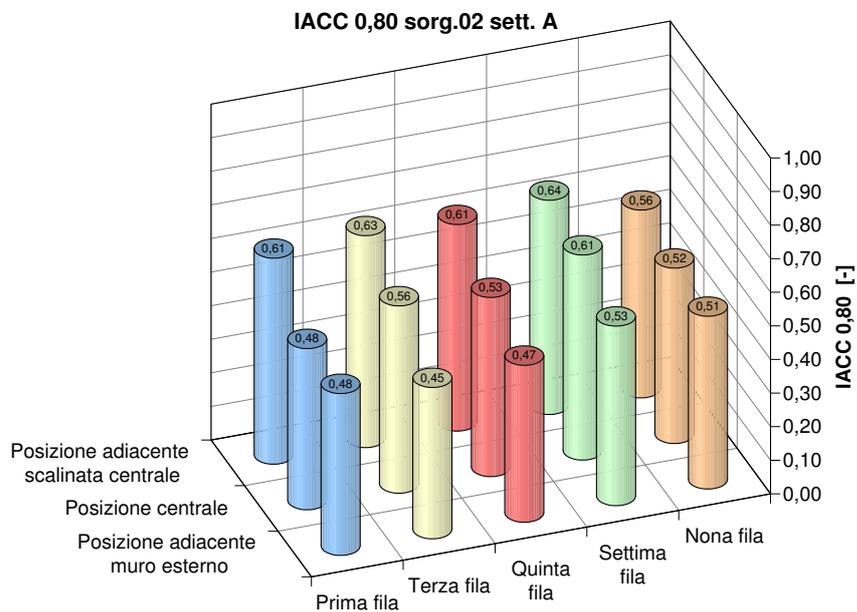


Figura 4.141:  $IACC_{0,80}$  media nei punti settore A sorgente 02

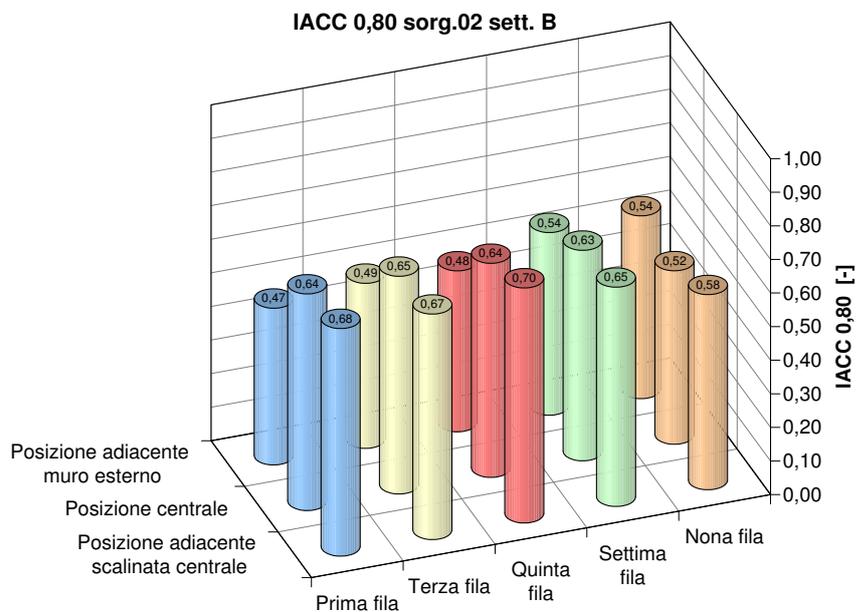


Figura 4.142:  $IACC_{0,80}$  media nei punti settore B sorgente 02

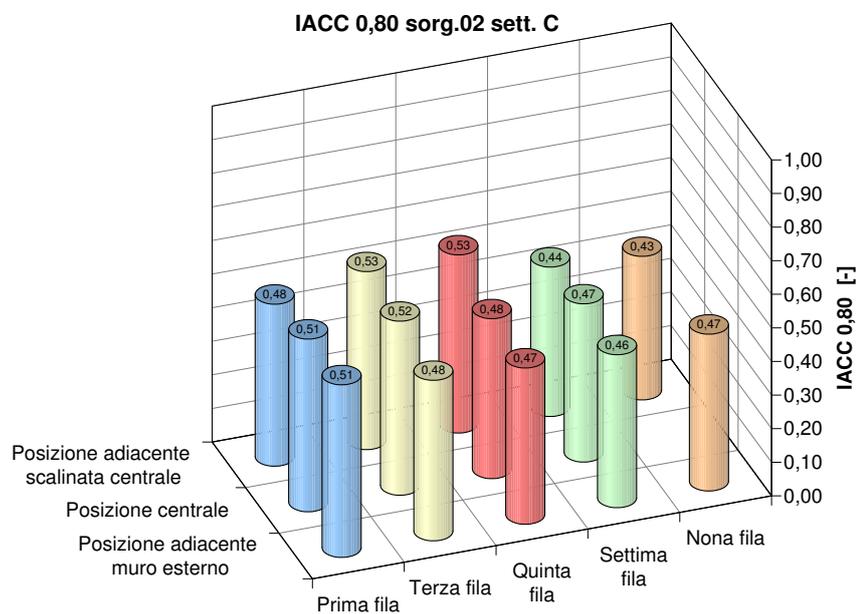


Figura 4.143:  $IACC_{0,80}$  media nei punti settore C sorgente 02

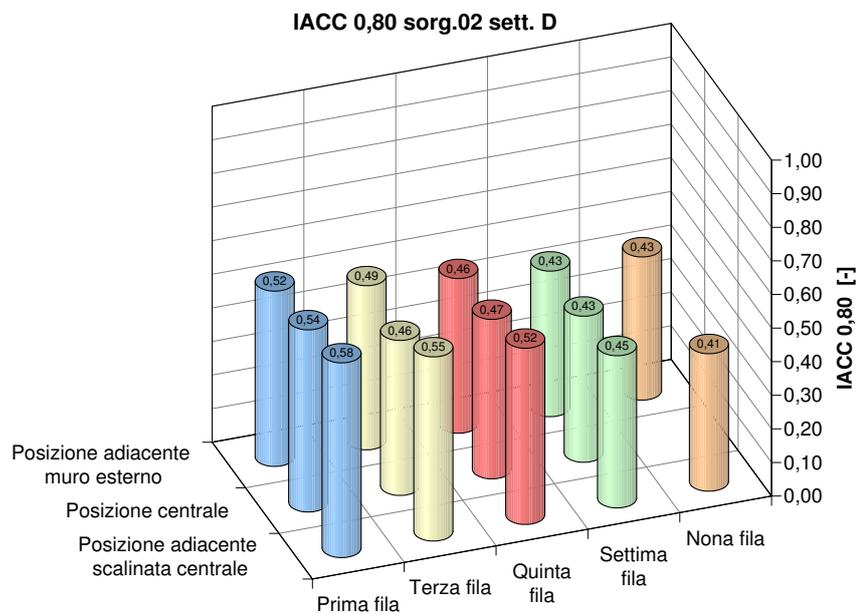


Figura 4.144:  $IACC_{0,80}$  media nei punti settore D sorgente 02

## 4.12 Tabelle riassuntive

In seguito all'analisi dettagliata dei grafici sono stati riassunti, in tabelle, i dati emersi. Sono state create quattro tabelle, una per ogni tipologia di spettacolo analizzata ossia prosa, opera, musica per organo e musica sinfonica. Sono stati individuati, dai dati di letteratura, per ogni tipologia di spettacolo, dei range di appartenenza di ogni parametro. Nelle seguenti tabelle sono stati confrontati i valori medi per ogni zona dell'auditorium con i dati di letteratura relativi appunto alla tipologia di spettacolo e sono stati assegnati dei giudizi positivi o negativi a seconda che il valore medio appartenesse o meno al range individuato. I range ricavati dalla letteratura sono i seguenti:

- **Prosa:**

$$0 < T_{30} < 1s$$

$$D_{50} > 0,5$$

$$C_{80} > 3dB$$

$$(1 - IACC_{0,80}) > 0,6$$

- **Opera:**

$$1,2 < T_{30} < 1,8s$$

$$D_{50} < 0,5$$

$$1 < C_{80} < 3dB$$

$$(1 - IACC_{0,80}) > 0,6$$

- **Musica sinfonica:**

$$1,4 < T_{30} < 2s$$

$$D_{50} < 0,5$$

$$-2 < C_{80} < 6dB$$

$$0,62 < (1 - IACC_{0,80}) < 0,71$$

- **Musica per organo:**

$$2 < T_{30} < 4s$$

$$D_{50} < 0,5$$

$$-12 < C_{80} < -2dB$$

$$0,62 < (1 - IACC_{0,80}) < 0,71$$

|                            |                             |                                |                          |                            |
|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Giudizio<br>pessimo<br>(-) | Giudizio<br>negativo<br>(-) | Giudizio<br>accettabile<br>(0) | Giudizio<br>buono<br>(+) | Giudizio<br>ottimo<br>(++) |
|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------------|

| <b>Analisi per la musica sinfonica</b> |           |           |           |           |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
|  | Settore A | Settore B | Settore C | Settore D |
| C <sub>80</sub> S01                    | 2,95      | 3,1       | 1,56      | 1,8       |
| C <sub>80</sub> S02                    | 2,36      | 2,68      | 2,49      | 2,48      |
| D <sub>50</sub> S01                    | 0,53      | 0,56      | 0,38      | 0,38      |
| D <sub>50</sub> S02                    | 0,52      | 0,53      | 0,46      | 0,47      |
| T <sub>30</sub> S01                    | 1,37      | 1,38      | 1,36      | 1,38      |
| T <sub>30</sub> S02                    | 1,38      | 1,39      | 1,37      | 1,39      |
| 1-IACC <sub>0,80</sub> S01             | 0,45      | 0,43      | 0,49      | 0,51      |
| 1-IACC <sub>0,80</sub> S02             | 0,45      | 0,41      | 0,52      | 0,52      |

| <b>Analisi per l'opera</b> |           |           |           |           |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                            | Settore A | Settore B | Settore C | Settore D |
| C <sub>80</sub> S01        | 2,95      | 3,1       | 1,56      | 1,8       |
| C <sub>80</sub> S02        | 2,36      | 2,68      | 2,49      | 2,48      |
| D <sub>50</sub> S01        | 0,53      | 0,56      | 0,38      | 0,38      |
| D <sub>50</sub> S02        | 0,52      | 0,53      | 0,46      | 0,47      |
| T <sub>30</sub> S01        | 1,37      | 1,38      | 1,36      | 1,38      |
| T <sub>30</sub> S02        | 1,38      | 1,39      | 1,37      | 1,39      |
| 1-IACC <sub>0,80</sub> S01 | 0,45      | 0,43      | 0,49      | 0,51      |
| 1-IACC <sub>0,80</sub> S02 | 0,45      | 0,41      | 0,52      | 0,52      |

| <b>Analisi per musica d'organo</b> |           |           |           |           |
|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                    | Settore A | Settore B | Settore C | Settore D |
| C <sub>80</sub> S01                | 2,95      | 3,1       | 1,56      | 1,8       |
| C <sub>80</sub> S02                | 2,36      | 2,68      | 2,49      | 2,48      |
| D <sub>50</sub> S01                | 0,53      | 0,56      | 0,38      | 0,38      |
| D <sub>50</sub> S02                | 0,52      | 0,53      | 0,46      | 0,47      |
| T <sub>30</sub> S01                | 1,37      | 1,38      | 1,36      | 1,38      |
| T <sub>30</sub> S02                | 1,38      | 1,39      | 1,37      | 1,39      |
| 1-IACC <sub>0,80</sub> S01         | 0,45      | 0,43      | 0,49      | 0,51      |
| 1-IACC <sub>0,80</sub> S02         | 0,45      | 0,41      | 0,52      | 0,52      |

| <b>Analisi per la prosa</b> |           |           |           |           |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                             | Settore A | Settore B | Settore C | Settore D |
| C <sub>80</sub> S01         | 2,95      | 3,1       | 1,56      | 1,8       |
| C <sub>80</sub> S02         | 2,36      | 2,68      | 2,49      | 2,48      |
| D <sub>50</sub> S01         | 0,53      | 0,56      | 0,38      | 0,38      |
| D <sub>50</sub> S02         | 0,52      | 0,53      | 0,46      | 0,47      |
| T <sub>30</sub> S01         | 1,37      | 1,38      | 1,36      | 1,38      |
| T <sub>30</sub> S02         | 1,38      | 1,39      | 1,37      | 1,39      |
| 1-IACC <sub>0,80</sub> S01  | 0,45      | 0,43      | 0,49      | 0,51      |
| 1-IACC <sub>0,80</sub> S02  | 0,45      | 0,41      | 0,52      | 0,52      |

### 4.12.1 $T_{30}$

I valori di letteratura per questo parametro variano in base alle attività che si possono svolgere nell'ambiente. La sala è da concerto e ha capienza e volume piccoli, rispetto alle grandi sale analizzate da Beranek, si possono perciò confrontare i valori misurati con i seguenti:  $1,4 < T_{30} < 2s$ , intervallo ottimale indicato ?? per le sale per musica da camera (per le grandi sale da concerto  $1,7 < T_{30} < 2,3s$ ). Come è evidente dai grafici della distribuzione spaziale e dalle tabelle riassuntive i valori rilevati nell'auditorium sfiorano appena il campo di variazione ideale del parametro. Possiamo considerare quindi il  $T_{30}$  in sala come accettabile, pur essendo apprezzabili valori più alti. Piuttosto il parametro rientra perfettamente nel range indicato per l'opera ( $1,2 < T_{30} < 1,8s$ ). E' invece lontano dai valori ottimali per la prosa con tempi in questo caso troppo alti e addirittura lontanissimo dai valori indicati per la musica d'organo ( $2 < T_{30} < 4s$ ); questo è rilevante data la presenza di tale strumento in sala. La situazione è pressoché identica sia in relazione alla sorgente 01 che 02 con solo un leggero miglioramento nel secondo caso. A questo punto è bene notare che anche per quel che riguarda il  $T_{med}$ , parametro collegato al criterio soggettivo della vivezza del suono e alla pienezza del tono, i valori risultano ottimali per l'opera ( $T_{med} = 1,5 s$ ) e piuttosto scarsi per la musica sinfonica (valore ideale  $T_{med} = 1,9 s$ ). Per quanto riguarda il Rapporto dei bassi, parametro collegato al calore della sala, possiamo vedere che i valori in sala sono più bassi di quelli indicati come ottimali in letteratura ( $1,2 < BR < 1,25$ ); ciò indica che sarebbero apprezzabili tempi di riverberazione alle basse frequenze un po' più lunghi in relazione a quelli delle frequenze medio-alte.

### 4.12.2 $C_{80}$

I valori in letteratura, pur non uniformi fra tutti gli studiosi, indicano in prevalenza valori per le sale da concerto compresi fra  $2 < C_{80} < 6dB$ . I valori misurati in sala sono quindi ottimali. In generale i valori risultano adatti anche all'opera e accettabili per la prosa, cosa non strana e collegata ai tempi di riverberazione non molto elevati. Come per il  $T_{30}$  (troppo corto) anche per il  $C_{80}$  era lecito attendersi valori pessimi per la musica per organo, che infatti ha bisogno di minor chiarezza rispetto ai valori misurati in sala.

### 4.12.3 $D_{50}$

I valori in letteratura per il parametro  $D_{50}$  sono  $D_{50} < 0,5$  per la musica, mentre per il parlato dove è necessario distinguere chiaramente le sillabe il valore è  $D_{50} > 0,5$ . Anche per l'opera in cui deve essere comprensibile il testo si consigliano valori simili al parlato. La sala presenta valori appena superiori allo 0,5 nei settori A e B per cui solo accettabili per la musica sinfonica e per la musica d'organo, mentre si possono considerare buoni per l'opera e la prosa, ciò soprattutto nelle prime file della platea. Nei settori C e D invece si hanno valori più bassi e più uniformi, vicini alle esigenze

della musica, con dei punti in vicinanza della parete laterale con parametro ottimo. La conseguenza è che tale parametro non è più che accettabile per l'opera e la prosa.

#### 4.12.4 $IACC_{0,80}$

Il parametro  $(1 - IACC_{0,80})$  è una misura della dissomiglianza interaurale ed è correlato in senso crescente con la spazialità. I valori in letteratura sono  $0,62 < (1 - IACC_{0,80}) < 0,71$  per la musica sinfonica, da camera e per organo; invece  $(1 - IACC_{0,80}) > 0,6$  è considerata la condizione ottimale per l'opera e la prosa. In sala il parametro assume valori piuttosto bassi soprattutto nei settori A e B: indice di senso di spazialità mediocre. I valori si avvicinano a quelli ottimali solo in vicinanza alle pareti laterali ove le riflessioni su tali superfici provocano maggior diversità di segnale fra i due orecchi.



# Capitolo 5

## TEST SOGGETTIVI IN PLATEA

Dopo aver completato l'analisi dei parametri oggettivi, è sembrato opportuno effettuare una verifica di tipo soggettivo. Questo per avere un'opinione diretta sulla qualità generale dell'acustica dagli utenti della sala: il pubblico. Le interviste sono state effettuate distribuendo all'ingresso dell'auditorium, prima dell'inizio dei concerti, dei questionari che sono poi stati raccolti all'uscita del pubblico.

### 5.1 Il test

La scelta del tipo e della forma del test è stata guidata dall'esigenza di utilizzare una forma già collaudata, per ridurre al minimo la dispersione di dati dovuta a inefficacia del questionario o a difficoltà di comprensione dello stesso. Questo per poter ottenere dei risultati validi. Basato sugli studi di H. Wilkens, elaborato ed utilizzato da molti studiosi quali M.Garai, M.C. Rossi, L. Tronchin [8], [9] è costruito mediante la tecnica del punteggio numerico fra due descrittori soggettivi contrapposti, sfruttando così metodi di analisi comparata. E' costituito da otto coppie di attributi opposti (corrispondenti ad altrettante caratteristiche soggettive di qualità acustica) opportunamente mescolati tra lato destro e sinistro del foglio, in modo da evitare la tendenza ad associare l'attributo positivo ad un determinato lato e viceversa. Per ogni coppia è stata adottata una scala di valori da uno a sei su cui i soggetti intervistati potessero graduare le loro valutazioni soggettive. In figura 5.1 è possibile vedere un esempio di test compilato. Inoltre il questionario richiede di specificare se chi lo compila appartiene ad una di queste categorie: musicista, critico musicale, appassionato, altro, e il ruolo ricoperto nell'evento: esecutore direttore d'orchestra, spettatore. Non ultimo è richiesto di segnare sulla pianta presente sul retro del test la posizione occupata in sala.

#### 5.1.1 Utilizzo dei test

I test sono stati distribuiti in occasione dei concerti di fine anno degli allievi del conservatorio in tre occasioni diverse, data l'esiguità e quindi lo scarso valore statistico dei dati raccolti in due occasioni (meno di 20 test) si è deciso di trattare solo i dati di un concerto. Si tratta in particolare del concerto di fine anno dell'orchestra

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA  
DIPARTIMENTO DI FISICA TECNICA

**STUDIO DELLA QUALITA' ACUSTICA DI UNA SALA**

QUESTIONARIO

| Scrivere la propria valutazione, in base alle coppie di attributi proposti, della qualità acustica del suono percepito |   |              |              |              |              |   |                      |
|--|---|--------------|--------------|--------------|--------------|---|----------------------|
| PIACEVOLE  | 1 | 2            | <del>3</del> | 4            | 5            | 6 | SPIACEVOLE           |
| IMPASTATO  | 1 | 2            | 3            | 4            | <del>5</del> | 6 | DEFINITO             |
| MORBIDO  | 1 | 2            | 3            | <del>4</del> | 5            | 6 | DURO                 |
| AVVOLGENTE   | 1 | 2            | <del>3</del> | 4            | 5            | 6 | CONCENTRATO          |
| SECCO  | 1 | 2            | <del>3</del> | 4            | 5            | 6 | RIMBOMBANTE          |
| ACUTI ACCENTUATI   | 1 | 2            | <del>3</del> | 4            | 5            | 6 | ACUTI NON ACCENTUATI |
| BASSI ACCENTUATI   | 1 | <del>2</del> | 3            | 4            | 5            | 6 | BASSI NON ACCENTUATI |
| SOMMESSO   | 1 | 2            | <del>3</del> | 4            | 5            | 6 | SONORO               |

QUESTIONARIO COMPILATO DA:

- MUSICISTA  
 CRITICO MUSICALE  
 APPASSIONATO  
 ALTRO (Specificare)

IN QUALITA' DI

- ESECUTORE (segnare posizione su piantina sul retro )  
 DIRETTORE D'ORCHESTRA  
 SPETTATORE (segnare posizione su piantina sul retro )

EVENTUALI COMMENTI:.....

Figura 5.1: Esempio di test compilato

del conservatorio tenutosi il 22 Maggio 2007 alle ore 21:00. Il programma di sala comprendeva:

- JEAN SIBELIUS

Valse Triste da Kuolema op.44

- LUDWIG VAN BEETHOVEN  
Concerto n.1 in do maggiore per pianoforte e orchestra op.15
  - Allegro con brio
  - Largo
  - Rondò. Allegro
  
- FRANZ JOSEPH HAYDN  
Sinfonia n. 104 'London' in re maggiore Hob. I:104
  - Adagio, Allegro
  - Andante
  - Minuetto. Allegro
  - Finale. Allegro spiritoso

Orchestra del conservatorio Cesare Pollini di Padova

- Alberto Torin pianoforte
- M.Giuliano Medeossi direttore

Tra il pubblico sono stati distribuiti 450 test, ne sono stati riconsegnati 135, di cui validi 116.

