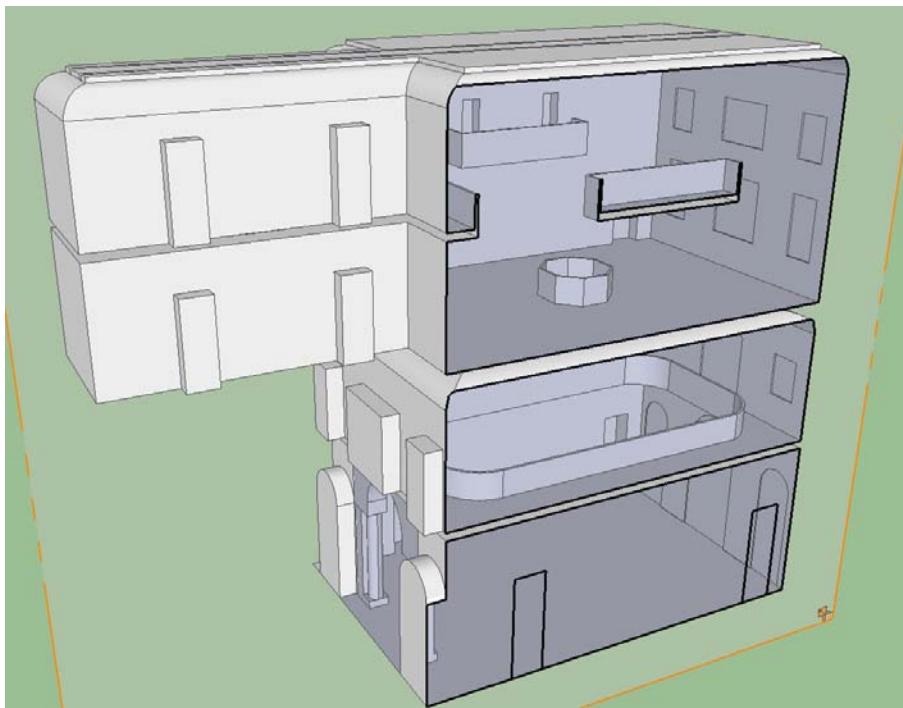


CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA DEL COMPLESSO “AUDITORIO-SALA DELLA MUSICA” DI VILLA CONTARINI A PIAZZOLA SUL BRENTA



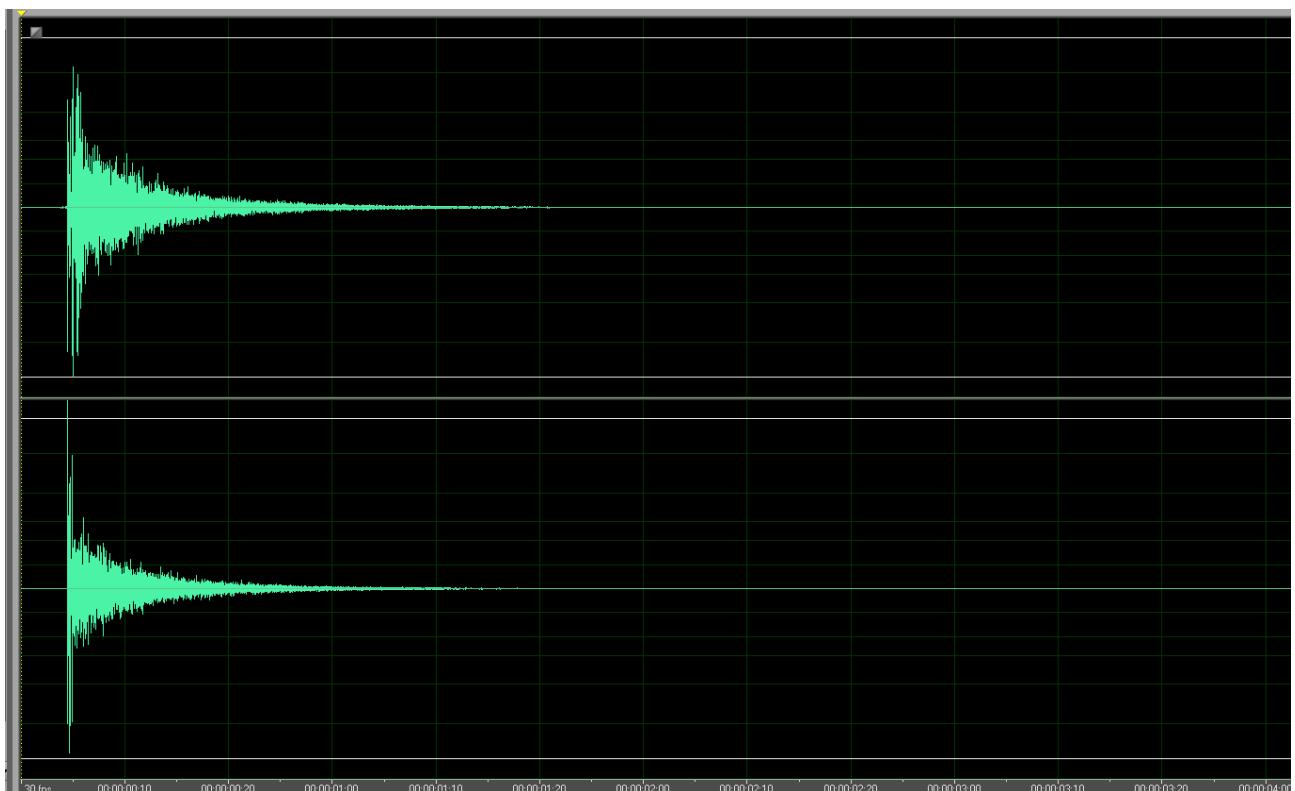
Davide Bonsi
Laboratorio di Acustica Musicale e Architettonica
Fondazione Scuola di San Giorgio,
Isola di San Giorgio Maggiore, 30124 Venezia

