

CRITERI DI PROGETTAZIONE ACUSTICA PER UNA SALA PROVA ORCHESTRA

Raffaele Pisani (1), Paolo Onali (1)

(1) Studio di ingegneria acustica Pisani, Rivoli (TO)

1. Introduzione

La disponibilità di una sala per prove d'orchestra è importante per le orchestre stabili quali le orchestre dei teatri lirici. In questi casi, infatti, non sempre è possibile provare sul palcoscenico o nella fossa d'orchestra in quanto si interferisce con altre attività legate agli allestimenti degli spettacoli. Da un punto di vista progettuale tali sale devono essere dimensionate per accogliere più di 50 elementi che provano in maniera stabile per la preparazione di concerti, opere liriche, etc. In esse tutti i musicisti devono poter udire chiaramente, oltre al suono del proprio strumento, anche il suono degli altri elementi. Gli indici che descrivono tali proprietà caratterizzano aspetti quali la percezione di assieme (Stage), l'equilibrio dell'energia iniziale (EEB), etc.

Un aspetto pratico da non sottovalutare è quello dell'ambiente in cui lavorano i professori d'orchestra; in pratica si richiede che l'esposizione al rumore dei musicisti, che provano per almeno cinque ore ogni giorno, siano contenuti per ridurre il rischio di sordità professionale. I livelli di suono in un ambiente ristretto possono raggiungere valori elevati e tali da produrre il fenomeno del mascheramento (oltre al rischio di danno uditivo). Alcuni musicisti, ed in particolare i direttori d'orchestra, ritengono che, in tali condizioni, si possano raggiungere livelli di "saturazione" tali da impedire un ascolto bilanciato di tutti gli strumenti acusticamente più deboli.

Si affronta il problema della progettazione della sala prova del Teatro del Maggio Musicale Fiorentino, si discutono i criteri progettuali e, soprattutto, si pone attenzione alla percezione binaurale del direttore d'orchestra in relazione alla proprietà di discriminare i singoli strumenti.

2. Gli elementi progettuali

La sala prove, realizzata all'interno del teatro comunale di Firenze per l'Orchestra del Maggio Musicale Fiorentino, è in grado di accogliere un massimo organico di 130 professori. Lo spazio disponibile è una sala delle dimensioni di 18,00 m in lunghezza, di

12,00 m in larghezza e di 5,50 m in altezza. Il volume complessivo risulta pari a 1188 m³ e la superficie disponibile per un organico da 90 a 130 professori d'orchestra è pari a $S = 216 \text{ m}^2$. Al completo, lo spazio disponibile per ciascun musicista è pari a 1,4 m² e, ovviamente, è ripartito diversamente a seconda delle necessità di ciascuno strumento (le percussioni, di solito, occupano superfici più ampie). Il volume per musicista è di circa 9 m³ ed è molto limitato se si confronta con quello disponibile negli auditorium. Anche nelle buche d'orchestra più ampie la superficie è limitata (raramente superiore a 210 m²), ma il volume per musicista a teatro pieno può raggiungere 20 m³/persona. Il volume disponibile non è adatto per un numero così elevato di musicisti; nella maggioranza dei casi, però, provano non più di 70 – 80 elementi, per cui il volume per musicista varia da 17 a 15 m³. Una situazione ottimale sarebbe quella di poter disporre di uno spazio tale da superare i 20 m³/persona.

Il progetto [1] della sala è stato impostato con l'idea di ottenere una acustica variabile con l'impiego di pannelli mobili. Si è ritenuto di dover adattare l'acustica al numero di professori presenti ed al tipo di musica strumentale. Nel corso della lunga messa a punto della sala, sentito principalmente il parere dei musicisti e dei direttori d'orchestra, è emersa la tendenza di orientare l'acustica verso una sala essenzialmente secca, con tempi di riverberazione molto bassi. A tal fine sono stati aggiunti ulteriori corpi fonoassorbenti che, in parte, hanno sconvolto l'idea iniziale di progetto basata sulle regole dell'acustica tradizionale. Il requisito più importante emerso dalle interviste con i Maestri Muti, Metha e Cobòs e con il primo violino titolare è stato quello di conseguire la massima definizione spaziale e temporale intesa come la capacità di discriminare il suono di tutti gli strumenti musicali, soprattutto nei pieni orchestrali. In letteratura mancano precisi parametri di riferimento per la progettazione di sale per prove le cui dimensioni sono molto contenute. Il raggiungimento degli obiettivi esposti nella norma di riferimento ISO 3382-1 non garantisce una unanime accettazione dell'acustica da parte dei musicisti, anzi male si adatta a descrivere le qualità acustiche richieste per sale di piccole dimensioni. Per i professori che nell'orchestra trovano collocazione davanti gli ottoni e le percussioni sono indispensabili gli accorgimenti per la protezione dell'udito in quanto esposti direttamente al suono dei fiati le cui campane sono normalmente orientate verso di loro a poca distanza dalle orecchie.