### **5.1.2 Difficoltà nell'utilizzo dei test**

Nonostante la distribuzione dei fogli sia stata accompagnata da una presentazione orale in sala dell'utilità e delle modalità di compilazione del test, molte persone si sono lamentate della difficile comprensibilità sia dei termini usati che della scala numerica. Molti non hanno risposto o per mancanza di penne o per disinteresse, alcuni hanno risposto a caso (ad esempio tutti 3 o tutti 4) o in modo incompleto, per esempio senza segnare la posizione sul retro. Questi ultimi questionari non sono stati ritenuti validi e sono pertanto stati scartati.

## **5.2 Analisi dei test**

I dati raccolti sono stati trattati sia per settore di platea che nella loro totalità. Si è deciso inoltre, data la nutrita presenza in sala di musicisti, di effettuare l'analisi dividendo i questionari in due parti: quelli compilati appunto dai musicisti e quelli riempiti da pubblico non appartenente alla medesima categoria. Questa scelta permette di vedere se un orecchio più educato percepisce l'acustica in modo differente dalle persone con una formazione non specifica. Si riportano di seguito i risultati elaborati a partire dai test.

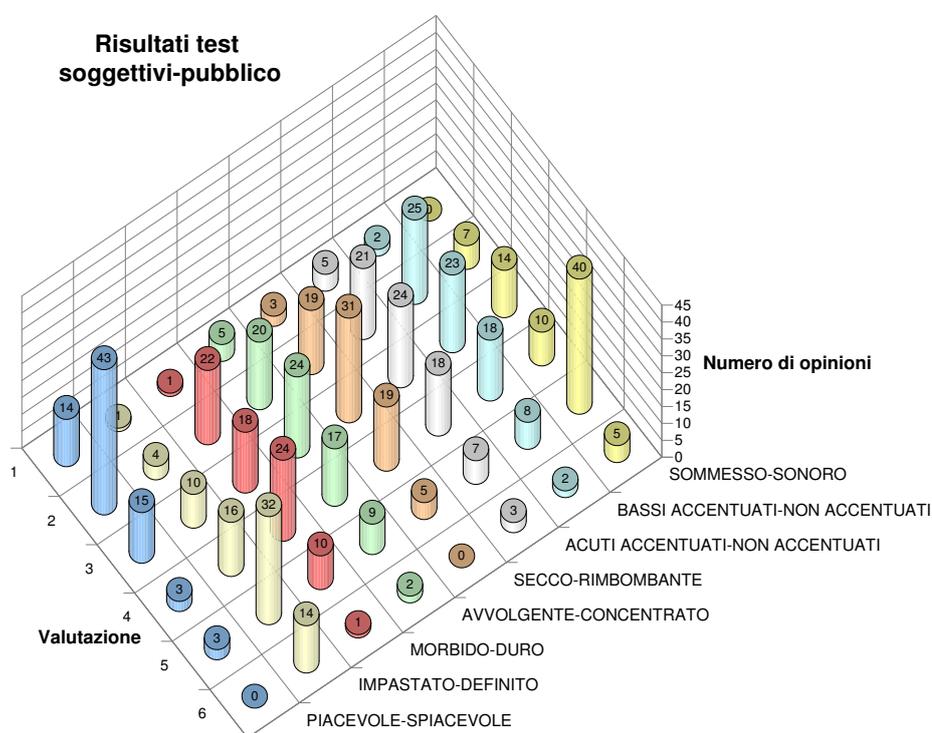


Figura 5.2: Risultati dei test soggettivi compilati da non musicisti

### 5.2.1 Test compilati da non musicisti

La parte di pubblico composta da non musicisti ha così risposto al test proposto (Figura 5.2):

- per quanto riguarda il parametro *piacevole-spiacevole* il pubblico ha ritenuto piacevole con grado 2 l'acustica della sala, non si riscontrano grosse variazioni da settore a settore e anche la deviazione standard risulta fra le più basse, sinonimo di uniformità dell'opinione;
- per il parametro *impastato-definito* le medie dei quattro settori della platea risultano ancora molto vicine, anche se stavolta la deviazione standard pari a 1,17 è maggiore e l'opinione globale è decisamente di suono definito con gradazione 4,5;
- per il parametro *morbido-duro* i risultati sono ancora uniformi nella sala con valore medio 3,3 quindi un valore neutro, solo leggermente spostato verso il morbido, eccezion fatta per il settore B che invece valuta il suono percepito come più morbido rispetto al resto della sala;
- per il parametro *avvolgente-concentrato* la deviazione standard risulta più elevata, sinonimo di maggior variabilità dell'opinione, in effetti benchè le medie

risultino molto vicine al voto neutro, il settore D pende leggermente dalla parte di suono concentrato, mentre le parti A e soprattutto la B della platea ritengono in media l'acustica più avvolgente;

- per il parametro *secco-rimbombante* l'opinione è omogenea nella sala con deviazione standard bassa e medie dei settori molto vicine, che danno come opinione un'acustica leggermente rimbombante con voto medio 3,05;
- per il parametro sull'*accentuazione degli acuti* il valore medio si attesta per una maggior accentuazione di queste frequenze anche se di poco, voto medio 3,13, con un'opinione più decisa in questo senso soprattutto nel settore B. La deviazione standard è però piuttosto alta;
- il parametro sull'*accentuazione dei bassi* presenta i medesimi risultati delle alte frequenze, cioè in media si ritengono leggermente accentuate. Maggior decisione in questo senso soprattutto dal settore D. Deviazione standard nella media;
- infine il parametro *sommesso-sonoro*: risulta decisamente sonoro con voto medio 4,29 abbastanza uniforme nella sala.

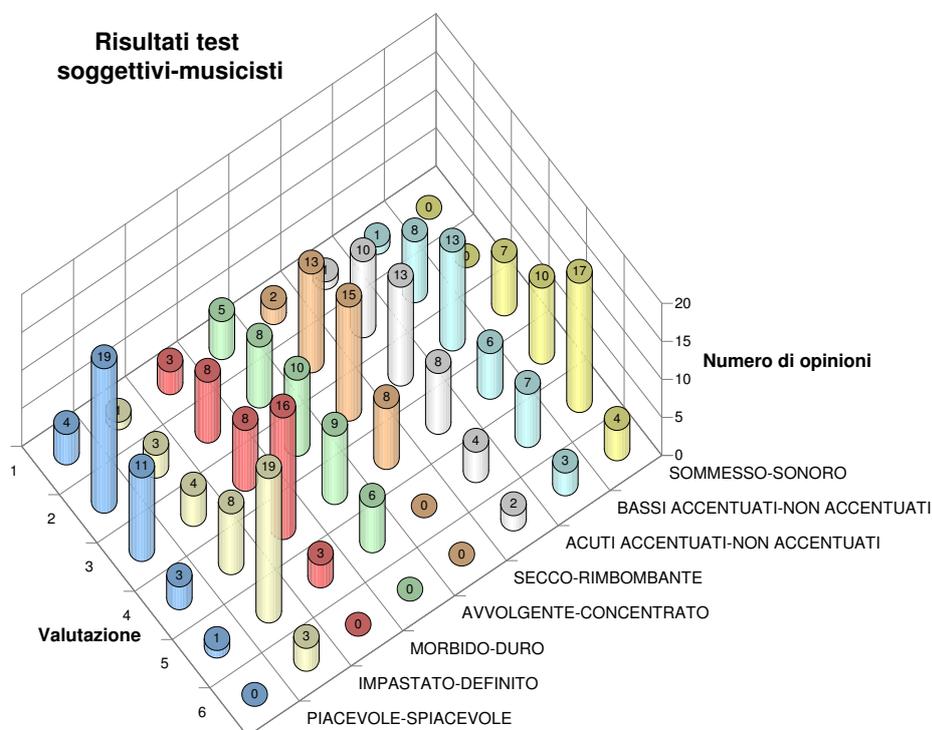


Figura 5.3: Risultati dei test soggettivi compilati da musicisti

### 5.2.2 Test compilati da musicisti

La parte di pubblico composta da musicisti invece ha risposto in questo modo al test proposto (Figura 5.3):

- per il parametro di *piacevolezza* i musicisti ritengono l'acustica piuttosto piacevole con una media di 2,42. E' però da notare che nonostante la deviazione standard abbia un valore più basso della media, il voto medio da settore a settore è piuttosto variabile, si passa da un favorevole 1,83 del settore A ad un 3,00 nel settore B;
- per il parametro *impastato-definito* anche i musicisti ritengono che i suoni raggiungano l'ascoltatore in modo definito con un voto medio di 4,32 anche in questo caso risulta una rilevante differenza fra il settore A (voto medio 4,00) e il settore B (5,00);
- per il parametro *morbidezza* il suono è ritenuto in media solo leggermente morbido (voto 3,21) rispetto al valore neutro in questo caso con lievi differenze da settore a settore;
- per il parametro *avvolgente-concentrato* il risultato propende per un suono avvolgente (voto medio 3,08), anche in questo caso oltre ad una deviazione standard più alta della media è da notare la diversità di opinioni dei vari settori;
- il parametro *secco-rimbombante* propende per un suono secco (voto 2,76) con una deviazione standard piuttosto bassa(0,85),anche se non sono trascurabili la differenze di valutazione fra i settori;
- per il parametro di *presenza delle frequenze acute* i musicisti la giudicano neutra, il voto medio (3,26) è infatti solo leggermente spostato verso l'accentuazione, relativamente alta la deviazione standard;
- per il parametro di *presenza delle basse frequenze* la posizione è sostanzialmente neutra (voto 3,50), con una deviazione standard elevata e grosse differenze fra i settori A e B; quest'ultimo settore evidenzia una mancanza di frequenze basse;
- per quel che riguarda la *sonorità* i musicisti sono concordi nel definire la sala come sonora (voto 4,47) con voti nei vari settori molto simili.

E' interessante notare che i settori con le opinioni più discordanti fra loro sono quelli composti da un numero più basso di test, per cui i singoli test assumono più valore nella media del settore rendendo meno significativo il valore ottenuto.

### 5.2.3 Commenti nei test

Si riportano di seguito i commenti inseriti nei test dal pubblico:

Settore B non musicisti:

- *valutazione 123321 altrimenti è poco chiaro*

Settore C non musicisti:

- *il suono risulta come confinato sul palco e non riesce ad espandersi verso la sommità dell'auditorio come se qualcosa lo impedisse*

Settore D non musicisti:

- *faceva un pò caldo, un pò tanto*
- *gradita aria condizionata*

Settore D musicisti:

- *i bassi risultano molto impastati o proprio non si sentono*
- *si moriva dal caldo*
- *con solo il pianoforte vibrano i sedili*
- *consegna poco chiara a causa dell'ambiguità della scala numerica stretta tra due indicatori*

#### **5.2.4 Confronto tra i risultati delle due categorie di pubblico**

Le due categorie hanno dato risposte analoghe sia in termini di voto medio sia in termini di deviazione standard e questo nonostante la differenza di sensibilità fra le due categorie sia di norma rilevante. Ciò può essere ascritto probabilmente a più cause. In primis la differenza in numero dei test, in quanto il numero di questionari compilato da musicisti risulta notevolmente più basso di quello del resto del pubblico. Questo porta all'aumento del peso nella media dei singoli test. Ovvero un eventuale test che si distacchi molto dalla media porta più variazioni se il campione è piccolo. Da questo punto di vista l'analisi condotta sui test compilati da musicisti risulta meno attendibile. In secondo luogo non è da trascurarsi che anche se i musicisti hanno teoricamente una sensibilità maggiore in tema di acustica ciò non significa per forza che essa sia la medesima per tutti, anzi, più è diverso il bagaglio di esperienze acustiche più sarà probabilmente diversa l'opinione sulla materia. In terzo luogo non è da trascurare che molti dei musicisti in sala sono piuttosto giovani, studenti di conservatorio o neodiplomati con il relativo e, per forza di cose, limitato bagaglio di esperienze, condizione che può rendere la loro opinione molto simile a quella delle persone non facenti parte della categoria. Al contempo si può ipotizzare che invece proprio perchè studenti del conservatorio annesso alla sala, la conoscenza dell'acustica dell'auditorium sia molto buona; lo stesso si può supporre per gli amici e parenti che spesso seguono i concerti

in sala degli studenti. Questo fattore potrebbe rendere molto simili le relative opinioni. E' simpatico notare che comunque nulla vieta che anche le persone non del settore musicale possano avere in termini di sensibilità acustica un bagaglio di esperienze non trascurabile, dovuto magari proprio a costanti frequentazioni di sale da concerto. Molti di essi nel test si sono infatti segnalati come appassionati ed è da considerare probabile la presenza di questo tipo di esperienza.

### 5.3 Relazione fra parametri oggettivi e soggettivi

I risultati dell'analisi soggettiva possono essere correlati con i risultati dell'analisi oggettiva ottenuti per lo stesso genere musicale, ovvero la musica sinfonica.

- Il parametro *piacevole-spiacevole* è puramente soggettivo e non è riconducibile a qualche descrittore acustico oggettivo, dà l'impressione generale del pubblico sulla qualità dell'acustica;
- Il parametro soggettivo *impastato-definito* nelle opinioni degli ascoltatori interpellati è risultato abbastanza definito. Il risultato è in linea con i valori del parametro oggettivo Definizione ( $D_{50}$ ) misurati, che ha dato come risultato una definizione buona o leggermente superiore rispetto ai valori ritenuti ottimi in letteratura; allo stesso modo il parametro è in linea anche con il tempo di riverberazione: infatti più quest'ultimo è corto più l'acustica risulta definita;
- Il parametro soggettivo *morbido-duro* che aveva visto prevalere leggermente il primo è in contrasto con i tempi di riverberazione più bassi rispetto a quelli ottimali, ancorchè, è bene ricordarlo, questi abbiano comunque valori accettabili. In effetti i due parametri sono solitamente legati fra loro in senso crescente: più sono lunghi i tempi di riverberazione soprattutto alle basse frequenze, più è alta la percezione di morbidezza del suono, basti pensare alla sensazione sonora collegata all'acustica delle chiese. Risulta invece corretta la correlazione fra la discreta morbidezza e valori della chiarezza  $C_{80}$  posti circa a metà del relativo intervallo ottimale;
- Il parametro *avvolgente-concentrato* ha visto prevalere leggermente il primo. In questo caso l'indicazione è in senso opposto ai risultati delle misurazioni dei parametri oggettivi. Infatti il relativo parametro oggettivo (1 - IACC) mostra che il senso di spazialità non è buono. Inoltre solitamente l'acustica appare avvolgente in presenza di tempi di riverberazione alti e chiarezza a 80 ms bassa, cioè esattamente il contrario di ciò che è stato registrato con la raccolta dei test;
- Il parametro *secco-rimbombante* invece ha visto prevalere il primo, questa volta in maniera coerente con i risultati dei parametri oggettivi confrontati con i valori in letteratura. Infatti l'acustica risulta secca se il tempo di riverberazione è piuttosto basso e se la definizione e la chiarezza a 80 ms sono alte, che è esattamente ciò che si evince dall'analisi dei dati oggettivi. Inoltre l'effetto del rimbombo

risulta evidente per valori alti del *BR*, coerentemente con l'opinione estrapolata dai test tale rapporto è invece inferiore ai valori in letteratura;

- Per ciò che riguarda la buona *presenza* segnalata dai test contemporaneamente *delle alte e delle basse frequenze* essa non trova riscontro nel parametro Rapporto dei bassi (*BR*) che invece mette in luce una leggera deficienza delle basse frequenze rispetto alle medio-alte. Inoltre ancora per quel che riguarda le basse frequenze la loro buona percezione è solitamente legata anche a tempi alti di riverberazione diversamente a quel che avviene nel caso di questa sala;
- Il parametro *sommesso-sonoro* vede prevalere il secondo nell'opinione della platea. Questo solitamente è collegato in senso crescente con la sensazione di sonoro all'intensità percepita (*G*), parametro che non è stato misurato in sala perchè le attuali tecniche di misura non sono da ritenersi affidabili in quanto i risultati dipendono troppo dall'operatore che effettua le misure, anche a parità di strumentazione.

In generale la sala è apprezzata dal pubblico, sia esso composto da musicisti o da appassionati. L'opinione che vede qualificata l'acustica come piacevole è tutto sommato in accordo con molti valori dei parametri oggettivi misurati che, anche se non ottimali, risultano quasi tutti almeno accettabili. La correlazione tuttavia non risulta buona nè per quanto riguarda il senso di spazialità (*avvolgente-concentrato*), nè per quanto riguarda la presenza delle basse frequenze e, infine, nemmeno per la morbidezza del suono, dati i tempi di riverberazione piuttosto corti.

Da ricordare inoltre che lo stesso pubblico ha segnalato condizioni che possono influenzare l'opinione e quindi la reale correlazione fra parametri oggettivi in sala e percezione soggettiva del suono. Per esempio molti si sono lamentati del caldo, qualcuno di rumori esterni, moltissimi hanno commentato la qualità acustica della sala facendo i complimenti agli esecutori (commenti non riportati nella relativa lista).

Queste considerazioni fanno sorgere la riflessione che sia impossibile separare completamente la valutazione personale dell'acustica da quella del particolare evento sonoro che si ha di fronte e da quella di molti fattori esterni quali benessere ambientale, bellezza estetica della sala, comodità delle sedute, etc.



## Capitolo 6

# ACUSTICA DEL PALCOSCENICO

Le proprietà acustiche del palcoscenico riservato agli esecutori costituisce un elemento molto importante per la buona esecuzione da parte dei musicisti. La sala infatti può essere vista come un'estensione del loro strumento, attraverso la quale essi percepiscono il suono e la qualità dell'esecuzione propri e dei colleghi vicini. I musicisti regolano il livello sonoro, il tempo, il fraseggio, il timbro e l'intonazione in relazione a ciò che sentono. L'acustica del palcoscenico risulta avere un grande impatto sulla capacità di trasmettere un messaggio musicale agli ascoltatori, come pure sulla loro stessa ispirazione e soddisfazione in quanto artisti. Le prime ricerche su questo argomento si ebbero agli inizi degli anni '80. I primi risultati ottenuti da test soggettivi sulle condizioni acustiche dei musicisti furono pubblicati da Marshall e Barron [10]; da allora i principali aspetti della percezione sonora di un ascoltatore sono stati largamente trattati e valutati mediante parametri oggettivi, ormai di uso comune. Il successo delle prime ricerche sulle condizioni acustiche di un ascoltatore fatte negli anni '70 dalle Scuole di Gottingen [11] e Berlino [12], è legato allo sviluppo ed all'uso di tecniche di sperimentazione avanzata, quali le simulazioni elettroacustiche e le registrazioni mediante manichino. Fu dunque un passaggio obbligato quello di applicare le nuove tecniche allo studio dell'acustica di una sala dal punto di vista dai musicisti.

### 6.1 Studi condotti da A.C.Gade

I due temi delle ricerche di A.C.Gade dal 1979 [13],[14] sono: *Quali aspetti soggettivi sono presenti nel giudizio di un musicista su una sala?* e *Quali proprietà della risposta all'impulso determinano ognuno di questi aspetti soggettivi?* Dopo l'esperienza condotta da M. Barron [15],[16], è stato necessario definire un vocabolario dei principali fattori soggettivi, attraverso interviste a 32 musicisti classici professionisti. Fu chiesto di descrivere gli elementi per loro sensibili dell'acustica di una sala e tali aspetti furono poi ordinati e correlati ai vari tipi di performance. Dall'insieme di questi materiali fu estrapolato il gruppo di parametri soggettivi o aspetti riportato in seguito:

- **RIVERBERAZIONE (REVERBERANCE):** è percepita per lo più durante le pause o cambiamenti di tempo, in quanto prolunga le note appena suonate. Uni-

sce note vicine, può sfuocare dettagli in una esecuzione e può dare un senso di risposta della sala.

- **SOSTEGNO (SUPPORT)**: è la proprietà che dà al musicista la sensazione di sentirsi e che non è necessario forzare lo strumento per sviluppare il suono. Si differenzia dalla riverberazione poiché si percepisce durante l'esecuzione.
- **TIMBRO (TIMBRE)**: identifica l'influenza dell'ambiente sul colore del suono e sul bilanciamento di livello in registri differenti. All'interno di un gruppo il timbro può anche influenzare le impressioni dei musicisti sul bilanciamento tonale tra i vari strumenti.
- **DINAMICA (DYNAMICS)**: descrive l'intervallo delle intensità sonore ottenibili all'interno di una sala e il livello con cui la sala obbedisce alle intenzioni dinamiche del musicista.
- **ASCOLTO RECIPROCO (HEARING EACH OTHER)**: è la proprietà richiesta per un gruppo di musicisti che suonano assieme, cioè la necessità di suonare con precisione ritmica, intonati, bilanciati di livello, timbro ed espressività. La situazione è soddisfacente solo quando esiste un bilanciamento delicato tra l'ascolto di se stessi e degli altri.
- **RITARDO (TIME DELAY)**: è la conseguenza della velocità del suono e può diventare piuttosto fastidiosa quando i membri di un'orchestra sono lontani tra di loro, in quanto può causare imprecisione ritmica. I primi quattro aspetti si possono considerare riguardanti solisti, mentre gli ultimi due aspetti riguardano gruppi di musicisti. Dopo aver definito questa sorta di vocabolario soggettivo, il passo successivo è stato indagare quali proprietà del campo sonoro governino le differenze percepite in relazione ai diversi aspetti.