Materiali e metodi

La presente relazione illustra i risultati di una campagna di misurazioni acustiche eseguite presso le sale del corpo centrale della villa “Contarini-Fondazione G.E. Ghirardi” a Piazzola sul Brenta (PD) nel mese di gennaio 2011.

L'apparato strumentale è costituito da una sorgente dodecaedrica, un computer portatile, un'interfaccia audio digitale multicanale di tipo *firewire* (MOTU Traveler), ed un microfono binaurale (testa artificiale Brüel & Kjær 4100). Il processo di misura, basato sulla emissione di un segnale di prova (nella fattispecie un tono sinusoidale di frequenza crescente, denominato *sweep*), la sua acquisizione simultanea ed una opportuna elaborazione numerica tra i due elementi, permette di ottenere una funzione di riferimento, denominata risposta all'impulso, che contiene tutte le informazioni in termini di ampiezza e tempi di arrivo delle onde sonore emesse dalla sorgente e rilevate nel punto di acquisizione. La forma della risposta all'impulso è quello di un “colpo di pistola”, ossia un fronte d'onda di durata infinitesima che per effetto della sovrapposizione con le riflessioni originate alle pareti acquista una forma prolungata di tipo riverberante. Dalla risposta all'impulso sono ricavabili una serie di grafici e indici descrittivi del campo acustico in esame, che permettono di valutare le modalità di trasferimento dell'energia sonora per una specifica disposizione della sorgente e dell'ascoltatore all'interno di un dato spazio acustico confinato. Particolarmente importante è in questo contesto la possibilità di ottenere parametri monoaurali quali il tempo di riverberazione, la chiarezza, l'indice di intensità, l'indice di trasmissione del parlato, ecc., i cui valori esprimono in maniera sintetica i diversi attributi percettivi del suono musicale o della parola.

Il sistema utilizzato nel presente studio fornisce risposte all'impulso di tipo “binaurale” (vedi esempio di fig. 1), ossia riferite alle posizioni delle orecchie di un ipotetico ascoltatore situato nel punto di misura. In questo modo, attraverso indici descrittivi definiti in funzione di entrambi gli elementi che costituiscono ciascuna coppia di risposte, possono essere dedotte ulteriori informazioni relative alle proprietà di “spazialità” del campo acustico, fra le quali si possono menzionare la direzione di provenienza del suono, la sensazione di avvolgimento e l'ampiezza apparente della sorgente.