Si ricorda che le esigenze di acustica per il musicista, in letteratura e secondo la norma, sono descritte dal parametro "supporto" o Stage ST suddiviso in ST_{Early}, legato alla percezione dell'insieme orchestrale; ST_{Late} legato alla percezione soggettiva della riverberazione. Per i direttori d'orchestra, invece, non sono ancora ben individuati, a parere di chi scrive, i requisiti acustici che consentano la progettazione orientata al miglioramento della capacità percettiva di discriminare il suono degli strumenti più deboli da una massa sonora di notevole intensità. Non a caso, negli auditorium l'orchestra è disposta su praticabili di diversa altezza per ridurre l'effetto barriera delle prime file. Questo accorgimento non è consentito in una sala prova di un teatro lirico in quanto, nella realtà della rappresentazione, l'orchestra è disposta in buca su un solo piano.

Il meccanismo della percezione binaurale è, comunque, di fondamentale importanza per percepire separatamente le diverse sorgenti. Viene esaltato il processo di risoluzione spaziale, al quale si affianca quello mentale, che consente di seguire l'evoluzione temporale del suono di alcuni strumenti immersi nel suono dell'orchestra (effetto psicoacustico noto in letteratura come "cocktail party effect"). Il direttore d'orchestra, sotto questo aspetto, ha sviluppata tale funzione per il continuo esercizio e per la lettura e conoscenza dello spartito. La letteratura e la norma ISO, a proposito dell'ascolto binaurale, propongono, con riserve di alcuni, la misura del parametro IACC

(coefficiente di correlazione binaurale) che dovrebbe essere legato all'impressione che uno spettatore percepisce in relazione alla spazialità della scena sonora. Maggiori informazioni possono essere desunte, invece, dall'analisi della funzione IACF, il cui massimo esprime la perdita di similitudine dei segnali che giungono separatamente alle due orecchie, da alcuni chiamata perdita di coerenza. La discriminazione percettiva dei singoli strumenti non è quantificata dal parametro IACC, ma deve essere ricercata considerando la fusione di due ambiti: quello del sistema costituito da sorgenti multiple in uno spazio confinato, la cui uscita fisica è costituita dal segnale che raggiunge le membrane timpaniche delle due orecchie del direttore d'orchestra e quello mentale, con complessi processi psicoacustici che coinvolgono le proprietà percettive e di saturazione dell'organo dell'udito. La progettazione di acustica della sala rientra nel primo ambito, definito fisico, i cui parametri sono quantificabili e misurabili.

3. La definizione del progetto

L'acustica della sala è stata progettata, originariamente, per soddisfare le esigenze della pratica strumentale e vocale, mediante l'impiego di strutture fonoassorbenti e diffondenti (si vedano la Foto 1 e la Foto 2) così classificate:

pannelli diffondenti

- cuspidi o diedri da fissare sulla parete alle spalle del direttore di orchestra, con lo scopo di diffondere parzialmente il suono e regolare la risposta all'impulso in relazione al parametro EDT (early decay time).
- Strutture cilindriche diffondenti sulle pareti laterali per regolare la frazione di energia laterale LF nonché i livelli sonori delle prime e successive riflessioni laterali (GEL e GLL);
- Strutture cilindriche sulla parete di fondo, alle spalle dell'orchestra, per regolare il bilanciamento tra chiarezza e riverberazione.
- Vele a soffitto diffondenti per migliorare le prerogative di assieme ed intimità. Sono costituite da strutture cilindriche appese che diffondono il suono su tutta l'area occupata dall'orchestra;

pannelli fonoassorbenti

I pannelli fonoassorbenti, per il controllo del tempo di riverberazione, si dividono in strutture fisse e strutture ad assorbimento acustico variabile.

- *Struttura fonoassorbente fissa.* Tale struttura è realizzata a soffitto, con lastre di gesso forate e materassino fonoassorbente retrostante.
- *Pannelli ad assorbimento acustico variabile.* Gli elementi fonoassorbenti sono costituiti da pannelli acustici, incernierati in modo tale da presentare, verso la sala, una superficie completamente fonoassorbente o una superficie completamente diffondente.