### **6.1.1 Approccio sperimentale: spazio acustico reale e simulazioni**

Si è scelto di organizzare gli esperimenti sia in modo simulato (camera anecoica), sia in sale reali; in un campo sonoro simulato infatti, i parametri possono essere variati e controllati con precisione ma la qualità del suono e la fedeltà sono limitate; al contrario in una sala reale non vi è problema di fedeltà ma il numero e la qualità delle variazioni possibili è sempre limitata. Inoltre, i giudizi acustici in una sala reale possono essere disturbati da impressioni visive mentre nella simulazione la visione è neutra, seppure innaturale. E' sempre difficile interpretare i risultati di esperimenti riguardanti la qualità acustica, a causa del vocabolario ambiguo utilizzato per descrivere i vari aspetti di un'esperienza sonora. I musicisti utilizzano spesso termini molto più coloriti di quelli scelti e non sempre questi aspetti possono essere giudicati separatamente.

### 6.1.2 Esperimenti di laboratorio con solisti e gruppi di musicisti

Tra gli aspetti riguardanti i solisti, essenzialmente si voleva investigare il concetto di *SOSTEGNO*; fin dal 1931 Knudsen [17] descriveva questo parametro e lo metteva in relazione alle prime riflessioni provenienti da superfici vicine. Tuttavia non è chiaro se tali riflessioni siano percepibili o mascherate dal suono diretto dello strumento che ha un livello dominante alle orecchie del musicista. Pertanto si è effettuato un esperimento con il fine di determinare la soglia di udibilità per una singola riflessione del suono proveniente dallo strumento stesso del solista. Tale soglia è stata poi confrontata con i livelli di prime riflessioni misurate in sale reali.

Essa infatti può essere influenzata da fattori quali il ritardo, la composizione spettrale del suono, la direttività della sorgente, il brano suonato e la presenza contemporanea di altri suoni. Il test utilizzato consisteva nella sequenza molto breve di una nota lunga e grave seguita da due note acute e brevi. L'esperimento fu condotto su violinisti e violoncellisti solisti e su flautisti solisti. Ne risultò che è più facile per i flautisti che per i violinisti percepire l'influenza delle riflessioni e che, come si poteva supporre, per tutti i musicisti ciò diventa più facile nel momento in cui il ritardo delle riflessioni aumenta. Vari ulteriori esperimenti con un solista hanno confermato che alti livelli di riflessioni iniziali del suono del proprio strumento favoriscono l'esecuzione e perciò essi devono essere udibili.

Furono effettuati in seguito esperimenti con dei trio flauto-violino-violoncello. Mediante test comparativi a coppie, i soggetti hanno giudicato differenti campi sonori circa la predominanza del loro suono rispetto agli altri strumenti. Tempi più lunghi di riverberazione sono preferiti dagli strumentisti. Il riverbero si può anche interpretare come energia che giunge oltre i 100 ms e che contribuisce al sostegno. E' anche possibile che il sostegno sia semplicemente legato all'energia totale del suono riflesso, del quale il 90 per cento giunge nei primi 200-300 ms. Bisogna precisare che la differenza di livello del campo sonoro totale, cioè suono diretto e suono riflesso, tra una situazione con livello del suono riflesso inferiore di 10 dB al suono diretto comparata con una situazione senza suono riflesso, è inferiore a 0.5 dB. Per cui è difficile credere che il sostegno sia correlato solo al livello totale.

#### Risultati degli esperimenti con i solisti

Per i musicisti di alcuni strumenti può accadere che l'energia delle prime riflessioni (tra 20 e 100 ms) del loro stesso suono può essere completamente mascherata in alcune sale in quanto la soglia di percezione è da 10 a 20 dB più alta del livello di una singola riflessione su una vicina superficie riflettente. Tuttavia livelli udibili di prime riflessioni sono da preferirsi avendo l'effetto soggettivo che abbiamo definito *sostegno*. Non è ancora chiaro se il sostegno sia determinato solo dalle prime riflessioni o anche dal contributo delle riflessioni più ritardate, ma una certa quantità di riverbero è da preferire.

## Risultati degli esperimenti con i gruppi di musicisti

Il ritardo della prima parte del suono emesso dai musicisti vicini dovrebbe essere piccolo. Un suono diretto non mascherato è desiderabile. Se invece esso risulta mascherato non potrà essere completamente compensato da una energia iniziale forte ma ritardata. Il livello della prima energia ricevuta, ovvero del suono diretto e delle prime riflessioni, è importante per l'ascolto reciproco. Il riverbero ha un effetto negativo su questa possibilità.

### Nuovi parametri oggettivi

Sulla base dei risultati fin qui ottenuti sono stati definiti i due parametri oggettivi ST (Support) e EEL (Early Ensemble Level). Entrambi sono parametri costituiti da rapporti di energia; il parametro ST (sostegno) descrive il rapporto tra l'energia delle prime riflessioni e l'energia del suono diretto. Il rapporto è misurato a 1 m dalla sorgente, comparabile con la distanza tra lo strumento e l'orecchio del musicista. Quindi questo parametro intende valutare quanto le prime riflessioni aiutino il musicista sommandosi al suo suono diretto. Valori elevati di ST corrispondono ad una forte sensazione di sostegno. Probabilmente esiste una soglia di sostegno sotto la quale il sostegno è assente, specifica per ogni strumento musicale. Data l'incertezza sul contributo utile delle riflessioni più ritardate, è possibile definire il parametro ST sia con limite di integrazione superiore  $t_2$  pari a 100 ms ( $ST_1$ ), sia con limite di integrazione superiore  $t_2$  pari a 200 ms ( $ST_2$ ). L'energia del suono diretto invece è quella compresa tra 0 e 10 ms.

$$ST = 10 \log \left( \frac{E(t_1 - t_2)}{E(dir)} \right) \quad [dB]$$

ove  $ST_1$  e  $ST_2$  sono espressi in ms.

EEL è il rapporto tra la prima energia ricevuta e l'energia emessa, essendo quest'ultima descritta dal suono diretto misurato a 1 m. Un alto valore di EEL corrisponde a buona possibilità di ascolto reciproco. EEL misura l'efficienza della trasmissione del suono all'interno dell'orchestra in relazione alla velocità e al livello.

$$EEL = 10 \log \left( \frac{E(0 - 80ms)}{E(dir)} \right) \quad [dB]$$

Dunque due aspetti maggiormente caratterizzano le impressioni acustiche dei musicisti: il sostegno e l'ascolto reciproco. A causa però dei limiti insiti nella simulazione già discussi, Gade ha ritenuto necessario testare la validità di tali parametri oggettivi attraverso ulteriori campagne di esperimenti in sale reali.

### 6.1.3 Esperimenti sul campo e sintesi dei risultati

I nuovi due parametri non considerano, tuttavia, la complessità dell'acustica di una sala reale. Quando sono misurati con trasduttori omnidirezionali questi parametri non considerano la direttività degli strumenti o la sensibilità dei musicisti ad altri suoni, e non considerano nemmeno i problemi di mascheramento tra i diversi suoni, significativi in orchestra. In conseguenza a ciò si fecero esperimenti più realistici con un'intera orchestra che suonava in vere sale da concerto, sebbene questa procedura implichi un ridotto controllo delle condizioni sperimentate. Gli scopi della sessione di esperimenti sul campo erano:

1. provare la validità dei risultati di laboratorio in condizioni reali
2. ottenere il numero dei parametri soggettivi indipendenti rilevanti secondo i musicisti.

#### Metodologia di misura

I parametri oggettivi rilevati in ogni diversa configurazione erano:

$ST_1$  e  $ST_2$ , EEL

RT (reverberation time)

EDT (Early Decay Time)

$T_s$  (Center time)

C (Clarity)

CS

La procedura di misura prevedeva n 3 postazione della sorgente sonora sul palcoscenico: S1 solista vicino al direttore, S2 sezione degli archi, S3 sezione dei fiati lontano in seconda fila. Inoltre erano definiti 5-7 punti per i ricevitori in platea e 3 punti ricevitori sul palcoscenico, P1 oboe solista, P2 sezione archi e P3 sezione fiati. La distanza tra la sorgente e il ricettore sul palco è pari a 1 m. Durante le misure vi erano aste, leggio e sedie. Le valutazioni soggettive furono registrate mediante questionari somministrati ai musicisti dopo una o due ore di prove nella sala in esame; i test erano costituiti da 7 scale di lunghezza pari 70 mm sulle quali i musicisti dovevano segnare il punto di soddisfazione. Le scale corrispondevano ciascuna ad uno degli aspetti scelti da Gade per le valutazioni soggettive; unica eccezione erano gli aspetti riguardanti l'ensemble, ulteriormente suddivisi:

ENSAMBLE generale,

ENSAMBLE altri,

ENSAMBLE se stessi,

SUPPORT,

REVERBERANCE,

TYMBRE,

## DYNAMICS

Le orchestre che parteciparono all'esperimento furono tre; i brani eseguiti in ogni sala variavano a seconda del repertorio previsto per il successivo concerto. Gruppi di musicisti (20 nelle sale danesi e 30 nelle sale inglesi) erano raggruppati in modo da simulare le diverse sezioni d'orchestra, ovvero 10-12 archi, 3-6 fiati e 3-6 ottoni, saltuariamente un timpano ed un'arpa.

### Risultati nelle sale danesi

Tutti i dati compilati dai musicisti nelle diverse sale furono analizzati mediante metodi statistici e correlati con i risultati delle misure effettuate sul campo. Le sale danesi mostrano che in tutte le scale soggettive, ad eccezione di quella del *TIMBRO*, vi è una significativa differenza tra le sale. Inoltre, in relazione al fattore *RIVERBERAZIONE* i risultati sono molto diversificati tra i vari strumenti. Il tentativo di correlare direttamente le risposte soggettive mediate con i parametri oggettivi rilevati ha dato solo alcune relazioni utili come ad esempio *RIVERBERAZIONE* è correlato a *RT* e *EDT*. Nelle sale danesi le sei scale soggettive (escluso *TIMBRO*) si correlano principalmente con i parametri oggettivi che misurano il livello di energia riflessa rispetto al suono diretto (*CS*, *ST<sub>1</sub>* e *ST<sub>2</sub>*). Il giudizio *SOSTEGNO* risulta correlato con *ST<sub>1</sub>* e *ST<sub>2</sub>* mentre il giudizio *RIVERBERAZIONE* e *DINAMICA* sono legati al livello delle riflessioni più ritardate (*CS*). Il fattore *TIMBRO* risulta correlato solo con il parametro *EDTF* (una variazione in frequenza dell'*EDT*).

$$EDTF = \frac{EDT(250Hz) + EDT(500Hz)}{EDT(1kHz) + EDT(2kHz)} \quad (6.1)$$

### Risultati nelle sale inglesi

A differenza delle indagini soggettive nelle sale danesi, il gruppo di musicisti che ha partecipato ai test sulle sale inglesi era costituito da 30 musicisti; nonostante l'aumento è stata mantenuta la proporzione tra le diverse sezioni dell'orchestra. Contrariamente a quanto risultato nelle sale danesi, tutte le scale facenti parte del fattore 1 ottenuto dall'analisi statistica, eccetto il timbro, sono altamente correlate con i parametri convenzionali di *RIVERBERAZIONE* e *CHIAREZZA*. Il *TIMBRO* che costituisce invece il fattore 2 dell'analisi statistica risulta ancora legato solo a *EDTF*.

### Risultati Danish Radio Studio One

Questa sala, sin dal giorno della sua inaugurazione nel 1945, è stata sempre criticata dai musicisti poichè essi non potevano sentirsi gli uni gli altri in modo soddisfacente. Con l'occasione di un grande restauro fu possibile continuare e sviluppare le ricerche

acustiche sul campo. Sono state definite tre variabili su cui si è sperimentato:

- le pareti laterali del palco, piane, sono state modificate con forma a zig-zag;
- diminuite le altezze e ridisegnati i riflettori a soffitto;
- arretrata l'orchestra di 2 metri.

Queste diverse configurazioni (due configurazioni relative alle pareti laterali, due configurazioni relative alla posizione dell'orchestra e tre del soffitto) sono state testate man mano per un totale di 12 configurazioni. Il test soggettivo però, in questa indagine, aveva solo due scale soggettive (sentire se stessi e sentire gli altri). Tra tutti i parametri,  $ST_1$  dimostrò la più alta correlazione con i dati soggettivi (coeff. 0,91). Gli effetti più evidenti sono stati ottenuti dai riflettori a soffitto. La migliore configurazione tra tutte è stata con riflettori a soffitto nella posizione più bassa, riflettori a parete montati e orchestra in posizione arretrata. L'effetto dei riflettori a parete è apprezzabile solo se i riflettori a parete non sono completamente abbassati, poichè in quel caso prevalgono decisamente le riflessioni provenienti dal soffitto.

### Valutazioni conclusive

Le correlazioni tra i parametri oggettivi e le due scale soggettive di 'sentire se stessi' e 'sentire gli altri' per i tre gruppi di sale testate hanno mostrato significative differenze. Nelle sale danesi il giudizio dei musicisti è risultato essere basato su aspetti legati alla prima energia, mentre nelle sale inglesi e nello studio il giudizio è risultato essere basato su aspetti legati alla riverberazione. L'unica spiegazione di questo risultato è il fatto che l'orchestra era abituata a suonare nelle sale danesi. Nonostante individualmente si possa non avere delle perplessità sull'acustica di una sala, è sempre possibile ricavare i parametri oggettivi che sono in grado di predire precisamente il giudizio dell'*esecutore medio*. I solisti ed i piccoli gruppi vocali sono sensibili alle prime riflessioni poichè esse rinforzano il loro stesso suono. Il parametro  $ST_2$  è il più appropriato per descrivere il concetto di sostegno proprio dei solisti. Il parametro chiarezza (CS) dimostra la sua importanza nel descrivere gli aspetti soggettivi di riverberazione e dinamica. Tuttavia invece di usare CS come parametro descrittore dei livelli di energia ritardata, è più opportuno usare  $ST_{late}$ , misurato ad 1 metro dalla sorgente e definito come segue:

$$ST_{late} = 10 \log \left( \frac{E(t_{100} - t_{1000})}{E(dir)} \right) \quad [dB] \quad (6.2)$$

ove  $t_{100}$  e  $t_{1000}$  sono espressi in ms.

EDTF infine è il miglior parametro per descrivere il timbro. Per misure acustiche riferite ad un gruppo il parametro opportuno è  $ST_1$ . Il valore massimo misurato è stato -10,9 dB.  $ST_1$  e  $ST_2$  sono sempre strettamente legati, essendo  $ST_2$  di circa 1-3 dB più alto di  $ST_1$ .  $ST_2$  pertanto sarà compreso tra -8 e -12, valori ottimali, e corrisponde al massimo grado di sostegno ottenibile da un sala grande. Il confronto tra la scala soggettiva e di valori del tempo di riverberazione misurati definiscono come valori ottimali

2 secondi per sale grandi e musica sinfonica. Nei casi in cui i musicisti hanno familiarità con la sala il fattore fondamentale nei giudizi di qualità pare essere la quantità di energia restituita dall'ambiente in relazione all'energia emessa come misurato dal ST. Quando invece non vi è l'abitudine di suonare in una certa sala il fattore principale è il livello di riverberazione o altri parametri di chiarezza. I musicisti giudicano il timbro come una qualità indipendente, correlata all'EDT. L'esperimento nella Danish Radio Concert Hall dimostra che il fattore più efficace per dare energia iniziale è il soffitto o i riflettori sopra il palco, che necessitano di essere costruiti accuratamente per evitare effetti di colorazione. Gade propose misure oggettive per valutare il sostegno sonoro che aiuta i musicisti a sentire bene se stessi e, per le condizioni di insieme, a sentire bene gli altri. Più tardi furono introdotte tre diverse versioni del parametro ST:

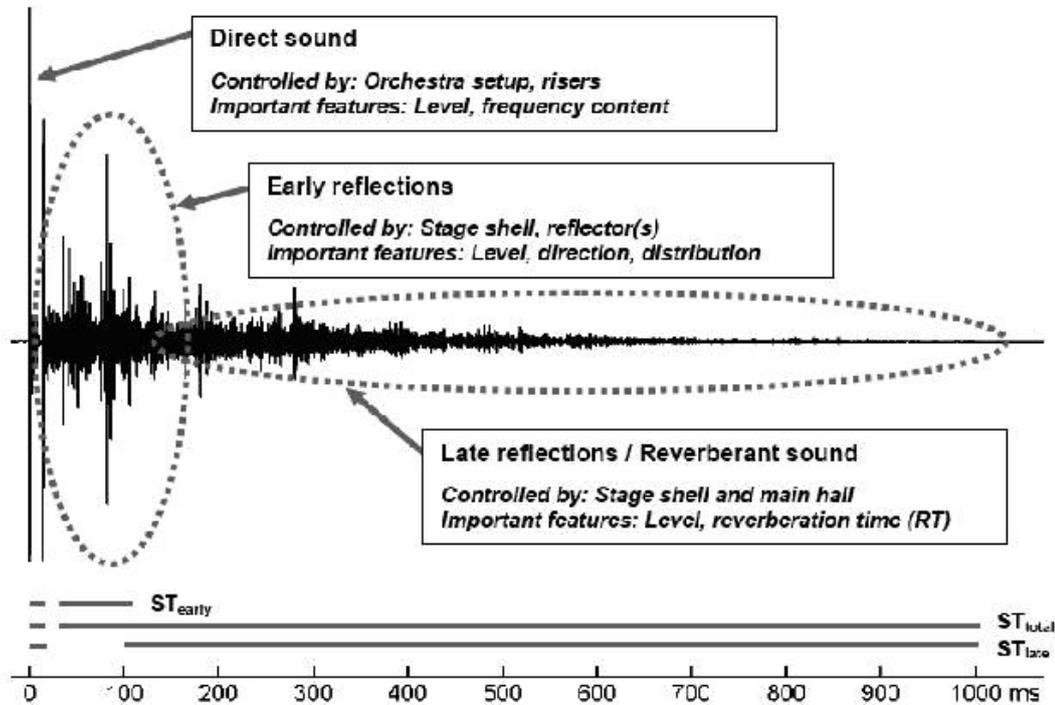
- $ST_{early}$  per le misure in ensemble e la necessità di udire bene gli altri musicisti e corrisponde all'energia che giunge nell'intervallo 20-100 ms, in rapporto col suono diretto;
- $ST_{late}$  per valutare l'impressione di riverberazione;
- $ST_{total}$  per valutare il sostegno sonoro utile ad ogni singolo musicista.

Se analizziamo la natura delle diverse definizioni che attualmente si usano del parametro ST (support),  $ST_{early}$  misura l'energia totale delle prime riflessioni, ovvero il contributo di ciò che si è scoperto essere utile ai musicisti,  $ST_{late}$  misura l'energia più ritardata importante per un solista. Tuttavia non vi sono informazioni circa la densità e la direzione delle riflessioni, non sono considerati effetti di colorazione ed è per questo che spesso non vi è accordo tra i valori di  $ST_{early}$  misurati sul palco e la sua reputazione tra i musicisti che vi suonano. Uno dei vantaggi legati al parametro ST è che ora è stato definito un modo standardizzato di misurare le caratteristiche di un palcoscenico. I valori misurati sul palcoscenico, poichè sono rilevati con sorgente ad 1 metro, sono sensibili alla direttività della sorgente, non omni-direzionale nel caso degli strumenti.

## 6.2 Studi recenti

Nel 2000 A. Farina [20] studiò otto teatri d'opera per musica sinfonica in Italia. Mediante questionario a musicisti professionisti condusse test soggettivi ed effettuò inoltre il rilievo in loco dei parametri acustici oggettivi. Trovò alcune correlazioni significative che lo portarono a sviluppare un nuovo tipo di questionario più breve. Nel 2002 J. Sanders e Marshall [21] indagarono sull'ipotesi che, per i musicisti in piccoli gruppi piuttosto che in grandi orchestre, la possibilità di sentirsi gli uni gli altri è della massima importanza per la loro opinione sulla sala. Fecero una indagine in 24 sale in Nuova Zelanda e relative correlazioni tra parametri oggettivi e soggettivi; si osservò che il parametro Sostegno era quello maggiormente correlato con l'aspetto soggettivo di impressione acustica generale della sala.

Nel 2003 Chiang e altri [22] studiarono l'acustica del palcoscenico di 5 sale per musica da camera. Essi scoprirono che i parametri associati alle prime riflessioni come  $ST_{early}$

Figura 6.1: Parametri  $ST$ 

o all'energia globale come  $G$  erano strettamente intercorrelati e che anche i parametri associati all'energia più ritardata  $ST_{late}$  ( $C_{80}$  e  $T_s$ ) erano correlati tra loro. La loro più significativa scoperta fu che, per una sala adatta alla musica da camera, i parametri associati alle prime riflessioni erano correlati negativamente con il giudizio di 'sentire se stessi' e di 'impressione acustica generale'.