Esempio di risposta all'impulso binaurale.

Le misurazioni sono state eseguite in 4 configurazioni. Per ciascuna di esse sono stati calcolati i valori globali e in bande di ottava (con frequenza centrale da 63 a 8000 Hz) degli indicatori riportati nella seguente tabella:

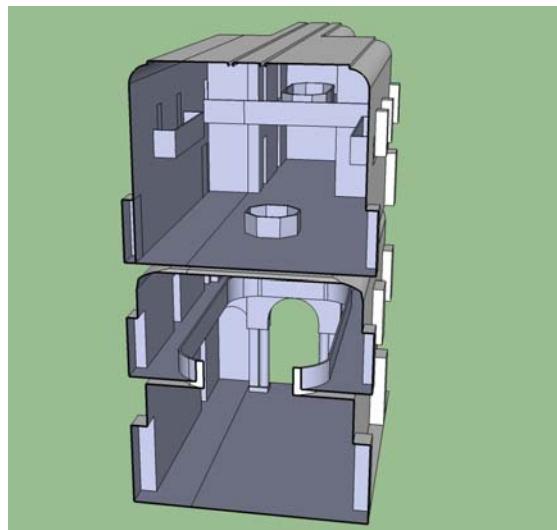
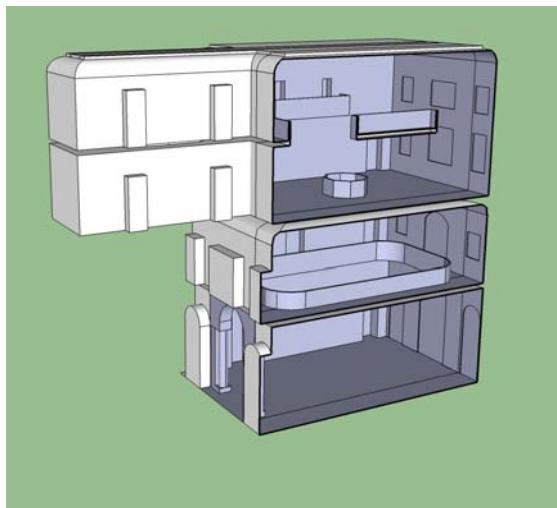
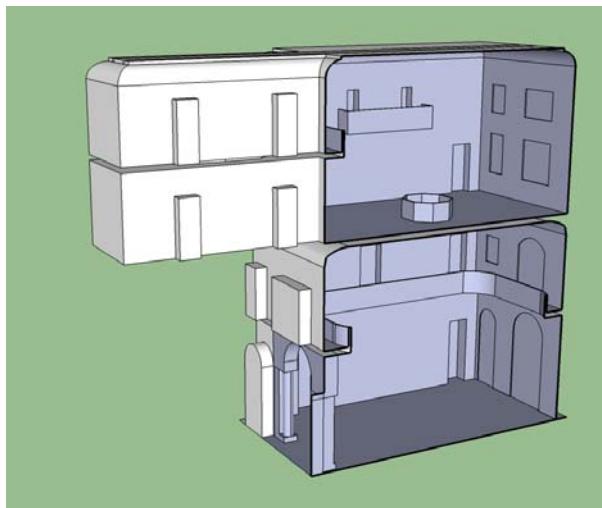
| Denominazione | Indice | Corrispondenza percettiva |
|------------------------------------|---------------|---|
| Intensità (robustezza) | G | Volume sonoro – amplificazione della sala |
| Chiarezza | C80 | Chiarezza (percezione del fraseggio musicale) |
| Definizione | D50 | Chiarezza del suono (parlato) |
| Tempo baricentrico | ts | Chiarezza (generica) |
| Tempi di riverberazione iniziale | EDT | Riverberazione percepita |
| Tempi di riverberazione successiva | T15, T20, T30 | Riverberazione, volume sonoro, pienezza tonale... |
| Correlazione mutua interaurale | IACC | Spazialità del campo |

Descrizione architettonica della sala

Lo spazio oggetto delle misure è formato dalla sovrapposizione di due ambienti principali che occupano quasi per intero il corpo centrale della villa. Nella parte inferiore si trova la sala denominata “auditorio” da cui si accede attraverso un’ampia porta ad arco comunicante con l’atrio d’ingresso dell’edificio. Il volume ha una forma pressoché rettangolare, di dimensioni approssimate ($L \times W \times H$) $14.5 \text{ m} \times 9 \text{ m} \times 10.5 \text{ m}$. Ad una altezza dal pavimento di circa 6 metri è presente un ballatoio con balaustra che a sua volta suddivide lo spazio in due porzioni. L’apertura del ballatoio, di forma arrotondata, ha un’estensione di circa 78 m^2 .