Foto 1 – parete alle spalle del direttore



Foto 2 – parete alle spalle dell'orchestra

La metodologia utilizzata per la verifica dell'acustica è quella indicata dalla norma ISO 3382-1. Si utilizza una sorgente omnidirezionale ed un microfono a condensatore con diagramma polare commutabile da omnidirezionale a figura di otto. Per il rilievo della risposta all'impulso binaurale e per le registrazioni binaurali delle prove d'orchestra si utilizza il torso della Bruel & Kjaer 4100 con orecchie artificiali normalizzate. Nella tabella 1 che segue si riportano i valori medi misurati nelle bande da 500 a 1000 Hz ed i valori di riferimento, come indicati dalla norma. Nella bibliografia [1] sono riportati, in dettaglio, i valori degli indici in funzione della frequenza.

Tabella 1 - Valori misurati e confrontati con quelli di accettabilità per sale da concerto

Parametro	Valori rilevati	Campo di accettabilità
Tempo di riverberazione (RT)	0,94	$1,8 < RT < 2,2$ s
Tempo di primo decadimento (EDT)	0,55	$1,8 < RT < 2,2$ s
Chiarezza (C_{80})	6,7	$-2 < C_{80} < +2$ dB
Frazione della prima energia laterale (LF)	0,17	$0,1 < LF < 0,35$
Indice di intensità o guadagno o livello relativo (G)	1,9	$G > 0$
Indice di supporto ST_{Early} (condizioni di assieme)	8,3	$18 < ST_{Early} < -10$ dB
Indice di supporto ST_{Late} (riverberazione percepita)	13,4	$18 < ST_{Late} < -12$ dB

4. I parametri più idonei a caratterizzare l'acustica della sala prova

Occorre porre attenzione ai meccanismi psico-fisici che caratterizzano l'ascolto binaurale e che sono alla base della risoluzione spazio temporale.

La localizzazione di una sorgente è possibile attraverso un processo periferico dell'ascolto binaurale che discriminano, sin dall'inizio, le fasi e le ampiezze dei segnali che giungono alle due orecchie. È utilizzato anche il fenomeno psicofisico del cosiddetto effetto di precedenza (*Precedence effect* - Blauert, 1983) o *legge del primo fronte d'onda*. È chiaro che l'informazione relativa alla localizzazione spaziale di uno strumento è di aiuto per la sua percezione. L'indice IACC non è adatto a quantificare i requisiti acustici richiesti. Numerosi studi hanno dimostrato che l'ascolto binaurale non

può essere descritto con un modello di percezione che coinvolga la sola funzione di mutua correlazione binaurale Lindemann (1985), Blauert (1996). Il meccanismo di percezione, infatti, comporterebbe anche azioni inibitorie controlaterali sui segnali ricevuti dalle due orecchie. Questo porterebbe ad una più completa percezione della scena sonora con l'individuazione della posizione, altezza e distanza della sorgente; ad una migliore separazione delle sorgenti sonore [3].

In letteratura sono definiti, tra gli altri, due parametri che descrivono la qualità della percezione binaurale: la differenza dei livelli di mascheramento **BMLD** (binaural masking level difference) e la differenza dei livelli di intelligibilità **BILD** (binaural intelligibility level difference). Si ritiene possibile tradurre, in ambito musicale, i concetti sopra esposti attraverso le seguenti grandezze:

- la *funzione di mutua correlazione interaurale IACF*, che quantifica gli aspetti relativi alla localizzazione della sorgente ed alla coerenza timbrica percepita dai professori e dal direttore d'orchestra;
- la *funzione di trasferimento della modulazione m*, che fornisce un indicatore della risoluzione orizzontale della sala e del ritmo musicale.

I valori dei parametri sono calcolati sui segnali musicali binaurali registrati con il torso artificiale posto in prossimità del direttore d'orchestra.

La funzione di mutua correlazione interaurale descrive lo spostamento di una sorgente rispetto alla posizione dell'ascoltatore. Tale funzione è utilizzata nella valutazione dell'indice IACC ed esprime la similitudine tra i segnali che giungono alle orecchie destro e sinistro (Fig. 4). Se la posizione della sorgente è centrale nei confronti della posizione del direttore d'orchestra e l'ambiente è acusticamente simmetrico, i segnali sono perfettamente uguali, il massimo della IACF è sul ritardo 0. Se la sorgente è spostata, il massimo si sposta in relazione al ritardo relativo dei segnali binaurali.