Ulteriori recenti ricerche sono state sviluppate da M. Barron sull'acustica del palco e sulle necessità dei musicisti sul palcoscenico [24], [25]. Nel 2006-07 il Politecnico di Torino [26],[27], [28] sviluppa ulteriormente gli studi precedenti e, riproponendo la metodologia delle ricerche di A.C.Gade, effettua misure e test soggettivi in cinque sale da concerto con la partecipazione delle relative orchestre fisse. I risultati evidenziano nuovamente l'intercorrelazione tra parametri oggettivi, nello specifico secondo tre gruppi formati da:

1.  $C_{80}$ ,  $T_e D_{50}$
2. EDT, parametri  $ST$ ,  $T_{20} e BR$
3. EDTF,  $BR$  e TR

Inoltre, la correlazione tra parametri oggettivi e dati soggettivi evidenzia chiaramente che EDT ed i parametri  $ST$  sono connessi con tutti gli aspetti soggettivi usati nel questionario. Il primo gruppo di parametri associati alla chiarezza del suono sembrano

essere importanti per gli aspetti che determinano il suonare bene (*chiarezza, dinamica e tempo*).  $T_{20}$  risulta importante per tutti gli aspetti associati all'acustica del palco (*percezione del proprio strumento, riverberazione, avvolgimento sonoro, robustezza del suono*). I parametri del terzo gruppo valutano il bilanciamento tra le varie frequenze.

# Capitolo 7

## MISURE ACUSTICHE SUL PALCOSCENICO

In seguito alle misurazioni effettuate, sono stati elaborati i dati rilevati con dei fogli di calcolo excel. Si sono così ottenuti dei grafici riguardanti i vari settori del palco. Si riportano di seguito i grafici dei diversi parametri analizzati, in cui il sistema di riferimento utilizzato è il musicista posto sul palco e rivolto verso il pubblico.

### 7.1 Support, $ST_{early}$

$ST_{early}$  misura l'energia totale delle prime riflessioni, ovvero il contributo di ciò che si è scoperto essere utile ai musicisti. Più specificatamente è usato per le misure relative alla musica eseguita da gruppi, rappresenta correttamente la necessità di udire bene gli altri musicisti e corrisponde all'energia che giunge nell'intervallo 20-100 ms, in rapporto col suono diretto.

#### 7.1.1 Andamento del parametro nei punti sorgente

In tutti i successivi grafici i quattro solidi rappresentano i valori del parametro misurati nei quattro punti posti davanti, dietro e ai lati della sorgente omni-direzionale. Tale sorgente è perciò da immaginare situata in centro al piano orizzontale del grafico.

- Il grafico relativo al punto di misura 01 (Figura 7.1) evidenzia un preciso andamento del parametro in relazione alla posizione della sorgente sul palco e rispetto al punto di misura: i valori registrati sono più bassi di fronte alla sorgente e aumentano spostandosi prima nei punti laterali e poi in quello posteriore. I due punti laterali hanno valori simili.

- Il grafico relativo al punto di misura 02 (Figura 7.2) evidenzia un andamento del parametro diverso dal precedente: i valori registrati sono più bassi di fronte alla sorgente e aumentano spostandosi prima in quello posteriore e poi nei punti laterali, i quali hanno

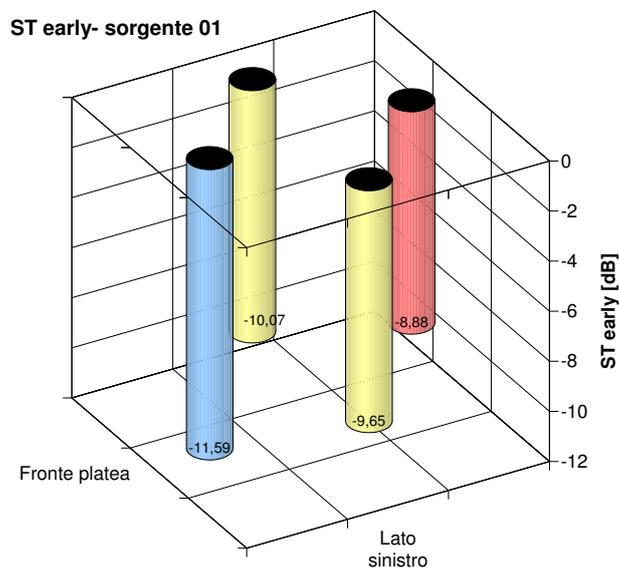


Figura 7.1:  $ST_{early}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 01

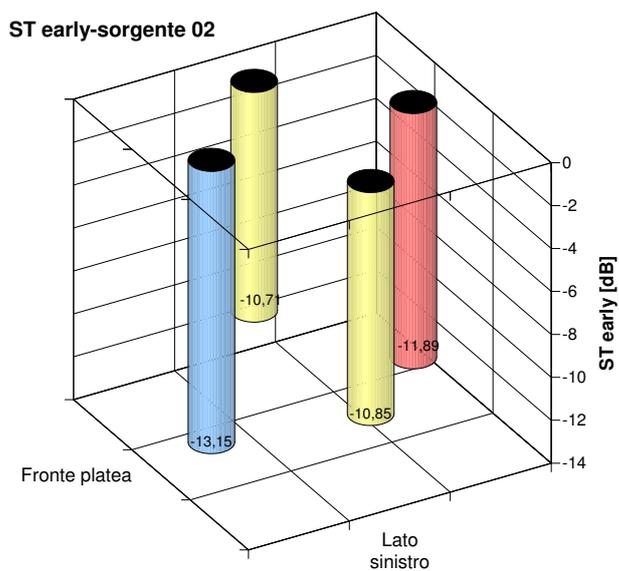
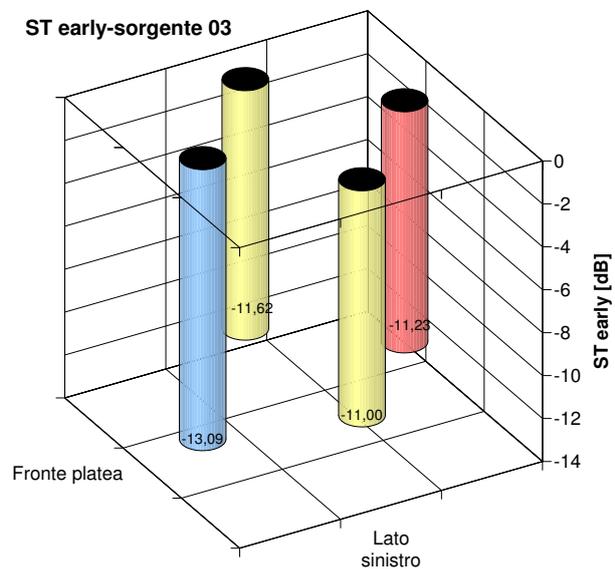
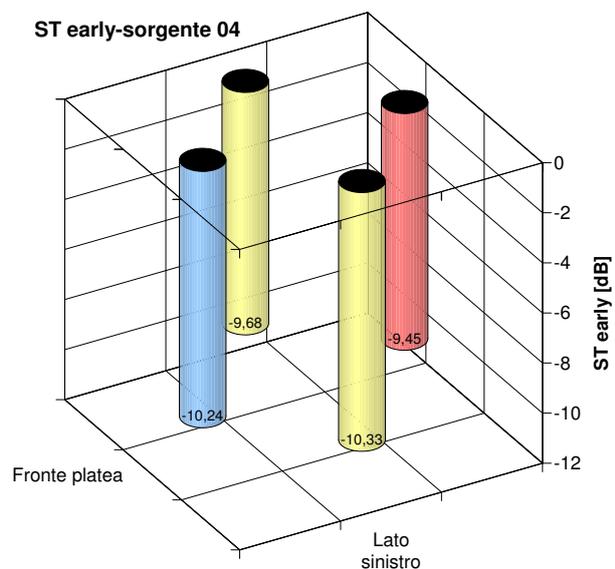


Figura 7.2:  $ST_{early}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 02

Figura 7.3:  $ST_{early}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 03Figura 7.4:  $ST_{early}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 04

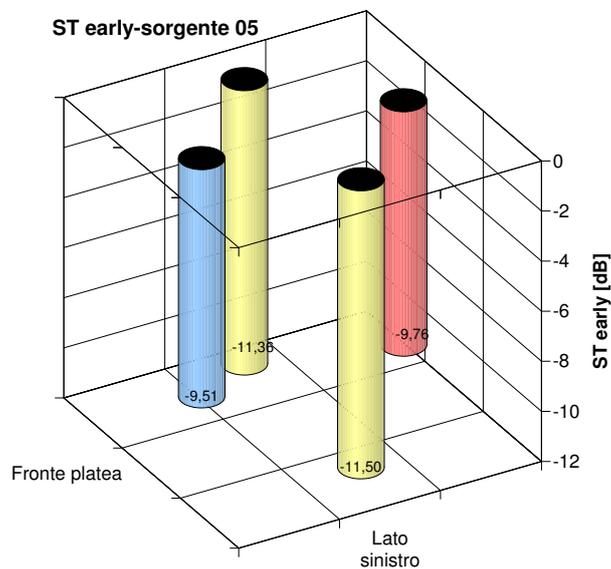


Figura 7.5:  $ST_{early}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 05

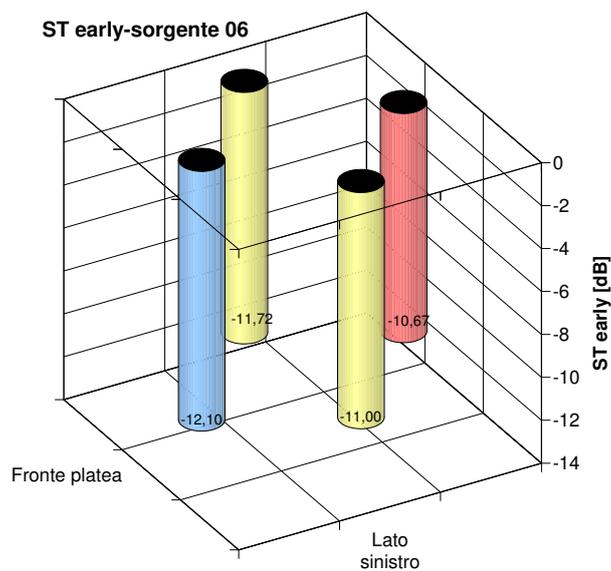


Figura 7.6:  $ST_{early}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 06

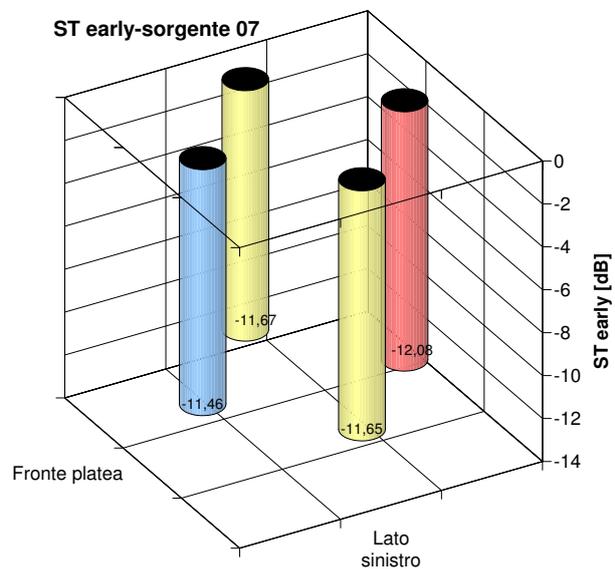


Figura 7.7:  $ST_{early}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 07

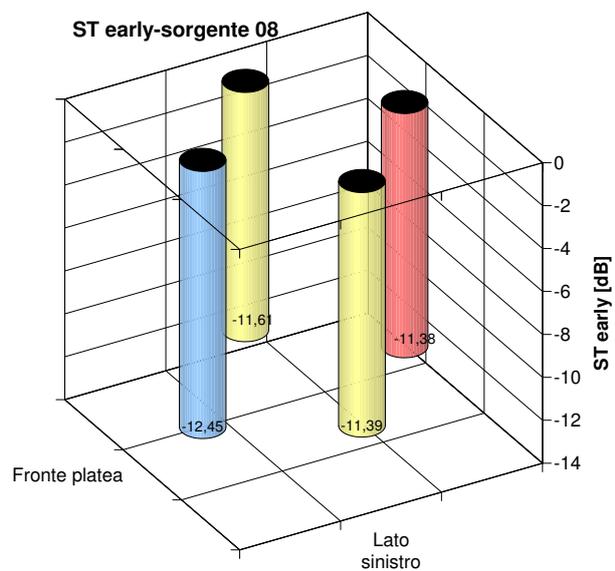


Figura 7.8:  $ST_{early}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 08

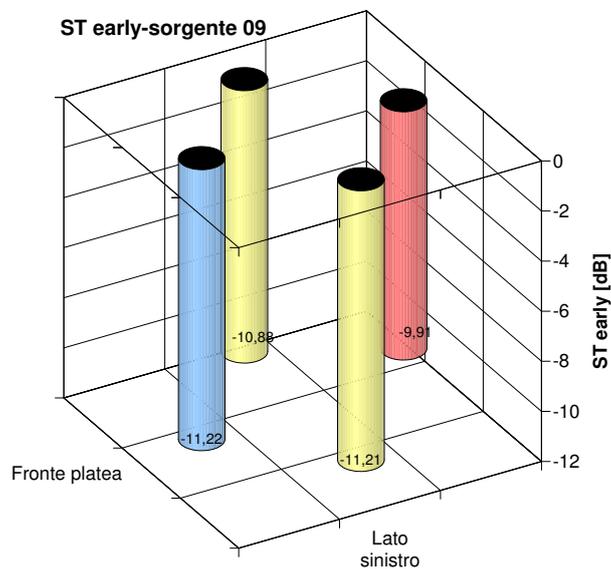


Figura 7.9:  $ST_{early}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 09

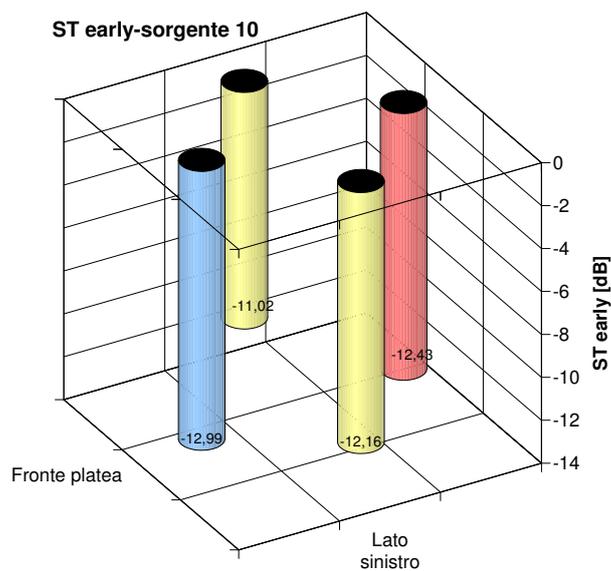


Figura 7.10:  $ST_{early}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 10

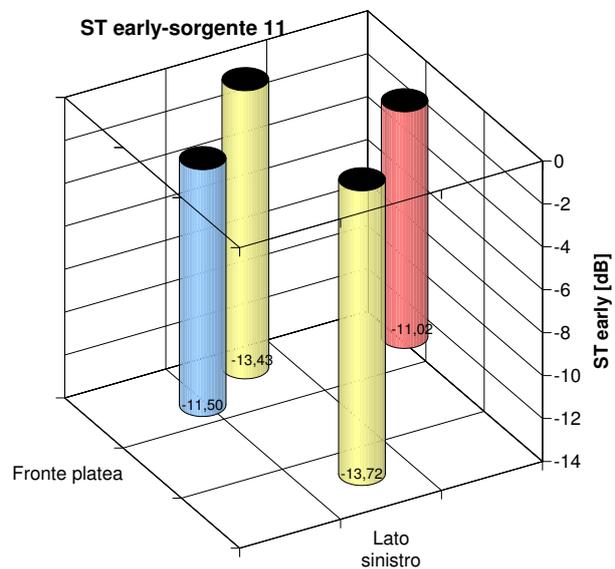


Figura 7.11:  $ST_{early}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 11

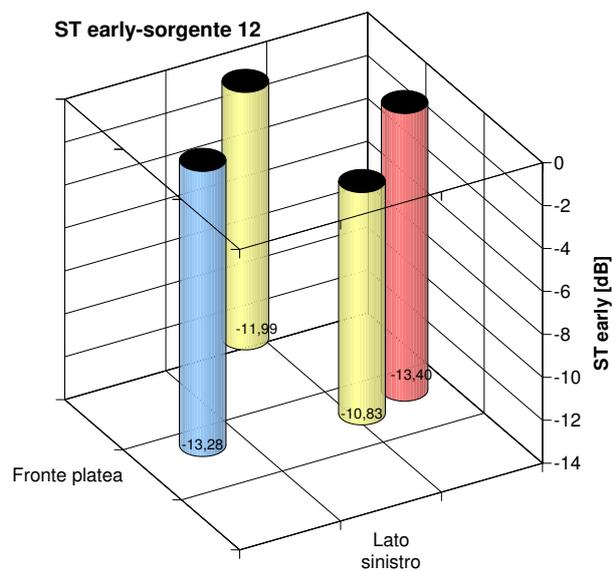


Figura 7.12:  $ST_{early}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 12

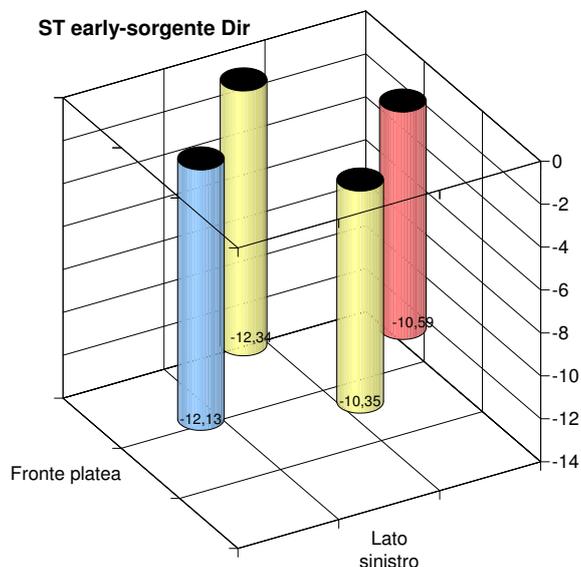


Figura 7.13:  $ST_{early}$  media nei quattro punti di misura, sorgente Dir

valori molto simili.

- Il grafico relativo al punto di misura 03 (Figura 7.3) evidenzia un nuovo andamento del parametro: i valori registrati sono più bassi di fronte alla sorgente e aumentano spostandosi in tutti gli altri punti che presentano valori molto simili.
- Il grafico relativo al punto di misura 04 (Figura 7.4) evidenzia quattro valori del parametro molto simili, solo il punto di fronte alla sorgente è quantitativamente leggermente inferiore.
- Il grafico relativo al punto di misura 05 (Figura 7.5) ha comportamento completamente differente dai precedenti: presenta valori simili davanti e dietro la sorgente, valori decisamente più bassi, ma comunque simili fra loro, ai lati.
- Il grafico relativo al punto di misura 06 (Figura 7.6) ha comportamento simile al punto 01, crescente passando da davanti a dietro la sorgente.
- Il grafico relativo al punto di misura 07 (Figura 7.7) presenta valori simili in tutti i punti, solo quello posteriore è leggermente inferiore.
- Il grafico relativo al punto di misura 08 (Figura 7.8) presenta valore più basso davanti e simili, leggermente più alti, in tutti gli altri punti.
- Il grafico relativo al punto di misura 09 (Figura 7.9) presenta valore più alto dietro e simili, leggermente più bassi, in tutti gli altri punti.
- Il grafico relativo al punto di misura 10 (Figura 7.10) presenta valori diversi in tutti i punti: più basso davanti, poi in crescendo dietro, a sinistra e a destra.
- Il grafico relativo al punto di misura 11 (Figura 7.11) presenta valori simili davanti e dietro e decisamente più bassi, ma comunque simili, ai lati.
- Il grafico relativo al punto di misura 12 (Figura 7.12) presenta valori simili davanti e dietro, decisamente più alto a destra e ancor più alto a sinistra.

- Il grafico relativo al punto di misura Dir (Figura 7.13) presenta valori simili davanti e a destra, decisamente più alti dietro e a sinistra.