La parte superiore del complesso è costituita dalla sala detta “della chitarra rovesciata”, la cui altezza è di circa 8 metri. Tale ambiente è composto da una sala principale con pianta simile a quella della sala inferiore e un prolungamento di dimensioni $4 \text{ m} \times 9.5 \text{ m}$ circa. Il volume principale è collegato alla sala sottostante attraverso una piccola apertura di forma ottagonale posta al centro del pavimento (raggio = 1.2 m circa). Sulle pareti laterali della sala, ad un’altezza di circa 4 m, sono presenti due pergoli lignei con base $5 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, mentre alla medesima altezza nella parte più stretta dello spazio è presente un soppalco che sporge sulla porzione principale formando un ulteriore pergola ortogonale ai due precedenti. Il soppalco è inoltre provvisto di un’apertura di forma ottagonale allungata che collega i due livelli in cui è suddivisa questa porzione della sala. Altro elemento degno di nota è costituito dalle due coppie di fessure praticate sul soffitto attraverso le quali la sala comunica direttamente con il sottotetto della villa.

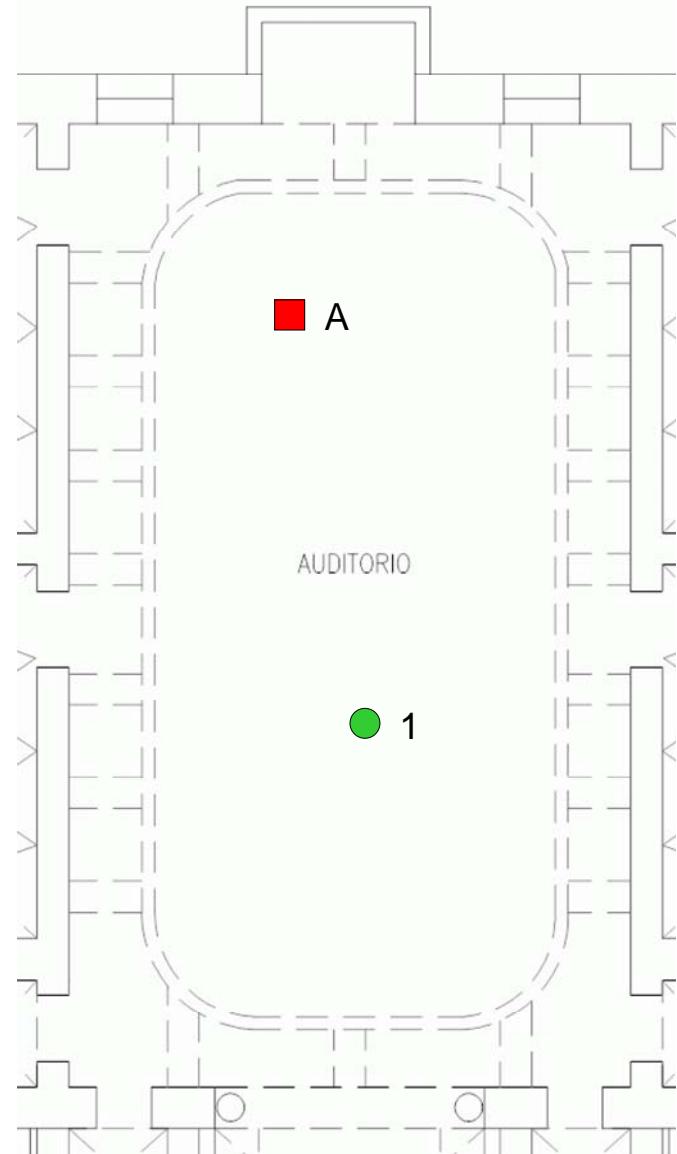
La volumetria dei due ambienti, auditorio e sala della chitarra, è all’incirca la stessa e pari rispettivamente a circa 1400 m^3 e 1200 m^3 .