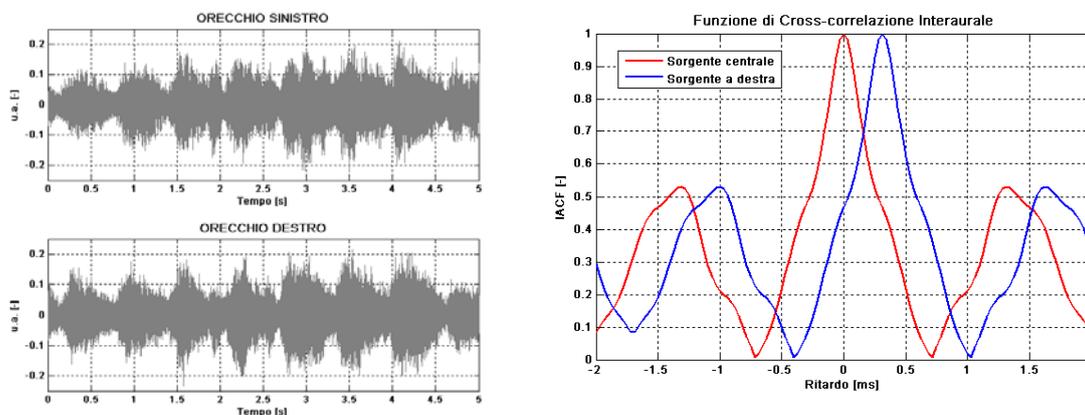


Fig. 4 – Calcolo della funzione di mutua correlazione di segnali binaurali.

Il momento baricentrico della funzione IACF è calcolato con la seguente relazione

$$(1) \quad \langle IACF \rangle = \frac{\int_{-2ms}^{2ms} \tau \cdot IACF(\tau) \cdot d\tau}{\int_{-2ms}^{2ms} IACF(\tau) \cdot d\tau}$$

La funzione di trasferimento della modulazione ed il calcolo del livello dell'indice della profondità della modulazione è dedotta dall'analisi dell'involuppo dell'intensità del segnale che perviene alle orecchie del manichino (Fig. 5).

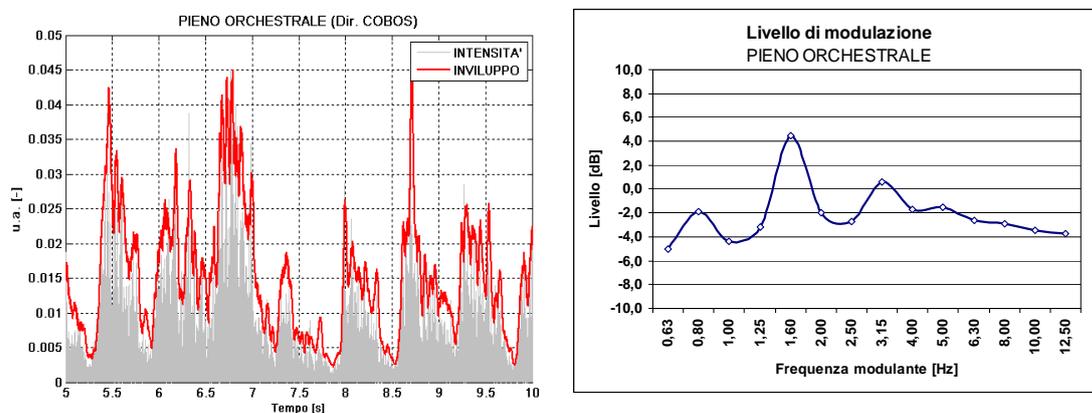


Fig. 5 – Calcolo del livello dell'indice di modulazione su segnale musicale

5. Indicazioni progettuali desunte dalla messa a punto della sala prove d'orchestra del Teatro del Maggio Musicale

Terminata la realizzazione della sala ed eseguiti i primi collaudi, sono state effettuate prove, nel corso di alcuni mesi, a seguito degli interventi di messa a punto della sala. Il tempo di riverberazione, con il massimo delle unità fonoassorbenti inserite, scende da 0,9 a 0,5 s a 1000 Hz. È stato richiesto di aumentare ulteriormente le unità fonoassorbenti con l'aggiunta di ulteriori pannelli. Si riportano i valori dei parametri estratti dalle seguenti prove:

1 – il Maestro Jesus Lopez Cobòs prova la IX sinfonia di Beethoven con organico di 90 musicisti nella sala appena ultimata. I pannelli sono tutti aperti per il massimo assorbimento acustico.