### **Considerazioni sui dati analizzati**

A questo punto è interessante cercare di capire se il parametro presenta comportamenti regolari e in qualche modo prevedibili, per cercare di percepirne in modo ottimale le eventuali dinamiche. Il palcoscenico è simmetrico rispetto alla linea che divide longitudinalmente la sala, le sorgenti sono state disposte simmetricamente alla stessa linea. E' lecito aspettarsi che anche il comportamento del parametro sia simmetrico. In effetti, qualitativamente parlando, questo accade ovunque tranne nella coppia di punti 05-09. A livello quantitativo invece il parametro non presenta rigorosa simmetria con differenze di valore anche superiori a 1,5 dB. In particolare per i punti di misura ai lati delle sorgenti il comportamento è il seguente: generalmente simili, tranne nei punti sorgente 01-04 dove le misure vicine alle pareti laterali risultano più basse; nei punti 10-12 invece sono inferiori i valori verso la parte centrale del palco. Per quanto riguarda i punti davanti e dietro la sorgente, essi danno risultati generalmente uguali nella zona retrostante del palco, nella parte frontale al contrario il valore davanti è decisamente più basso di quello dietro, evidenziando una chiara influenza della parete di fondo costituita, nel nostro caso, dall'organo.

### **7.1.2 Andamento delle medie del parametro fra i punti di misura nei punti sorgente**

Per poter più agevolmente trattare i dati nella valutazione della qualità del parametro secondo i range proposti da Gade, si è effettuata la media fra i quattro punti di misura in ogni postazione della sorgente (Figura 7.15). Si riporta inoltre anche l'andamento in frequenza di tali medie (Figura 7.14)

### **Considerazioni**

Nell'andamento in frequenza delle medie nei punti sorgente si può notare l'alto valore assunto dal parametro alle frequenze molto basse e il basso valore a quelle molto alte. Nelle bande da 160 a 4000 Hz l'andamento è circa costante compreso in linea di massima fra -10 e -14 dB. Eccezioni molto rilevanti si hanno nelle bande centrate su 250 e 2500 Hz ove i valori schizzano molto in alto, probabilmente a causa della riflessione sul pavimento del palcoscenico. Per quanto riguarda invece le medie fra le frequenze, calcolate come indicato da Gade, possiamo notare che effettivamente il parametro risulta simmetrico rispetto all'asse longitudinale della sala non solo sul piano qualitativo ma anche sotto l'aspetto quantitativo, con medie differenti solo di qualche decimo di dB. Pensando invece il parametro per file parallele al fronte del palco, possiamo no-

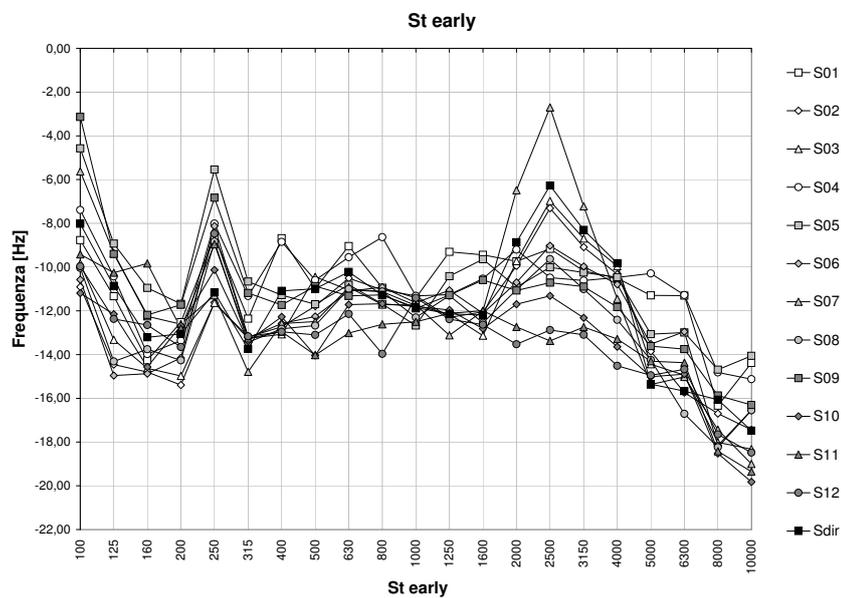


Figura 7.14:  $ST_{early}$  andamento in frequenza della media fra i quattro punti di misura di ogni sorgente

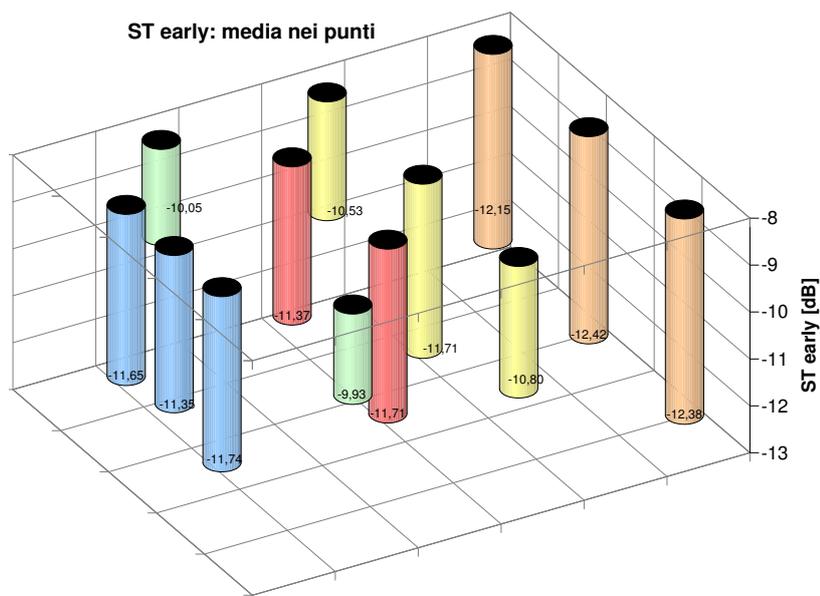


Figura 7.15:  $ST_{early}$  media fra i quattro punti di misura di ogni sorgente

tare che i valori ottenuti sono abbastanza costanti, eccezion fatta per le sorgenti più vicine alla parete retrostante che presentano valori più bassi. Anche i punti 01 e 04 (in verde nel grafico) e 05, 09 (in giallo) assumono valori diversi dall'andamento generale, in particolare più alti. Poichè tali punti sono i più vicini alle pareti laterali si può ipotizzare che tale andamento sia dovuto all'interazione dell'onda sonora con tali superfici.

### 7.1.3 Confronto con i valori di letteratura

Gade indica come ottimale per questo parametro l'intervallo  $-13 < ST_{early} < -11dB$ . Si può notare come i valori in sala rientrino tutti in questo range, ad eccezione di quelli ricavati dai punti sorgente, indicati già nel paragrafo precedente, posti in prossimità delle pareti laterali, la cui vicinanza si può quindi considerare negativa.

## 7.2 Support, $ST_{late}$

$ST_{late}$  misura l'energia più ritardata importante per un solista o nei piccoli gruppi da camera. E' utilizzato soprattutto per valutare l'impressione di riverberazione del musicista sul palcoscenico. Risulta inoltre buona la sua correlazione con la possibilità di eseguire facilmente dinamiche da parte degli esecutori.

### 7.2.1 Andamento del parametro nei punti sorgente

In tutti i successivi grafici i quattro solidi rappresentano i valori del parametro misurati nei quattro punti posti davanti, dietro e ai lati della sorgente omni-direzionale. Tale sorgente è perciò da immaginare situata in centro al piano orizzontale del grafico.

- Il grafico relativo al punto di misura 01 (Figura 7.16) mostra che i quattro punti di misura hanno valori uniforme fatta eccezione per il punto a sinistra della sorgente che presenta un valore più basso soprattutto in relazione al valore sul lato destro.
- Il grafico relativo al punto di misura 02 (Figura 7.17) evidenzia un andamento del parametro diverso dal precedente: i valori registrati sono più bassi di fronte alla sorgente e aumentano spostandosi prima nei punti laterali e poi in quello posteriore, i laterali hanno valori molto simili.
- Il grafico relativo al punto di misura 03 (Figura 7.18) mostra che i quattro punti di misura hanno valori uniforme fatta eccezione per il punto dietro la sorgente che presenta un valore più alto.
- Il grafico relativo al punto di misura 04 (Figura 7.19) riporta che i valori rilevati nei punti a lato della sorgente sono simili, lo stesso vale per il punto davanti e quello dietro la sorgente che però hanno valori più alti dei laterali.
- Il grafico relativo al punto di misura 05 (Figura 7.20) ha comportamento completamente differente dai precedenti: presenta valori tutti diversi, decrescenti nel seguente

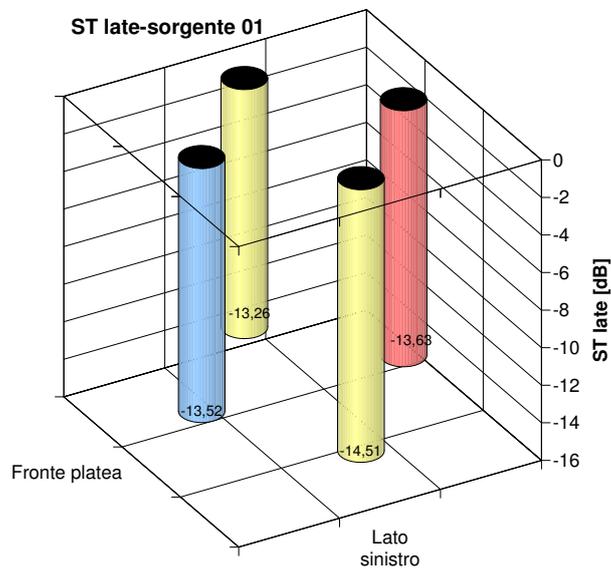


Figura 7.16:  $ST_{late}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 01

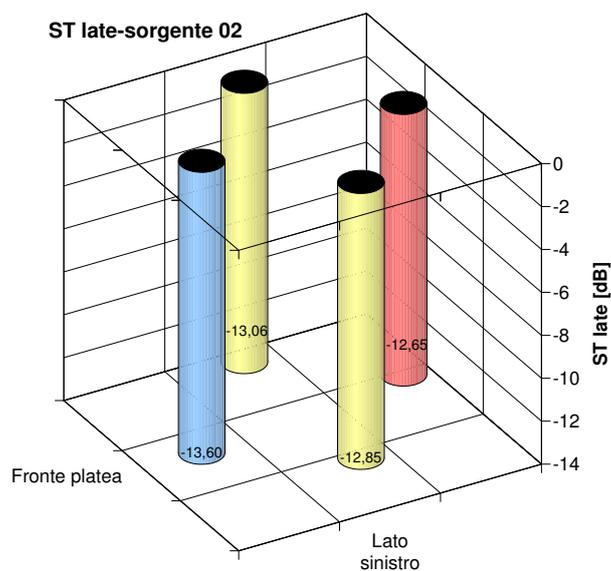
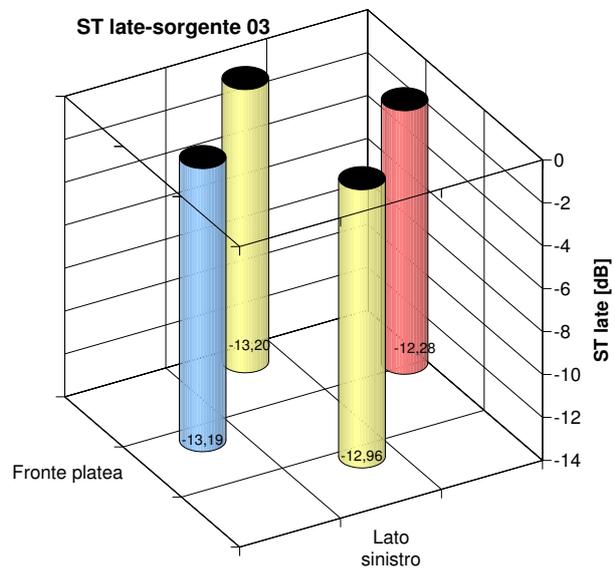
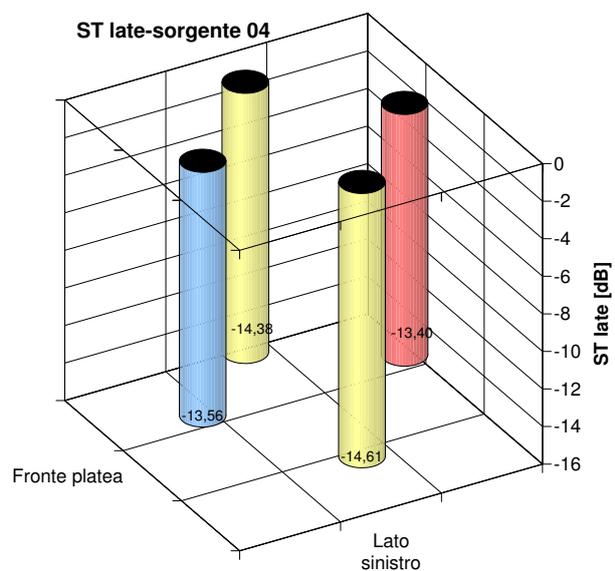


Figura 7.17:  $ST_{late}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 02

Figura 7.18:  $ST_{late}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 03Figura 7.19:  $ST_{late}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 04

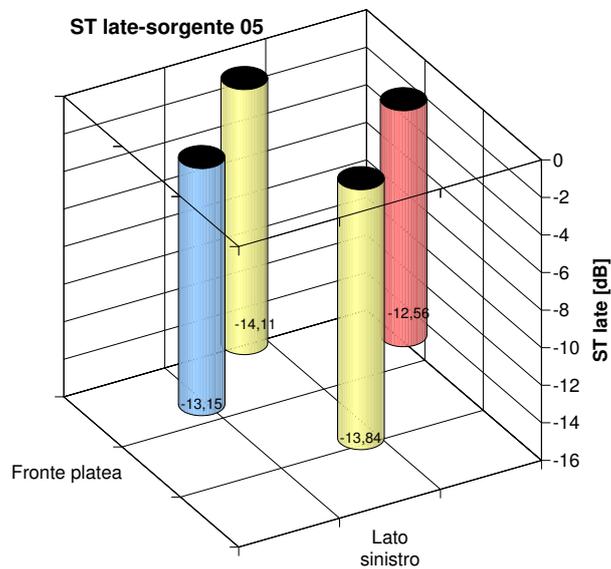


Figura 7.20:  $ST_{late}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 05

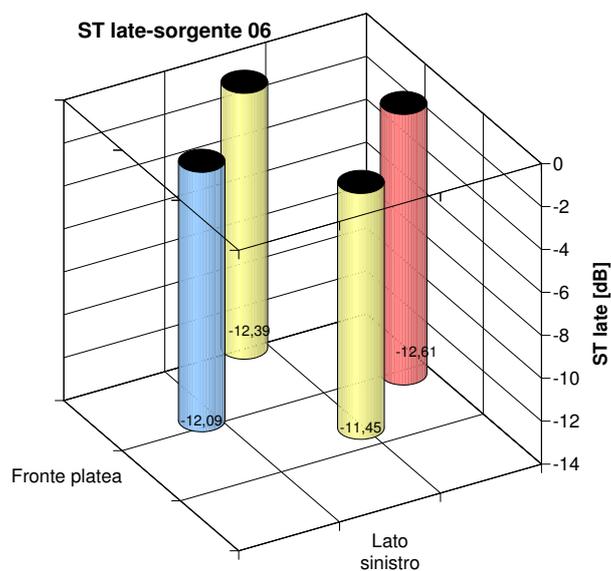
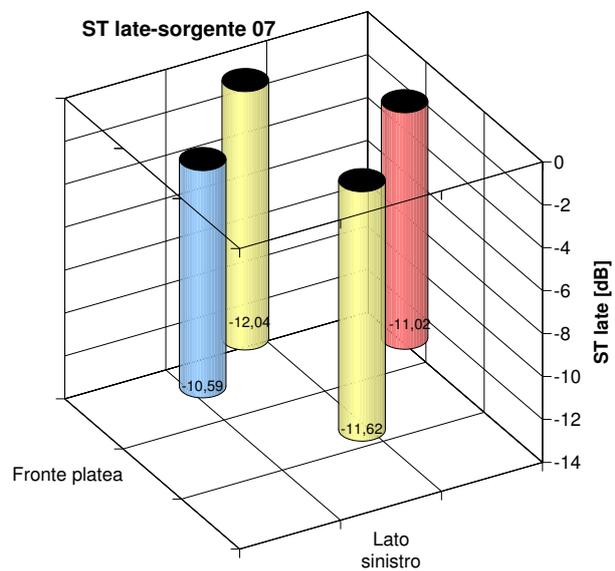
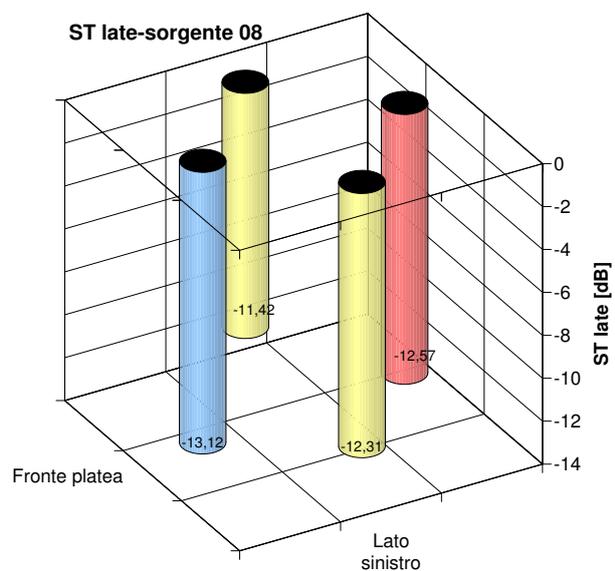


Figura 7.21:  $ST_{late}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 06

Figura 7.22:  $ST_{late}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 07Figura 7.23:  $ST_{late}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 08

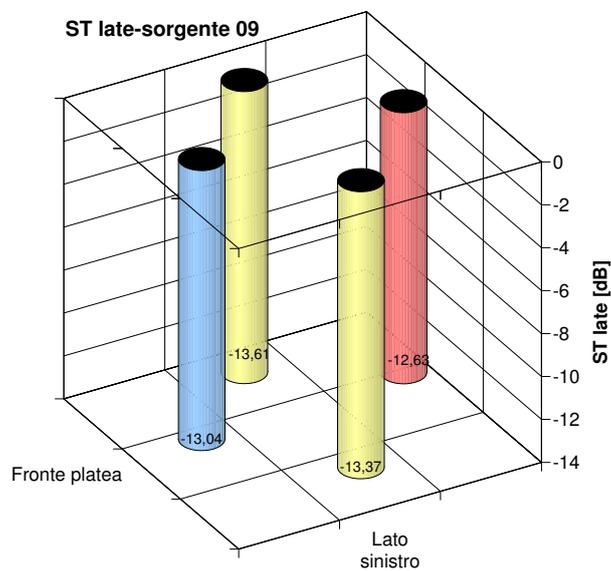


Figura 7.24:  $ST_{late}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 09

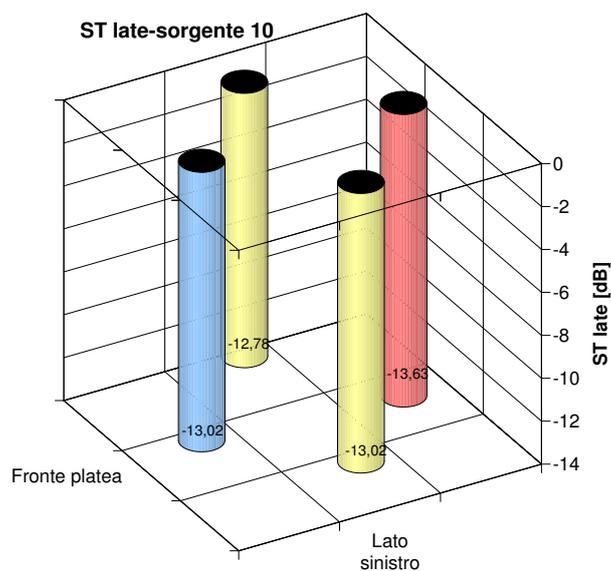
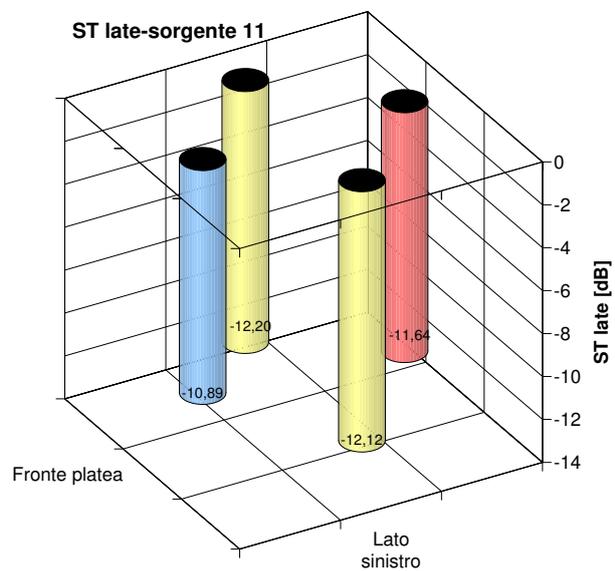
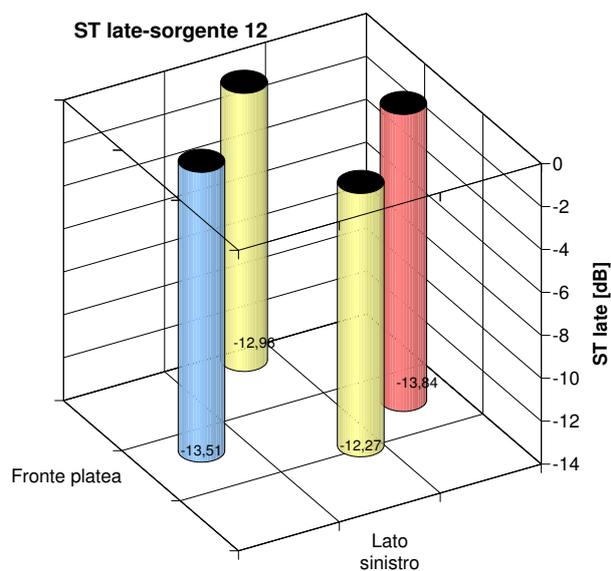


Figura 7.25:  $ST_{late}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 10

Figura 7.26:  $ST_{late}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 11Figura 7.27:  $ST_{late}$  media nei quattro punti di misura, sorgente 12

ordine: posteriore, anteriore, sinistro, destro.