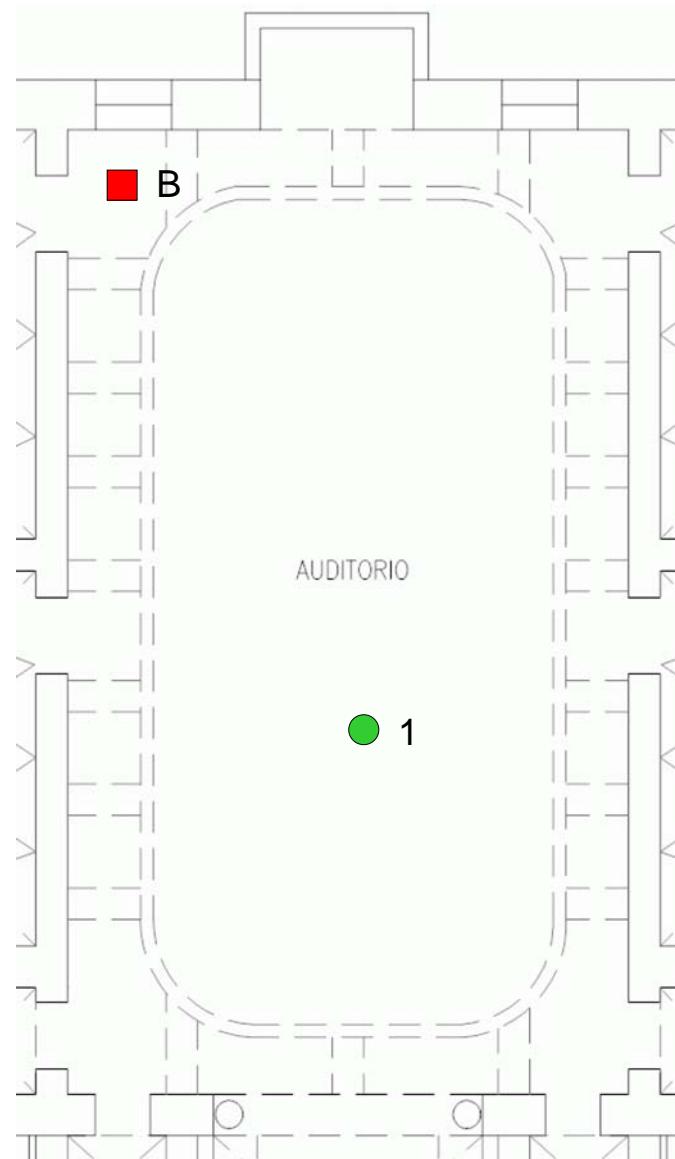
Analisi dei dati

- A-1: sorgente al piano terra (auditorio), ricevitore al piano terra



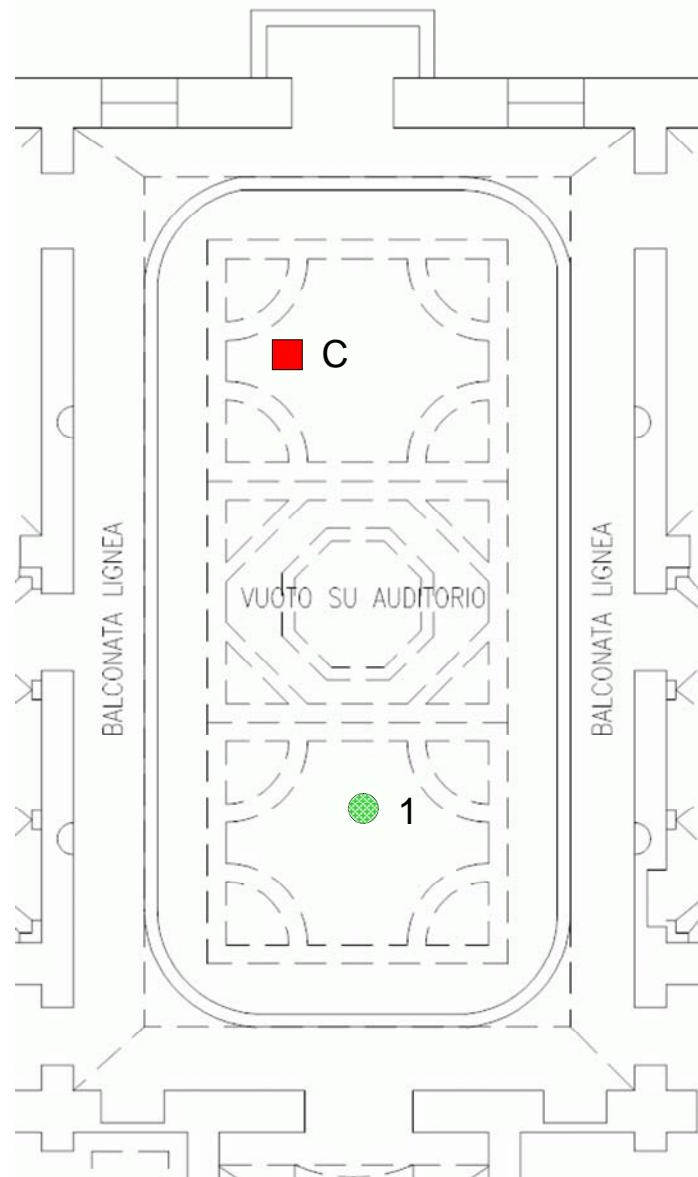
| Freq, [Hz] | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | Lin |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| G [dB] | - | 12.4 | 11 | 11.2 | 12 | 10.9 | 9.5 | - | 10.6 |
| C80 [dB] | -0,56 | -2,54 | -0,6 | -4,01 | -2,37 | -2,1 | -1,01 | 2 | 1,22 |
| D50 [%] | 40,66 | 17,57 | 37,29 | 16,21 | 18,81 | 25,85 | 25,39 | 38,3 | 36,24 |
| ts [ms] | 186,11 | 184,92 | 155,72 | 178,18 | 165,81 | 156,73 | 128,74 | 85,76 | 99,89 |
| EDT [s] | 2,43 | 2,33 | 2,13 | 2,03 | 2,05 | 1,99 | 1,62 | 1,05 | 1,27 |
| T15 [s] | 1,6 | 2,52 | 2,25 | 2,45 | 2,48 | 2,47 | 1,84 | 1,13 | 1,69 |
| T20 [s] | 2,37 | 2,48 | 2,3 | 2,61 | 2,53 | 2,48 | 1,89 | 1,18 | 1,8 |
| T30 [s] | 2,64 | 2,67 | 2,41 | 2,62 | 2,61 | 2,47 | 1,95 | 1,26 | 1,97 |
| IACC (Early) | 0,989 | 0,9 | 0,68 | 0,197 | 0,414 | 0,146 | 0,194 | 0,175 | 0,175 |