2 – il Maestro Riccardo Muti prova l'opera "Orfeo ed Euridice" di Gluck. La prima prova riguarda il canto del soprano e del mezzo soprano accompagnati al pianoforte dal Maestro. I pannelli sono in parte diffondenti per richiesta dei cantanti. La seconda prova riguarda l'orchestra con organico di 60 musicisti ed assorbimento acustico massimo.

3 – il Maestro Zubin Metha prova l'opera "L'oro del Reno" con l'orchestra a pieno organico. Tutti i pannelli fonoassorbenti sono completamente aperti e sono stati aggiunti, a soffitto, ulteriori corpi fonoassorbenti.

Le variabili considerate sono: numero di musicisti, brani estratti dalle diverse esecuzioni caratterizzati da passaggi lenti, andanti, veloci, passaggi di solisti e pieni orchestrali. Si calcolano i valori medi del livello di modulazione m e della funzione IACF e si ordinano in valori crescenti nei grafici di Figura 6. È evidente la proporzionalità diretta (con legge logaritmica) tra intelligibilità musicale e fattori quali numero di strumenti e intensità sonora di emissione. È altrettanto evidente la proporzionalità inversa tra percezione di spazialità e i fattori accennati.

È possibile dedurre una forma analitica chiusa che lega tra loro la percezione di spazialità e l'intelligibilità del segnale musicale. L'espressione può essere del tipo

$$(2) \quad K = a \cdot \log_{10}(\langle IACF \rangle) + b \cdot \log_{10}(m)$$

dove K, a e b sono parametri derivati dalle regressioni dei dati ; $\langle IACF \rangle$ è il momento baricentrico della funzione di mutua correlazione interaurale ed m il livello di modulazione medio calcolato nella banda di frequenze modulanti propria del segnale musicale (tra 0,63 Hz e 12,5 Hz) .

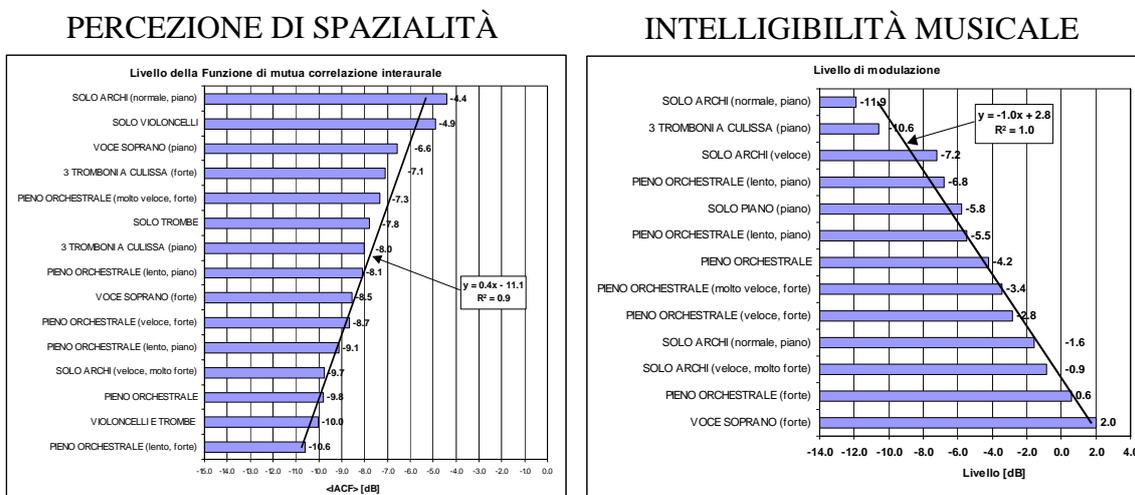


Fig. 6 - Livelli di modulazione medi e valori medi della funzione di mutua correlazione interaurale

Il legame di proporzionalità inversa tra spazialità e intelligibilità è reso con maggiore evidenza nel grafico di dispersione di Figura 7 riportato nel riquadro a).