- Il grafico relativo al punto di misura 06 (Figura 7.21) mostra che i quattro punti di misura hanno valori uniforme fatta eccezione per il punto a sinistra della sorgente che presenta un valore più basso.
- Il grafico relativo al punto di misura 07 (Figura 7.22) presenta valori diversi in ogni punto, decrescenti nel seguente ordine: davanti, dietro, sinistra, destra.
- Il grafico relativo al punto di misura 08 (Figura 7.23) presenta valori diversi in ogni punto, questa volta crescenti nel seguente ordine: davanti, dietro, sinistra, destra.
- Il grafico relativo al punto di misura 09 (Figura 7.24) presenta valori simili in tutti i punti, leggermente più alto dietro e più basso a destra.
- Il grafico relativo al punto di misura 10 (Figura 7.25) presenta valori abbastanza uniformi in tutti i lati.
- Il grafico relativo al punto di misura 11 (Figura 7.26) presenta valori simili ai lati e decisamente bassi, più alto dietro e ancor più alto davanti alla sorgente.
- Il grafico relativo al punto di misura 12 (Figura 7.27) presenta valori simili davanti e dietro, ancora simili ma decisamente più alti a destra e a sinistra.
- Il grafico relativo al punto di misura Dir (Figura 7.28) presenta valori simili molto alti davanti e dietro, decisamente più bassi a sinistra e a destra.

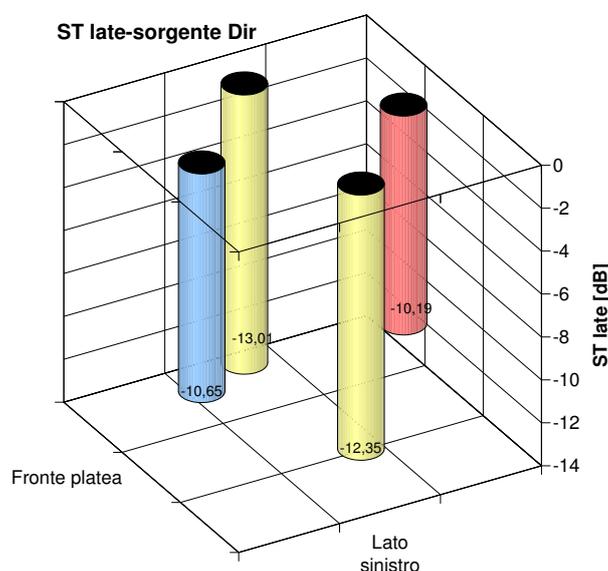


Figura 7.28:  $ST_{late}$  media nei quattro punti di misura, sorgente Dir

### Considerazioni sui dati analizzati

A questo punto è interessante cercare di capire se il parametro presenta comportamenti regolari e in qualche modo prevedibili, per cercare di percepirne in modo ottimale le

eventuali dinamiche. Cerchiamo anche in questo caso eventuali relazioni dovute alla simmetria del palcoscenico come è stato fatto per il parametro trattato in precedenza. L'andamento propone valori con caratteristiche di simmetria sia qualitativamente che quantitativamente. Tali andamenti non sono però rigorosi, anzi in alcuni casi i numeri sembrano contraddire ciò che è appena stato affermato. E' il caso per esempio dei valori laterali relativi alla coppia di punti sorgente 01-04, molto diversi nel primo punto e quasi uguali nel secondo; della coppia 06-08 con i valori dei punti davanti e dietro che si invertono chiaramente il ruolo di massimo e minimo. La simmetria è abbastanza evidente in tutti gli altri casi. I punti di misura ai lati delle sorgenti sono quelli che meno rispettano tale caratteristica; fanno eccezione le coppie 10-12 e 06-06 che sono rigorosamente simmetriche ma con valori invertiti, ovvero la prima coppia presenta valori più alti verso le pareti laterali, la seconda verso il centro palco. La simmetria risulta molto più rigorosa per quanto riguarda i punti davanti e dietro la sorgente, unica eccezione la coppia 06-08 già nominata. La distribuzione dell'andamento del massimo fra le coppie davanti-dietro è a fasce parallele al fronte del palco: verso la platea il valore anteriore è più basso, subito dietro i due punti hanno risultati uguali; spostandosi ancora verso il fondo del palco troviamo una fascia con valore più alto dietro la sorgente e infine una con valore più alto davanti alla sorgente. Si può ipotizzare anche in questo caso influenze dirette sui risultati della vicinanza di superfici riflettenti o parzialmente tali come l'organo e le superfici laterali, sicuramente è determinante anche il ruolo del soffitto.

### **7.2.2 Andamento delle medie del parametro fra i punti di misura nei punti sorgente**

Per poter più agevolmente trattare i dati nella valutazione della qualità del parametro secondo i range proposti da Gade, si è effettuata la media fra i quattro punti di misura in ogni postazione della sorgente (Figura 7.30). Si riporta inoltre anche l'andamento in frequenza di tali medie (Figura 7.29).

#### **Considerazioni**

Nell'andamento in frequenza delle medie nei punti sorgente si può notare l'alto valore assunto dal parametro alle frequenze molto basse e il basso valore a quelle molto alte. Nelle bande da 160 a 1600 Hz l'andamento è circa costante compreso in linea di massima fra -10 e -16 dB. Eccezioni molto rilevanti si hanno nelle bande centrate su 250 e 2500 Hz ove i valori schizzano in alto. Per quanto riguarda invece le medie fra le frequenze, calcolate come indicato da Gade, possiamo notare che effettivamente il parametro risulta simmetrico rispetto all'asse longitudinale della sala non solo sul piano qualitativo ma anche sotto l'aspetto quantitativo, con medie differenti solo di qualche decimo di dB. Proprio in relazione a tale comportamento si deve notare che i punti sorgente più vicini alle pareti laterali presentano valori notevolmente più bassi (anche 2 dB) rispetto ai punti più prossimi all'asse di simmetria, non si riconoscono invece

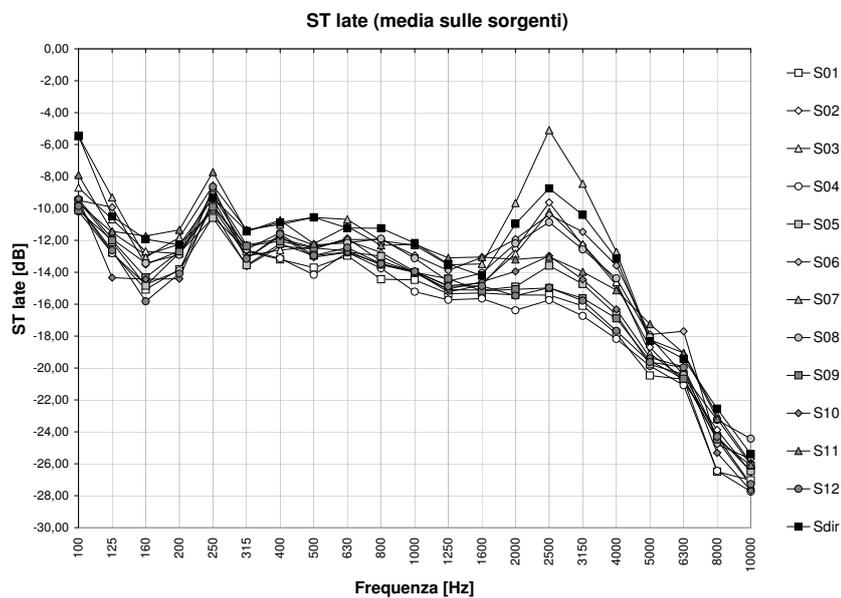


Figura 7.29:  $ST_{late}$  andamento in frequenza della media fra i quattro punti di misura di ogni sorgente

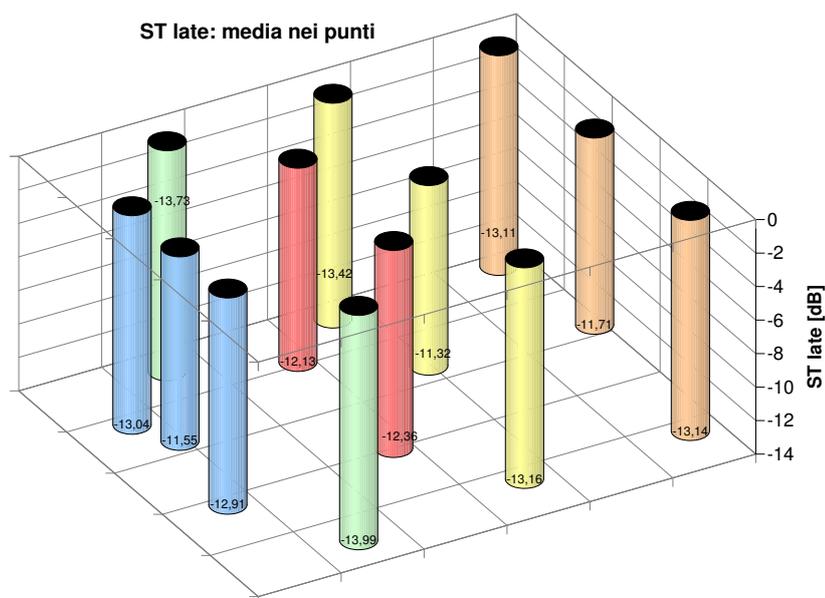


Figura 7.30:  $ST_{late}$  media fra i quattro punti di misura di ogni sorgente

particolari variazioni dovute alla vicinanza alla parete di fondo. E' evidente quindi la forte influenza sul parametro della distanza dalle superfici che circondano lateralmente l'area del palcoscenico. Risulta difficile evidenziare eventuali influenze dovute al soffitto.

### 7.2.3 Confronto con i valori di letteratura

Gade indica come ottimale per questo parametro lo stesso intervallo di un altro parametro: il CS indicando come range ottimale  $12 < CS < 13dB$  e come range accettabile  $11,5 < CS < 16,7dB$ . La formulazione numerica dei due descrittori li porta ad avere segno opposto, ne deduciamo che i range validi per il parametro in esame sino gli stessi di CS cambiati di segno, dunque: ottimale se  $-13 < ST_{late} < -12dB$ , accettabile se  $-16,7 < ST_{late} < -11,5dB$ . Si può notare come i valori in sala rientrano tutti in quest'ultimo range, ad eccezione del punto sorgente 07. Possiamo altresì notare che i punti posti alla stessa distanza dalle pareti laterali e dall'asse di simmetria, rientrano tutti nell'intervallo ottimale; mentre quelli posti sull'asse (come il punto 07) sono quelli che presentano valori

## 7.3 Tempo di riverberazione, $T_{30}$

Il  $T_{30}$  è un parametro calcolato estrapolando a -60 dB la pendenza media dei 30 dB del decadimento del livello di pressione sonora compresi fra -5 dB e -35 dB. Secondo gli studi di Gade esso è molto importante in quanto legato praticamente a tutte le esigenze soggettive dei musicisti: impressione generale della sala, supporto, riverberazione, dinamica, possibilità di sentire il proprio strumento e di sentire gli altri in modo equilibrato.

### 7.3.1 Andamento in frequenza

Di seguito si riportano i grafici dell'andamento in frequenza del tempo di riverberazione raggruppati per sorgente o per punto di misura.

#### Considerazioni

Si può notare come, pur variando la disposizione della sorgente e del ricevitore sul palcoscenico, l'andamento in frequenza del tempo di riverberazione non cambi molto. In particolare mantenendo nella medesima posizione la sorgente e spostando il microfono si ottengono andamenti qualitativamente identici, con solo piccole variazioni numeriche. Mantenendo invece fermo il ricevitore e spostando la sorgente l'andamento non risulta così simile.

### 7.3.2 Confronto con i valori di letteratura

I valori di letteratura forniti da Gade sono basati su una media fra le banda di frequenza comprese fra i 500 e i 1000 Hz. Egli ritiene ottimale per la musica sinfonica un valore pari a  $T_{30} = 2$  s. Dalla tabella ??Figura 7.36), ove sono riportati tutti i valori medi registrati classificati per posizione di sorgente e ricevitore, risulta che sul palcoscenico il tempo di riverberazione è molto più basso di quello ottimale e quindi insufficiente per le esigenze degli esecutori.

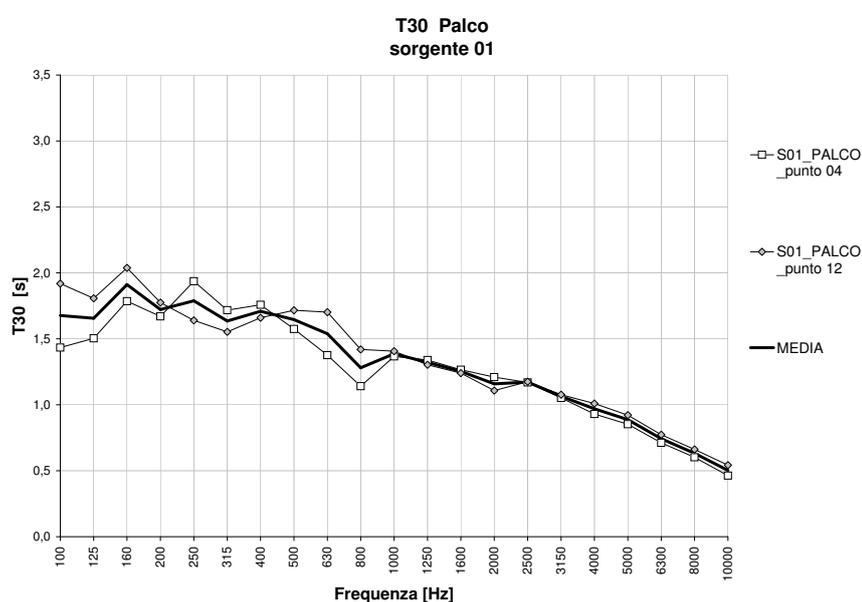


Figura 7.31:  $T_{30}$  andamento in frequenza con sorgente in posizione 01

## 7.4 Early Decay Time, EDT

L'EDT è un parametro calcolato estrapolando a -60 dB la pendenza media dei primi 10 dB del decadimento del livello di pressione sonora di un suono interrotto bruscamente o di un segnale impulsivo. E' un parametro particolarmente sensibile alla localizzazione del microfono in relazione alla sua distanza dalla sorgente. Diminuisce infatti con l'allontanarsi del microfono dalla sorgente e diventa un parametro particolarmente significativo per confrontare diversi punti di una stessa sala. E' correlato alla riverberazione, al supporto della sala e alla colorazione timbrica. Questo parametro è, secondo Gade, più adatto alla musica da camera che non alla sinfonica.

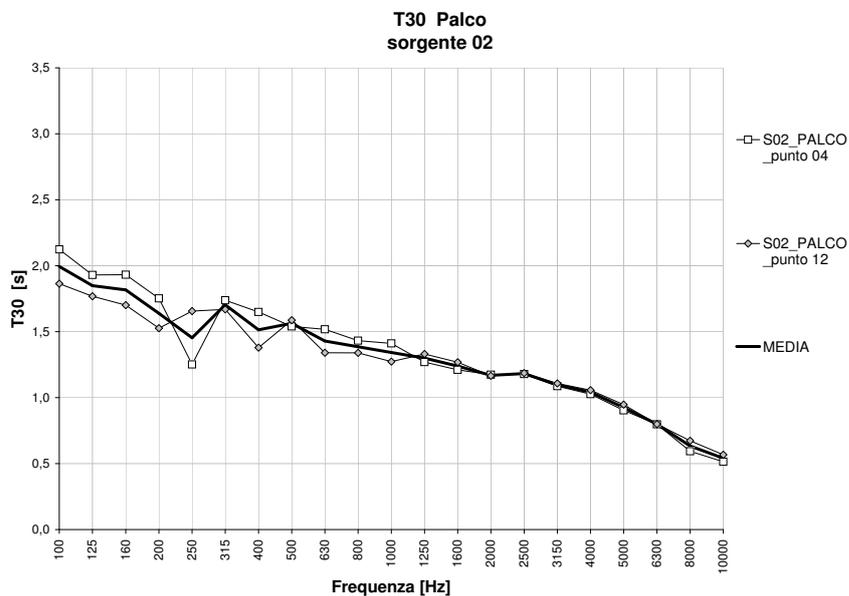


Figura 7.32:  $T_{30}$  andamento in frequenza con sorgente in posizione 02

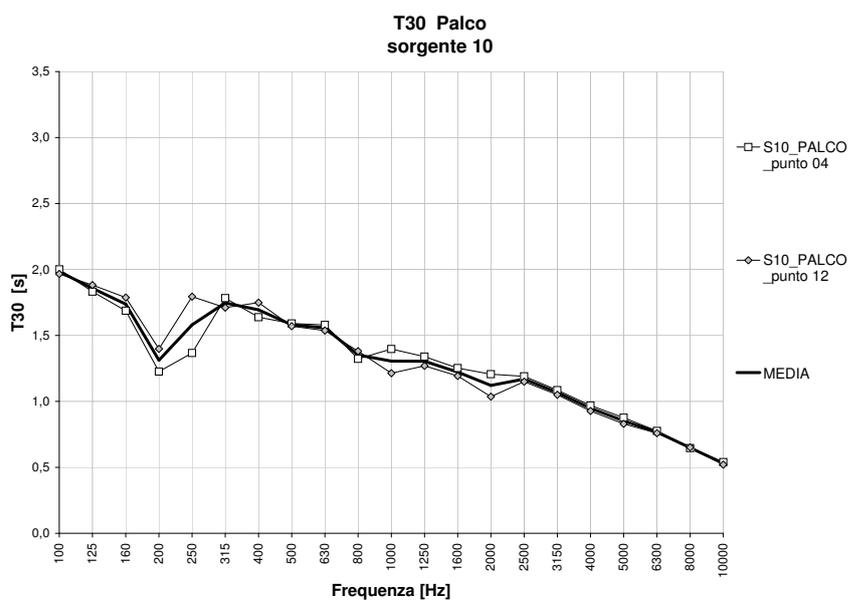
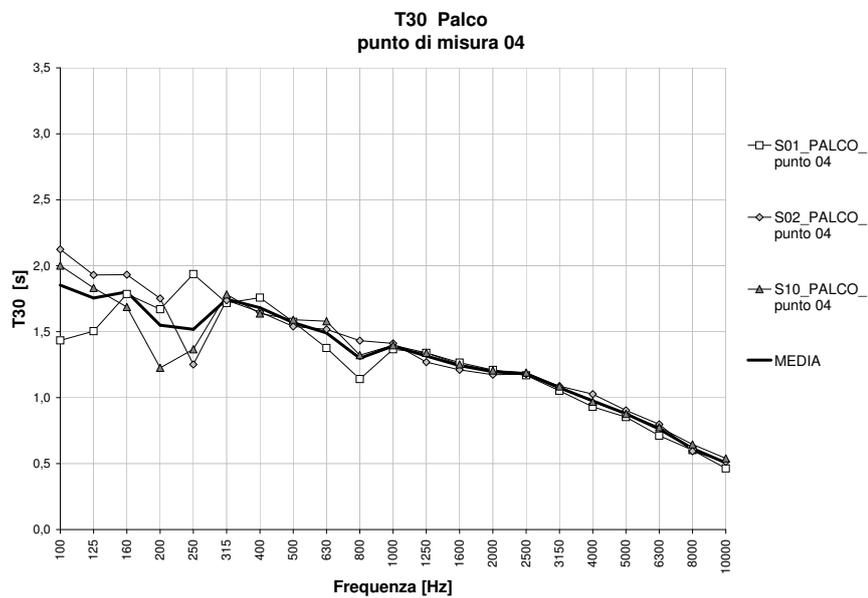
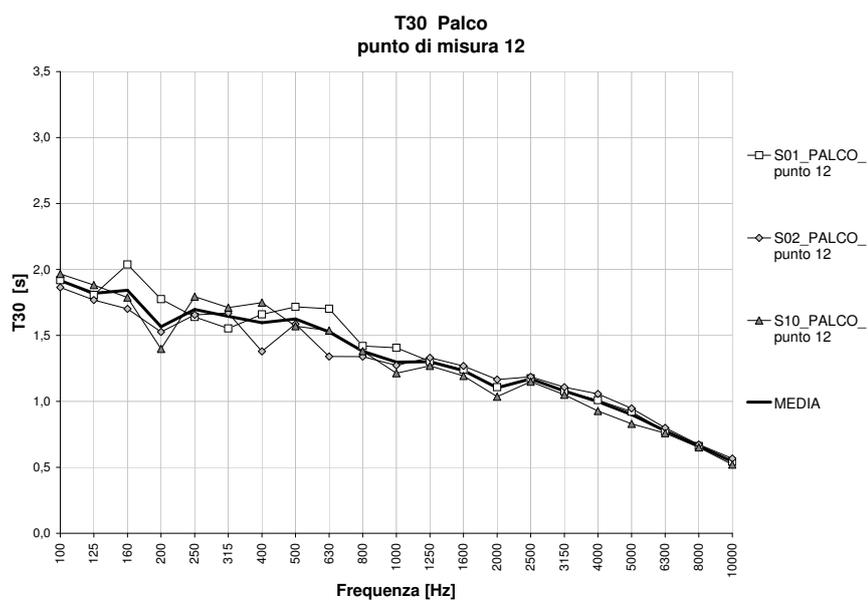


Figura 7.33:  $T_{30}$  andamento in frequenza con sorgente in posizione 10

Figura 7.34:  $T_{30}$  andamento in frequenza con ricevitore in posizione 04Figura 7.35:  $T_{30}$  andamento in frequenza con ricevitore in posizione 12

| PUNTO SORGENTE | PUNTO RICEVITORE | TEMPO DI RIVERBERAZIONE [s] |
|----------------|------------------|-----------------------------|
| 01             | 04               | 1,36                        |
| 02             | 04               | 1,48                        |
| 10             | 04               | 1,47                        |
| 01             | 12               | 1,56                        |
| 02             | 12               | 1,38                        |
| 10             | 12               | 1,43                        |
| MEDIA TOTALE   |                  | 1,45                        |

Figura 7.36:  $T_{30}$  media fra le frequenze sul palcoscenico

### 7.4.1 Andamento in frequenza

Di seguito si riportano i grafici dell'andamento in frequenza dell'EDT raggruppati per sorgente o per punto di misura.