- B-1: sorgente nel ballatoio (auditorio), ricevitore al piano terra



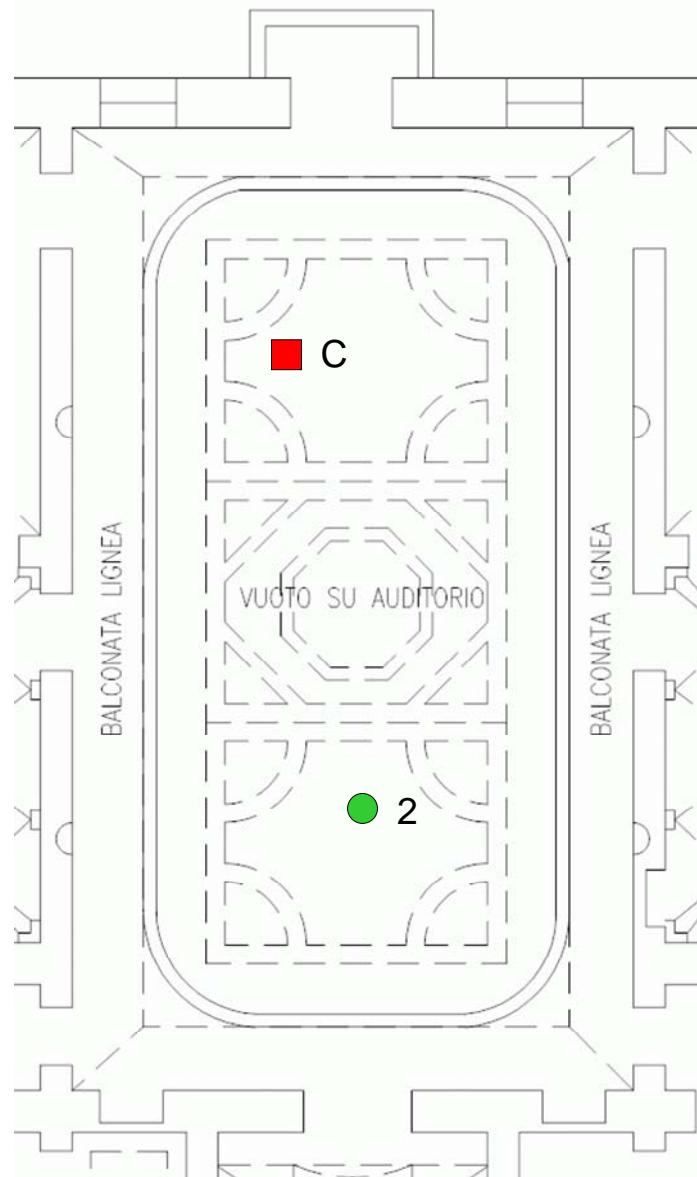
| Freq, [Hz] | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | Lin |
|---------------------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| G [dB] | - | 11.1 | 10.8 | 11.5 | 11 | 11 | 9.1 | - | 10.4 |
| C80 [dB] | -3,82 | -5,13 | -4,17 | -5,13 | -2,67 | -2,8 | -1,14 | 2,83 | 0,78 |
| D50 [%] | 7,46 | 4,85 | 17,07 | 15,63 | 25,91 | 18,09 | 24,78 | 49,26 | 37,32 |
| ts [ms] | 217,4 | 243,32 | 198,14 | 200,7 | 178,6 | 181,9 | 139,9 | 82,1 | 114,7 |
| EDT [s] | 2,41 | 2,62 | 2,56 | 2,27 | 2,48 | 2,38 | 1,75 | 1,14 | 1,59 |
| T15 [s] | 2,95 | 2,5 | 2,38 | 2,6 | 2,39 | 2,45 | 1,96 | 1,23 | 1,95 |
| T20 [s] | 3,01 | 2,51 | 2,4 | 2,68 | 2,51 | 2,47 | 1,98 | 1,29 | 2,03 |
| T30 [s] | 3,75 | 2,59 | 2,47 | 2,64 | 2,64 | 2,52 | 2,02 | 1,35 | 2,15 |
| IACC (Early) | 0,99 | 0,94 | 0,56 | 0,12 | 0,24 | 0,3 | 0,17 | 0,08 | 0,17 |