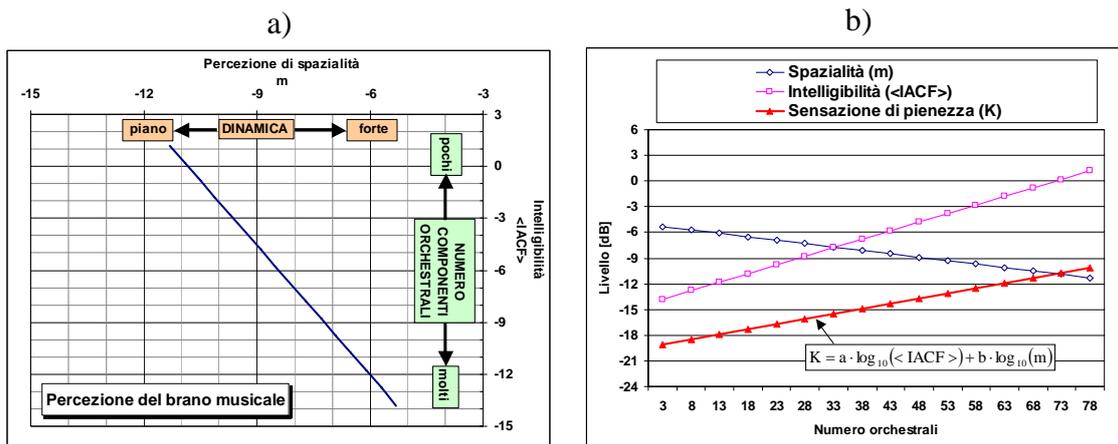


Fig. 7 – a) Funzione di dispersione tra la percezione di spazialità e intelligibilità del brano. b) Percezione di spazialità e intelligibilità in funzione del numero di professori d'orchestra

Le caratteristiche del brano musicale si riflettono direttamente sulla percezione che il direttore ha dello stesso. Se esso ha un andamento grave e una bassa intensità musicale, prevarranno le percezioni di compattezza timbrica e di localizzazione, in sintesi è più semplice per il direttore selezionare e seguire una linea musicale dal "rumore di fondo" prodotto dagli altri strumenti. Se l'esecuzione ha caratteristiche di vivacità ed alte intensità sonore prevarranno nel direttore d'orchestra le sensazioni correlate alla trasparenza ed alla facilità di risoluzione della scansione ritmica del brano.

Il grafico riportato nel riquadro b) in Figura 7 riporta i singoli addendi quali <IACF>, il livello di modulazione m e la funzione K, definita in precedenza. Si osserva che la somma degli indici (indicata come "sensazione di pienezza") non è costante, ma cresce con il numero di elementi che suonano. La regressione lineare tra il parametro K ed il numero approssimato di orchestrali evidenzia che questo parametro è in realtà funzione del numero n di orchestrali ($K = K(n)$) e, in ultima analisi, dello spazio a disposizione del singolo orchestrale.

Se il numero di musicisti che suonano contemporaneamente aumenta allora diminuisce la percezione di spazialità (localizzazione) ed aumenta l'intelligibilità (scansione orizzontale).

A tale proposito si può rilevare che, per non rendere troppo bassa la spazialità, l'organico non dovrebbe superare certi numeri (su 70 – 90 elementi) superati i quali vi è la possibilità di iniziare a percepire la sensazione di "saturazione".

6. Conclusioni

Elementi fonoassorbenti distribuiti sulle pareti, con la possibilità di variare il numero di unità fonoassorbenti esposti al suono, consentono di bilanciare le riflessioni e di conseguire il tempo di riverberazione ottimale per le diverse prove.

La percezione dell'insieme e dei dettagli, da parte del Direttore d'orchestra, è ottenuta, anche essa, mediante una disposizione degli elementi diffondenti sia sulle pareti laterali e sulla parete di fondo, sia, in maggior misura, sulla parete posta alle sue spalle. I risultati delle prove mostrano il pieno rispetto dei valori stabiliti per i parametri più significativi. Si ottiene una sufficiente variazione del tempo di riverberazione con

pannelli completamente fonoassorbenti o completamente diffondenti. Tale variazione risulta essere nettamente percepita dai musicisti a sala parzialmente occupata.

Bibliografia

- [1] Pisani R., “Criteri di progettazione della sala prova orchestra del teatro della Fondazione del Maggio Musicale Fiorentino”, atti del 34° Convegno Nazionale dell’Associazione Italiana di Acustica. – Firenze 2007
- [2] Blauert, “Spatial Hearing”, MIT Press 2004
- [3] Lindemann “Extension of a binaural cross-correlation model by means of contralateral inhibition”. JASA 80, 1608 - 1630