#### Considerazioni

Si può notare come, pur variando la disposizione della sorgente e del ricevitore sul palcoscenico, l'andamento in frequenza dell'EDT non cambi molto. In particolare mantenendo nella medesima posizione la sorgente e spostando il microfono si ottengono andamenti qualitativamente identici, con solo piccole variazioni numeriche. Mantenendo invece fermo il ricevitore e spostando la sorgente l'andamento non risulta così simile. Fa eccezione a queste considerazioni il grafico (Figura 7.38) che riporta l'andamento dell'EDT ottenuto mantenendo ferma la sorgente nel punto 02, i due punti dove si è misurato il segnale hanno dato risultati molto discordanti (circa 0,5 s) in termini soprattutto quantitativi e ad dirittura andamenti crescenti-decrescenti opposti molto evidenti in alcune bande di frequenza (100, 500 Hz).

### 7.4.2 Confronto con i valori di letteratura

I valori di letteratura forniti da Gade sono basati su una media fra le bande di frequenza comprese fra i 500 e i 1000 Hz. Egli ritiene ottimale per la musica da camera un valore pari a  $EDT = 1,5$  s. Dalla tabella 7.42, ove sono riportati tutti i valori medi registrati

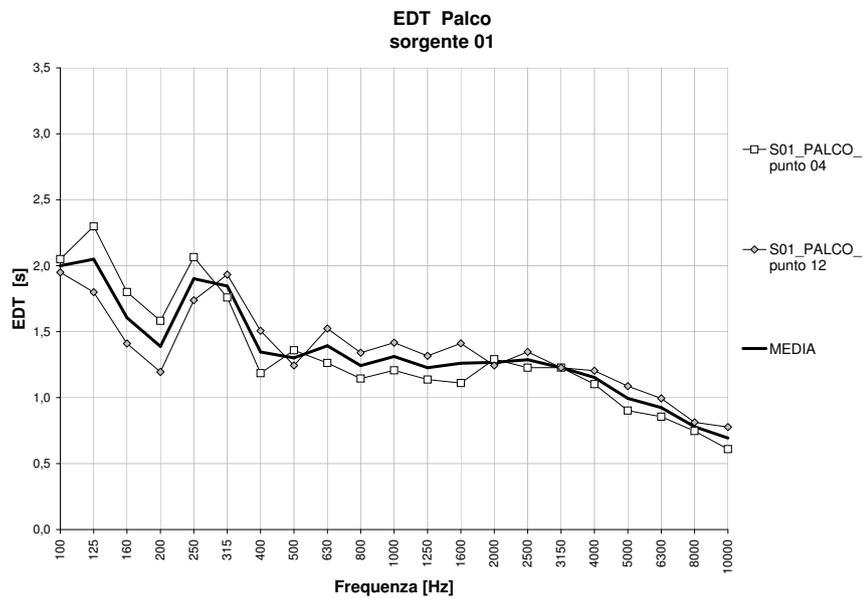


Figura 7.37: EDT andamento in frequenza con sorgente in posizione 01

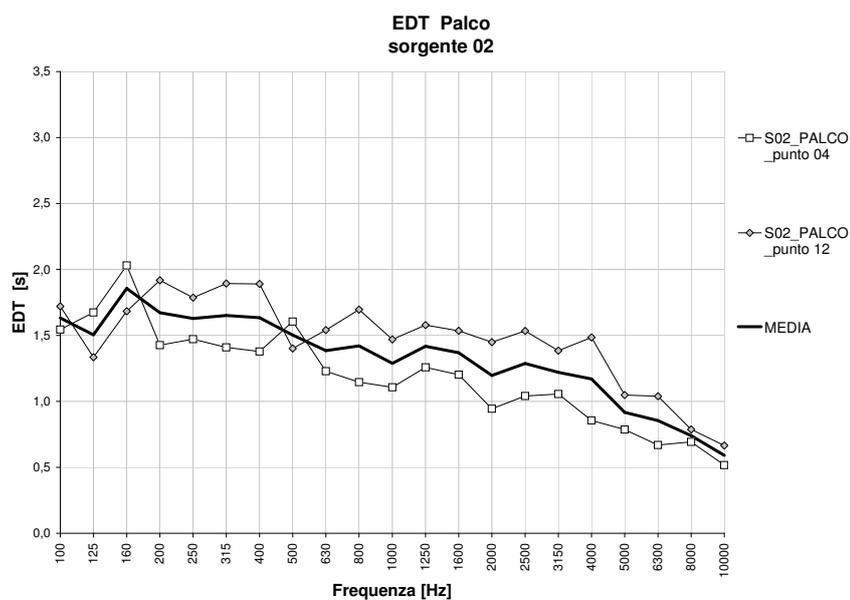


Figura 7.38: EDT andamento in frequenza con sorgente in posizione 02

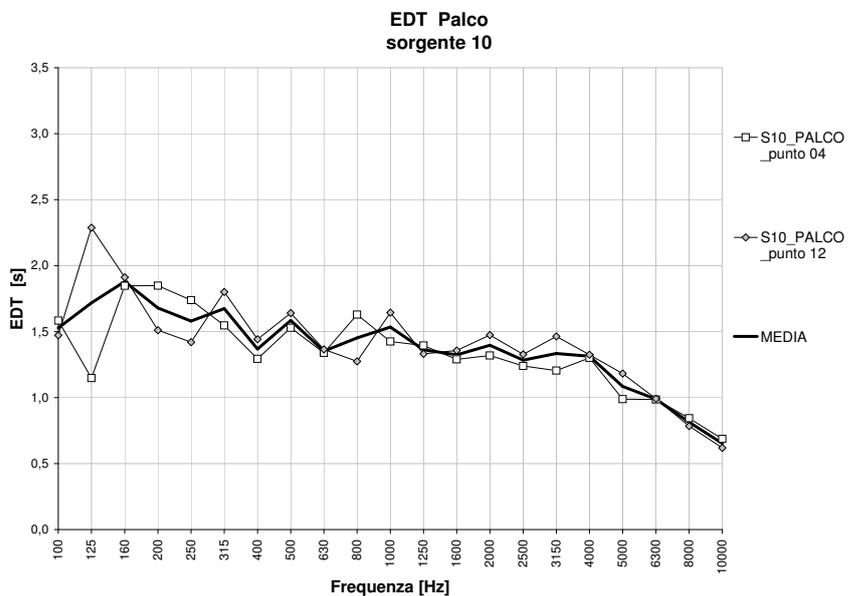


Figura 7.39: EDT andamento in frequenza con sorgente in posizione 10

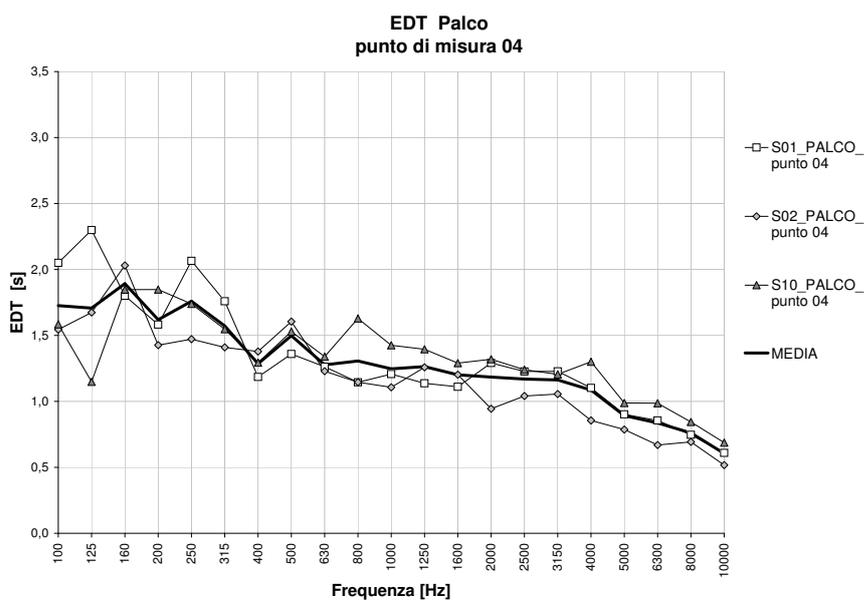


Figura 7.40: EDT andamento in frequenza con ricevitore in posizione 04

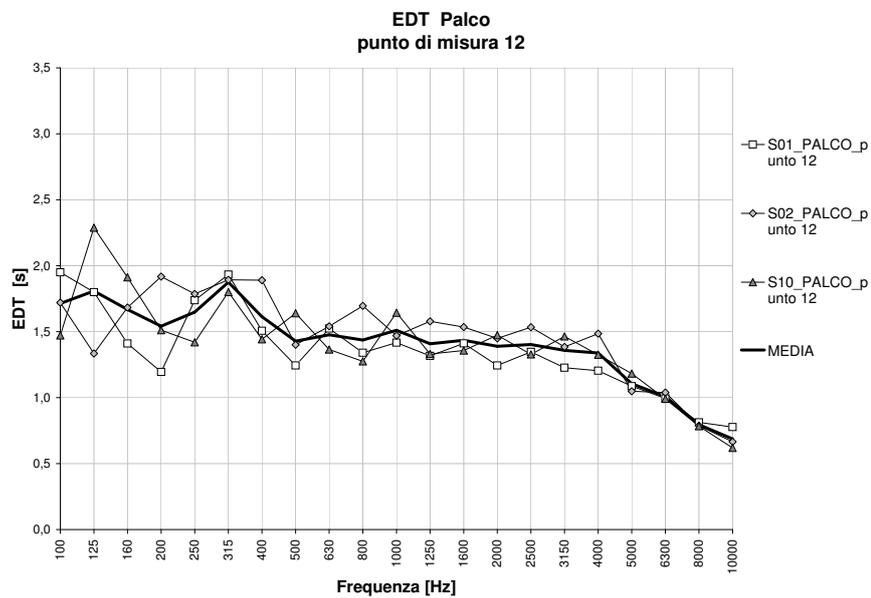


Figura 7.41: EDT andamento in frequenza con ricevitore in posizione 12

| PUNTO SORGENTE | PUNTO RICEVITORE | EDT [s] |
|----------------|------------------|---------|
| 01             | 04               | 1,24    |
| 02             | 04               | 1,27    |
| 10             | 04               | 1,48    |
| 01             | 12               | 1,38    |
| 02             | 12               | 1,53    |
| 10             | 12               | 1,48    |
| MEDIA TOTALE   |                  | 1,40    |

Figura 7.42: EDT nei punti di misura sul palcoscenico

classificati per posizione di sorgente e ricevitore, risulta che sul palcoscenico l'EDT è in media un po' più basso di quello ottimale ma comunque sufficiente. In particolare se il ricevitore è verso il fondo del palcoscenico (punto ricevitore 12) i valori risultano quasi sempre accettabili, se il ricevitore è verso la platea il risultato non è sempre accettabile. Si può vedere infatti che un musicista posto in posizione 04 non sentirebbe in modo ottimale le sorgenti 01 e 02 che solitamente corrispondono al solista, al primo violino e alla sezione dei primi violini.

## 7.5 EDTF

Corrisponde ad una variazione in frequenza dell'EDT. Il parametro è correlato alla colorazione del timbro, ovvero come la sala lo modifica e alla facilità di sentirsi fra musicisti.

| PUNTO SORGENTE | PUNTO RICEVITORE | EDTF |
|----------------|------------------|------|
| 01             | 04               | 1,37 |
| 02             | 04               | 1,50 |
| 10             | 04               | 1,19 |
| 01             | 12               | 1,12 |
| 02             | 12               | 1,09 |
| 10             | 12               | 0,98 |
| MEDIA TOTALE   |                  | 1,21 |

Figura 7.43: EDTF nei punti di misura sul palcoscenico

### 7.5.1 Confronto con i valori di letteratura

I valori di letteratura forniti da Gade sono basati sulle analisi relative alle sale oggetto delle sue ricerche. Egli ritiene ottimale per la musica sinfonica un valore pari a EDTF = 1,0. Dalla tabella 7.43, ove sono riportati tutti i valori medi registrati classificati per posizione di sorgente e ricevitore, risulta che sul palcoscenico l'EDTF è in alcuni casi abbastanza vicino al valore ottimale, in altri è invece piuttosto lontano, ciò lascia presumere un comportamento non uniforme del palcoscenico con fenomeni di coloritura

timbrica in alcuni punti. Ne risulta una media non del tutto soddisfacente. Da notare che i punti più penalizzati sono i medesimi già evidenziati come negativi per l'EDT.

## 7.6 Considerazioni sui risultati

I risultati fin qui ottenuti mettono in evidenza delle notevoli contraddizioni: molte delle caratteristiche soggettive considerate desiderabili dai musicisti sul palcoscenico sono strettamente correlate a più parametri oggettivi che abbiamo trattato in questo capitolo, parametri che però hanno evidenziato comportamenti molto diversi. In particolare, come dimostrato ampiamente dal lavoro di Gade, la percezione di tutte le caratteristiche soggettive è dipendente dal tempo di riverberazione che sul palco è troppo corto; alcune sono strettamente legate ad altri parametri per esempio l' $ST_{early}$  o l' $ST_{late}$ , che invece si comportano in maniera piuttosto buona. Evidentemente uno dei due parametri con risultato opposto dà una risposta errata. Il perchè potrebbe risiedere nella scarsa pratica odierna di questi nuovi parametri e nella scarsa ricerca effettuata su di essi che li rende ancora poco affidabili, ovvero all'imprecisa definizione o dei parametri stessi o più semplicemente dei valori ottimali considerati come desiderabili.

## Capitolo 8

# ANALISI DATI ACUSTICI SOGGETTIVI SUL PALCOSCENICO

La scelta di fare un'analisi di tipo soggettivo anche sul palcoscenico è dettata dall'esigenza di conoscere direttamente l'opinione di chi utilizza tale parte della sala. L'acustica del palcoscenico gioca un ruolo notevole nella possibilità di un musicista di esprimere le potenzialità artistiche al meglio delle proprie possibilità.

### 8.1 Il test

Nonostante la diversità già nota fra le esigenze del pubblico in platea e del musicista sul palco, si è scelto di sottoporre all'attenzione degli artisti lo stesso test utilizzato in platea. Questo, pur non dando la diretta possibilità di correlare i parametri soggettivi a quelli oggettivi visti nel capitolo precedente, permette comunque di avere una generale opinione sulla qualità della percezione sonora dell'ambiente. Evita inoltre la necessità di verificare l'efficacia di un nuovo test mediante numerose e ripetute campagne di interviste al fine di rendere veramente funzionali le domande da sottoporre ai musicisti. Si è scelto di somministrare i test ai musicisti pochi minuti dopo il termine della loro esecuzione in concerto, in modo tale da avere un'opinione immediata e non filtrata da sensazioni successive o opinioni altrui sulla riuscita dell'esibizione. Anche in questo caso sul retro del test era presente una pianta del palco ed era chiesto all'intervistato di indicare la propria posizione durante l'esecuzione in modo tale da poter eventualmente collegare tale localizzazione con i punti di misura usati indicati nel capitolo precedente. Le interviste sono state effettuate per due ambiti musicali differenti: la musica sinfonica e la musica da camera. Per la prima si è sfruttata la stessa occasione già presentata per i test in platea, ovvero il concerto finale dell'orchestra del conservatorio tenutosi la sera del 22 Maggio 2007. Sono stati consegnati all'orchestra cinquanta test, ne sono stati restituiti compilati 16 di cui 3 non validi per mancanza dell'indicazione

sulla localizzazione nel palco. Per la musica da camera i test sono stati somministrati in occasione dei concerti di fine anno delle classi di musica da camera del conservatorio. Le date sono state il 6 e il 7 Giugno 2007 alle 17:00. Il repertorio e l'organico dei numerosi gruppi che si sono succeduti sul palcoscenico non si riportano per brevità. I periodi musicali interessati spaziano dal barocco alla musica dei primi decenni del novecento. Nella prima occasione sono stati consegnati 27 test, ritornati compilati 27, validi 25; nella seconda occasione consegnati 23 test, ricevuti 21 di cui 18 validi.

## 8.2 Analisi dei test

### 8.2.1 Test compilati dai componenti dell'orchestra

Per quanto riguarda i test compilati dai componenti dell'orchestra, i dati sono stati trattati in due modi: dividendo il palcoscenico in zone oppure considerandoli tutti assieme. La divisione in zone è stata effettuata secondo quanto indicato in figura 8.1 in modo tale da ricoprire con un'area una parte definita dell'orchestra. In questo modo le aree A e B sono quelle occupate dai fiati, l'area C dai violini, l'area E solitamente (ma non sempre) da viole e violoncelli e infine l'area D che comprende tutte le prime parti degli archi dell'orchestra, il direttore ed un eventuale solista. In tabella 8.2 è possibile vedere i risultati medi ottenuti in ogni area.

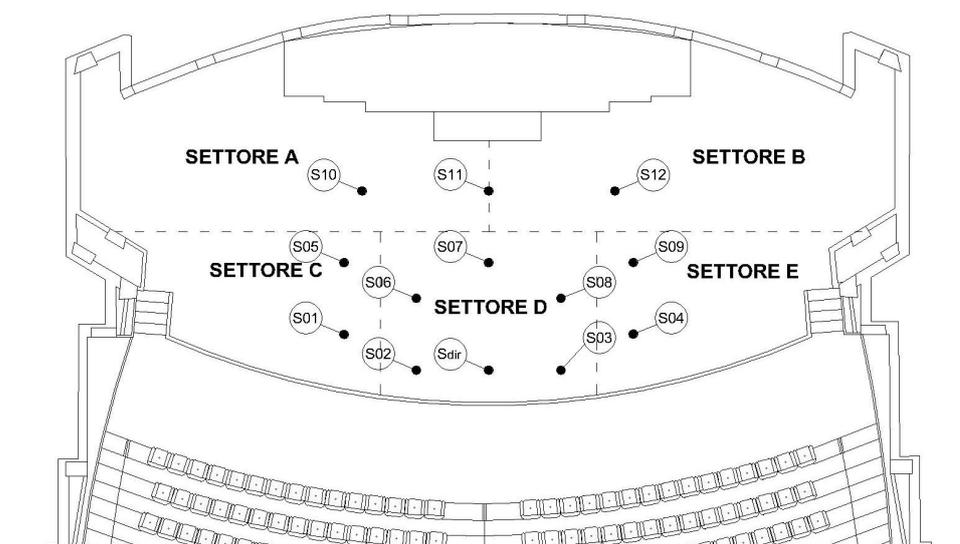


Figura 8.1: Divisione del palcoscenico in settori

E' evidente che nei vari settori le opinioni risultano spesso diverse e contrastanti. E' il caso del parametro impastato definito, tenendo conto che 3,5 è il voto che separa i due

|                                 | SETTORE A | SETTORE B | SETTORE C | SETTORE D | SETTORE E | TOTALE | DEVIAZIONE STANDARD |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|---------------------|
| PIACEVOLE-SPIACEVOLE            | 2,00      | 3,00      | 3,00      | 3,33      | -         | 2,92   | 1,44                |
| IMPASTATO-DEFINITO              | 3,00      | 4,33      | 4,20      | 4,33      | -         | 4,08   | 1,12                |
| MORBIDO-DURO                    | 4,00      | 4,67      | 3,40      | 4,00      | -         | 3,92   | 0,76                |
| AVVOLGENTE-CONCENTRATO          | 3,50      | 4,33      | 3,60      | 4,33      | -         | 3,92   | 1,19                |
| SECCO-RIMBOMBANTE               | 3,50      | 1,67      | 2,60      | 3,00      | -         | 2,62   | 1,04                |
| ACUTI ACCENTUATI-NON ACCENTUATI | 3,00      | 2,67      | 3,00      | 3,67      | -         | 3,08   | 0,64                |
| BASSI ACCENTUATI-NON ACCENTUATI | 4,00      | 4,00      | 4,20      | 3,00      | -         | 3,85   | 1,07                |
| SOMMESSO-SONORO                 | 4,00      | 3,67      | 3,40      | 4,33      | -         | 3,77   | 0,73                |

Figura 8.2: Valori medi dei parametri soggettivi nei settori del palco

opposti. Ma lo stesso vale anche per il parametro *morbido-duro*, *acuti accentuati - non accentuati*, *bassi accentuati - non accentuati*, *sommesso-sonoro*. Tale differenza può essere dovuta non solo ad effettive diversità dell'acustica nei vari punti del palco, ma all'eccessivo peso statistico che assumono i singoli test in settori con pochi questionari validi, questa circostanza è confermata dalla presenza nelle stessa area di test molto diversi fra loro. Data, inoltre, la totale mancanza di risposte nel settore E si decide di procedere nell'analisi trattando tutti i dati unitamente. I risultati sono evidenti nel grafico di figura 8.3. Nel complesso possiamo notare che i componenti dell'orchestra ritengono l'acustica sul palcoscenico piacevole, tendenzialmente dura e definita, dove il suono risulta concentrato e secco, in cui gli acuti risultano abbastanza accentuati e i bassi anche, con la riserva che molti hanno dato un voto deciso per i bassi non accentuati, infine il palco è ritenuto abbastanza sonoro. L'impressione generale è che l'acustica sia ritenuta accettabile, le note stonate sono la durezza e la secchezza del suono e per alcuni la scarsità di sonorità alle basse frequenze.

## 8.2.2 Test compilati dai cameristi

Si è deciso, data l'analogia dei due concerti di trattare i dati in un unico momento per limitare eventuali deviazioni dovute a test isolati molto diversi dalla media, inoltre

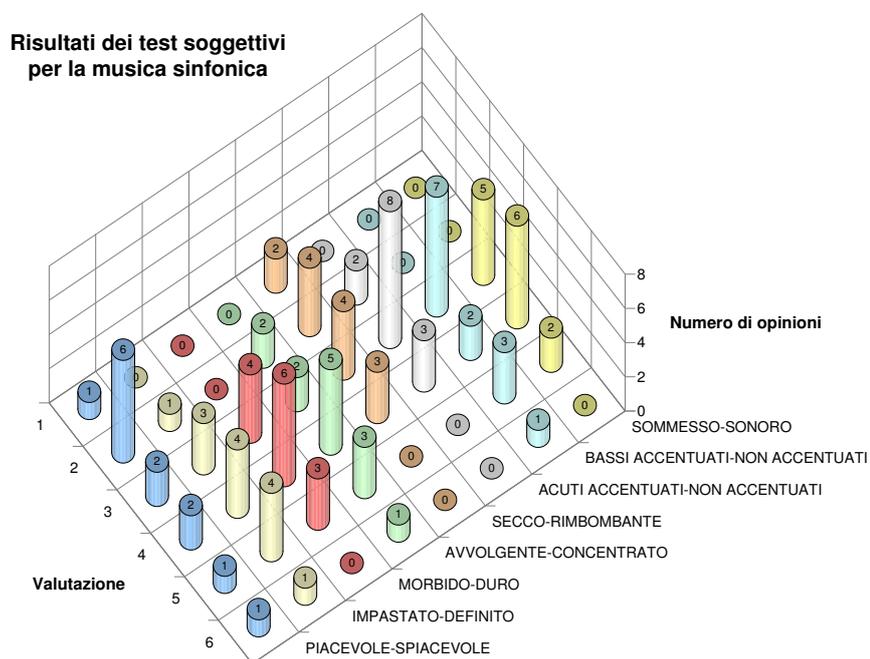


Figura 8.3: Risultati dei test soggettivi compilati dai componenti dell'orchestra

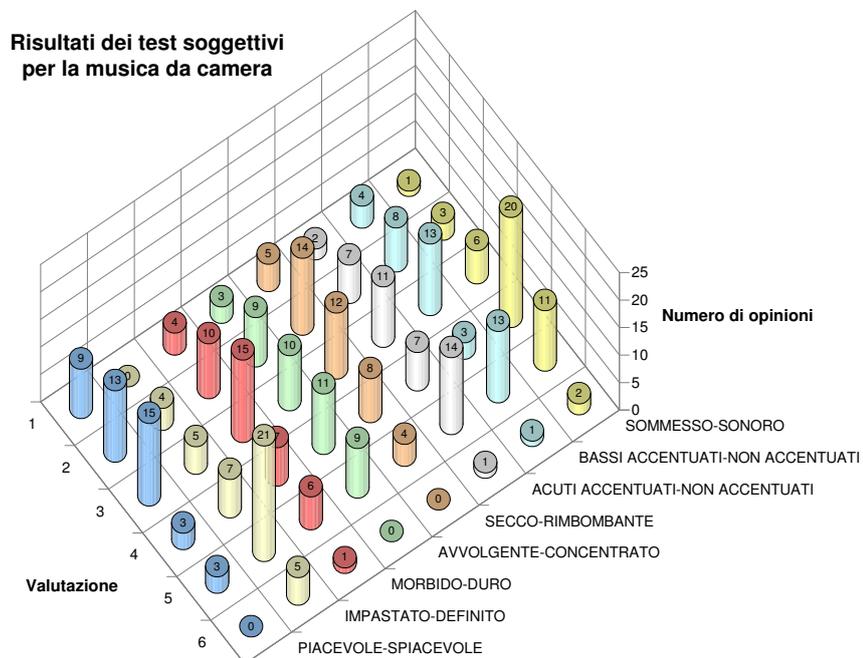


Figura 8.4: Risultati dei test soggettivi compilati dai cameristi

poichè tutti gli esecutori rientravano nell'area D della suddetta pianta, si è deciso anche per questo aspetto di trattare tutti i dati assieme. I risultati per la musica da camera sono i seguenti: l'acustica è ritenuta piacevole, molto definita e abbastanza morbida, decisamente secca ma abbastanza sonora; meno decisa è l'opinione sulla presenza di alte e basse frequenze. L'impressione generale è che l'acustica sia ritenuta accettabile, le note stonate sono la durezza e la secchezza del suono e per alcuni la scarsità di sonorità alle basse frequenze.

### 8.2.3 Commenti nei test

Si riportano di seguito i commenti inseriti nei test dagli esecutori:

- povero di armonici, non ci si sente fra le parti con problemi di omogeneità, il ritorno del suono è spesso in ritardo, difficoltà nelle dinamiche, il passaggio nel retropalco crea disagio in sala.
- quando si fa musica da camera non ci si sente fra le parti
- suono secco privo di armonici, viene proiettato alla platea per cui ci si rende conto difficilmente delle dinamiche e dell'equilibrio. Il suono non è caldo, ma povero di armonici.

## 8.3 Considerazioni

I risultati ottenuti dai test compilati dai componenti dell'orchestra e dai cameristi sono analoghi eccezion fatta per la durezza del suono ritenuta maggiore nel caso dell'orchestra. La correlazione fra i questionari soggettivi e i dati oggettivi è solo parziale e sembra mettere in accettabile vista il rapporto tra le opinioni dei musicisti e i parametri support. A questo punto però è bene notare che nei commenti ai test è stata segnalata difficoltà nel sentire le altre parti, nel proporre dinamiche e freddezza del suono; sono note precise che contrastano l'opinione generale ricavata. Soprattutto mettono in evidenza problemi che ben si accordano con il difetto riscontrato nel capitolo precedente riguardo ai tempi di riverberazione troppo corti. In effetti la coda sonora misurabile in termini temporali con il  $T_{30}$  è fondamentale per la sensazione di riverberazione e per la facilità a produrre dinamiche efficaci. Appare quindi evidente la parziale incoerenza dei test (impressione generale buona ma con grossi difetti) tanto da limitarne la credibilità. Rimane il fatto che in questo caso i problemi acustici segnalati sul palco sono stati messi in luce in termini quantitativi solo dal tempo di riverberazione (in parte dall'EDT e dall'EDTF) che si afferma ancora una volta come il parametro principe dello studio acustico di una sala da concerto. Da tutte queste considerazioni si può dedurre che per uno studio soggettivo dell'acustica sul palcoscenico più approfondito serve formulare un test specifico. Risulta inoltre evidente che per ottenere risultati più attendibili serve un numero più alto di questionari compilati che riduca il peso dei singoli test sulla media.



# Conclusioni

Oggi le condizioni per un ascolto ottimale in una sala da concerto sono abbastanza ben conosciute. Molti studi sulle correlazioni tra parametri misurati in situ e giudizi espressi dal pubblico hanno portato a risultati significativi, pur basandosi principalmente su valutazioni qualitative; sono state, inoltre, approfondite anche importanti correlazioni utili tra gruppi di parametri oggettivi stessi e giudizi di percezione sonora. Tuttavia sono stati fatti solo pochi tentativi per validare un metodo (statistico o analitico) che permetta di interpretare e mettere in relazione, con adeguata accuratezza, risultati ottenuti da misure e da test soggettivi. Risulta necessario, pertanto, capire quali siano i parametri oggettivi più adatti ad esprimere precise percezioni sonore del pubblico in sala e che risultino ben correlati con il giudizio espresso.

Questo lavoro di tesi si prefigge di dare un contributo alla messa a punto di un metodo da applicare all'analisi acustica delle sale da concerto; la ricerca ha avuto come oggetto di studio l'auditorium del Conservatorio C. Pollini a Padova ed il lavoro si è articolato nelle seguenti fasi:

1. analisi dello stato dell'arte e delle ricerche più recenti sulla qualità acustica di sale per la rappresentazione musicale;
2. prima sessione di misure acustiche in situ, per la valutazione delle caratteristiche acustiche in sala mediante parametri oggettivi;
3. analisi test soggettivo somministrato al pubblico in sala durante un evento musicale;
4. seconda sessione di misure fonometriche per la valutazione delle caratteristiche acustiche sul palcoscenico;
5. analisi test soggettivo somministrato ai musicisti sul palcoscenico.

Più specificamente, nella prima fase sono stati raccolti tutti i dati acustici oggettivi utili alla valutazione della qualità della sala, mediante una procedura di misurazione basata sul metodo della risposta all'impulso e consolidata durante lo svolgimento di un progetto di ricerca inserito nell'ambito del PRIN 2003: L'acustica dei grandi ambienti per la rappresentazione musicale. Dalla elaborazione dei dati raccolti durante questa prima fase di misure in situ si evince quanto segue:

- L'acustica della sala analizzata risulta molto buona per la musica d'opera e comunque adeguata alla musica sinfonica e alla musica da camera, non lo è invece per la musica d'organo o la prosa; il motivo principale consiste nei brevi tempi di riverberazione e nella buona definizione e chiarezza registrati.
- La sala presenta in generale tempi di riverberazione compresi fra 1,3 s e 1,4 s; risulta quindi sufficientemente adeguata per la musica da camera e carente, ma comunque accettabile, per la musica sinfonica. I valori ottimali per un sala di volumetria pari all'auditorium (circa  $5800 m^3$ ) sono  $1,4 < T_{30} < 2s$ .
- I valori del parametro  $BR$  risultano inferiori a quelli ottimali, ciò significa che i tempi di riverberazione alle basse frequenze sono troppo corti in relazione a quelli alle alte frequenze.
- Anche per quel che riguarda il  $T_{med}$ , parametro collegato al criterio soggettivo della vivezza del suono e alla pienezza del tono, i valori risultano ottimali per l'opera ( $T_{med} = 1,5 s$ ) e piuttosto scarsi per la musica sinfonica (valore ideale  $T_{med} = 1,9 s$ )

Nella seconda fase un questionario di acustica soggettiva è stato somministrato al pubblico presente in sala, previa breve introduzione esplicativa, contestualmente al concerto di fine anno in programma presso l'auditorium. Dall'analisi dei dati raccolti si è desunto quanto segue:

- generalmente il pubblico, sia esso rappresentato da musicisti sia da appassionati non musicisti, ritiene l'acustica della sala piacevole, definita, sufficientemente morbida, avvolgente ma allo stesso tempo secca. Ritiene inoltre che siano sufficientemente presenti sia le basse che le alte frequenze e che in generale la sala risulti piuttosto sonora.

A questo punto i dati rilevati durante le sessioni di misura sono stati confrontati con i risultati dei test in sala. L'impressione sonora positiva del pubblico in platea risulta ben correlata ai parametri oggettivi per la musica sinfonica; le principali valutazioni espresse dal pubblico trovano riscontro oggettivo in alcuni parametri misurati, in particolare con  $T_{30}$ ,  $D_{50}$ ,  $C_{80}$  e  $BR$ . Nonostante le difficoltà incontrate (poca disponibilità da parte del pubblico, inesperienza musicale, incapacità di comprensione del test), un buon numero di test validi è stato raccolto e pertanto si ritengono affidabili i risultati ottenuti. Si evidenzia comunque la necessità di formulare un modello di test standardizzato che sia comunemente utilizzato previa formazione del pubblico.

D'altra parte le condizioni ottimali per una buona esecuzione da parte dei musicisti sono ancora sostanzialmente poco conosciute. Molti fattori influenzano l'acustica del palcoscenico; essa risulta molto più complessa da indagare poiché interessa il processo interattivo con cui un musicista, durante l'esibizione, si adatta contestualmente all'ambiente acustico su cui si trova, basandosi essenzialmente sulla propria impressione sonora. Nella seconda parte di questa ricerca è stata indagata l'acustica del

palcoscenico con lo stesso metodo utilizzato nella prima fase, ovvero mettendo in relazione risultati di misure acustiche in situ, cioè sul palcoscenico, con risposte soggettive date dai musicisti che si sono esibiti. I risultati ottenuti dalla misurazione dei parametri oggettivi sul palcoscenico hanno evidenziato che i valori di  $ST_{early}$  e  $ST_{late}$  sul palcoscenico rientrano tutti nell'intervallo indicato come ottimale; il tempo di riverberazione risulta corto, di molto inferiore ai valori raccomandati per musica sinfonica; questo aspetto è di particolare importanza in quanto legato a tutte le esigenze soggettive dei musicisti: impressione generale della sala, supporto, riverberazione, dinamica, possibilità di sentire il proprio strumento e di sentire gli altri in modo equilibrato. Nella fase dei test soggettivi somministrati ai musicisti, le risposte ottenute sul palcoscenico hanno restituito una generale impressione sonora positiva; tuttavia i musicisti stessi hanno chiaramente evidenziato la carenza di alcuni requisiti di specifica importanza per l'esecuzione. Pertanto, i risultati ottenuti dalle analisi sul palcoscenico mettono in evidenza alcune contraddizioni: molte delle caratteristiche soggettive considerate desiderabili dai musicisti sul palcoscenico risultano strettamente correlate a parametri oggettivi il cui comportamento è risultato molto variabile e talvolta lontano da valori ottimali.

Dunque si delinea la necessità di indagare ulteriormente in primo luogo le dinamiche di una performance dal vivo e, conseguentemente, i parametri oggettivi in grado di tener conto delle più specifiche esigenze dei musicisti; in secondo luogo si prospetta lo studio di un questionario specificamente fatto per i musicisti durante l'esibizione sul palcoscenico. Inoltre valutazioni relative alla geometria del palcoscenico ed alla superficie riservata ai diversi strumenti, già affrontate, devono essere sviluppate. Dallo studio è emerso anche un limite degli attuali parametri acustici oggettivi utilizzati per valutare l'acustica del palcoscenico, ovvero il fatto che non sia del tutto opportuno fare valutazioni circa il bilanciamento e l'ascolto reciproco mediante misure su palcoscenico vuoto. Di certo un nuovo approccio nello studio dell'acustica del palcoscenico, più consapevole della complessità della rappresentazione musicale, ovvero come vissuta dagli esecutori, potrà portare a nuove vie di indagine, basate contemporaneamente su misure in opera, esperimenti in laboratorio, test soggettivi più avanzati e simulazioni acustiche dell'ambiente palco.



# Bibliografia

- [1] Beranek L.L., *Music, Acoustics and Architecture*, J. Wiley & Sons, New York, 1962
- [2] Beranek L.L., *Concert and Opera Halls: how they sound*, Acoustical Society of America, New York, 1996
- [3] Ando Y., *Concert Hall Acoustics*, Springer-Verlag, Berlin, 1985
- [4] Marshall A.H., Meyer J., *The directivity and auditory impressions of singers*, *Acustica* 58 [1985], pag. 130
- [5] Spagnolo R., *Manuale di Acustica Applicata*, UTET, Torino, 2001
- [6] Norma ISO 3382 *Acoustic - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters*, 1997
- [7] Marshall A.H., Gottlob D., Alrutz H., *Acoustical conditions preferred for ensemble*, *Journal of the Acoustical Society of America*, 64 [1978], 1437-1442
- [8] Tronchin L., *Qualità acustica dei teatri: analisi sperimentale e confronto con valutazioni soggettive in alcuni esempi italiani*, *Rivista Italiana di Acustica*, XVIII(3) Luglio-Settembre [1994], pp.51-64
- [9] Garai M., Rossi M.C., Tronchin L., *La percezione della qualità acustica dei teatri valutata mediante analisi statistica*, *Rivista Italiana di Acustica*, Gennaio-Giugno [1997], pp.3-18
- [10] Barron M., Marshall A.H., *Spatial impression due to early lateral reflections in concert hall: the derivation of physical measure*, *Journal of Sound and Vibrations*, 77 [1981], 211
- [11] Lehmann P. and Wilkens H., *Zusammenhang Subjektiver Beurteilungen von Konzertsalen mit raumakustischen Kriterien.*, *Acustica* 45 [1980], pag. 193
- [12] Schroeder, M.R., Gottlob, D., Siebrasse, K.F., *Comparative study of European Concert halls: correlation of subjective preference with geometrical and acoustic parameters*, *Journal of the Acoustical Society of America*, 56 [1974], 1195

- [13] Gade A. C., *Investigations of musicians' room acoustic conditions in concert halls. Part I: methods and laboratory experiments.*, Acustica 69, [1989], pag. 249
- [14] Gade A. C., *Investigations of musicians' room acoustic conditions in concert halls. Part II: field experiments and synthesis of results.*, Acustica 69 [1989], pag. 193
- [15] Barron M., *Auditorium acoustics and architectural design*, E & FN Spon - Chapman & Hall, London, 1993
- [16] Barron M., *Questionnaires for subjective assessment of concert spaces*, 15<sup>th</sup> ICA, Trondheim, Norway, 1995
- [17] Knudsen V.O., *Acoustics of music rooms*, Journal of the Acoustical Society of America, 2 [1931], 434
- [18] Farina A., Cocchi A., *Rilevamento sperimentale delle caratteristiche acustiche dei teatri e delle sale da spettacolo*, Atti del XVI Convegno AIA 1988, Milano, 28-30 marzo 1988
- [19] Farina A., *La caratterizzazione delle sale da spettacolo con particolare attenzione alle esigenze di ascolto della musica sinfonica*, Tesi di Dottorato, Università di Bologna, 1986
- [20] Farina A., *Acoustic quality of theatres: correlations between experimental measures and subjective evaluations*, Applied Acoustics, 62 [2001], 889-890
- [21] Sanders J., Marshall Day Acoustics, *Suitability of New Zealand Halls for chamber music*, Marshall Day Acoustics Pty Ltd, Auckland, 2003
- [22] Chiang W., Chen S., Huang C., *Subjective assessment of stage acoustics for solo and chamber music performances*, Acta Acustica, 89 [2003], 848-856.
- [23] Chiang W., Chen S., Huang C., *Acoustical design of stages with large plane surfaces in rectangular recital halls*, Applied Acoustics, 64, 863-884.
- [24] Barron M., Dammerud J. J., *Stage acoustics in concert halls - early investigations*, 6th International Conference on Auditorium Acoustics, Proc. of Institute of Acoustics 28 Part 2, 1-12 2006
- [25] Barron M., Dammerud J. J., *Early subjective and objective studies of concert hall stage conditions for orchestral performance*, Proc. 19<sup>th</sup> ICA, Madrid, 2007
- [26] Astolfi A., Giovannini M., Geroso S., Dellatorre L., *Assessment of the acoustic perception of musicians*, Proc. 6<sup>th</sup> International Conference on Auditorium Acoustics, Copenhagen, 2006

- [27] Astolfi A., Giovannini M., Barbato G., Filippi M., *The interpretation of objective measurements on the stage by means of the correlation with subjective data*, Proc. 19<sup>th</sup> ICA, Madrid, 2007
- [28] Genta G., Giovannini M., Astolfi A., Barbato G., *The subjective investigation of acoustic perception of musicians: a proposed method for interpretation of results*, Proc. 19<sup>th</sup> ICA, Madrid, 2007