- C-1: sorgente nella sala dell chitarra, ricevitore al piano terra

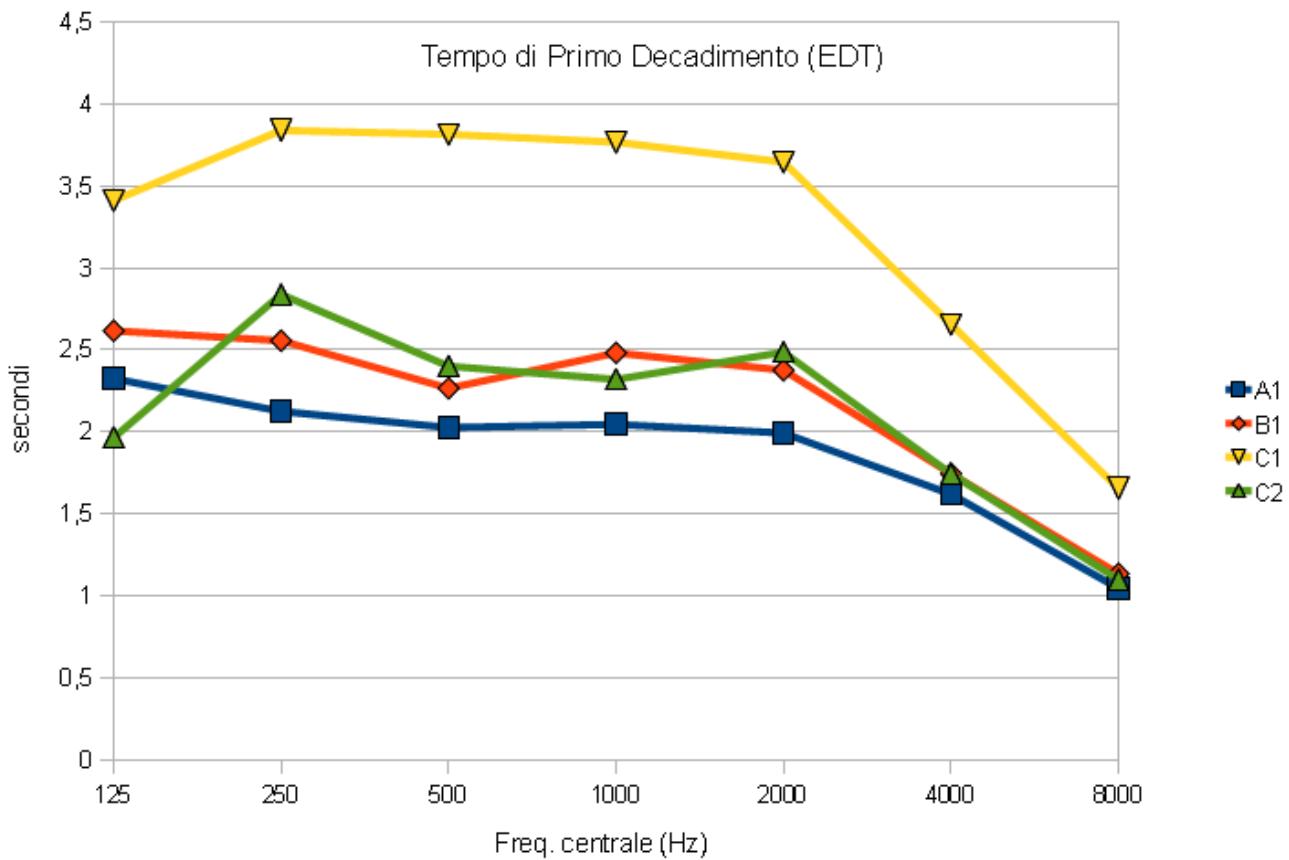


| Freq, [Hz] | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | Lin |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| G [dB] | - | 1.8 | -0.9 | -1.2 | -3.2 | -4.3 | -6.2 | - | -3.6 |
| C80 [dB] | -20,61 | -8,45 | -8,73 | -11,2 | -10,33 | -9,44 | -6,59 | -1,32 | -2,83 |
| D50 [%] | 0,59 | 4,91 | 5,51 | 4,09 | 2,73 | 5,31 | 7,56 | 27,48 | 21,22 |
| ts [ms] | 514,21 | 320,07 | 331,96 | 360,02 | 361,39 | 322,08 | 239,28 | 133,98 | 184,23 |
| EDT [s] | 3,92 | 3,41 | 3,84 | 3,82 | 3,77 | 3,65 | 2,66 | 1,66 | 2,38 |
| T15 [s] | 2,57 | 3,6 | 3 | 3,23 | 3,21 | 3,07 | 2,48 | 1,54 | 2,54 |
| T20 [s] | 2,96 | 3,34 | 2,92 | 3,01 | 3,19 | 3,04 | 2,43 | 1,54 | 2,55 |
| T30 [s] | 4,14 | 3,23 | 3,24 | 2,92 | 2,92 | 2,96 | 2,33 | 1,56 | 2,57 |
| IACC (Early) | 0,97 | 0,94 | 0,88 | 0,66 | 0,49 | 0,59 | 0,38 | 0,22 | -0,43 |

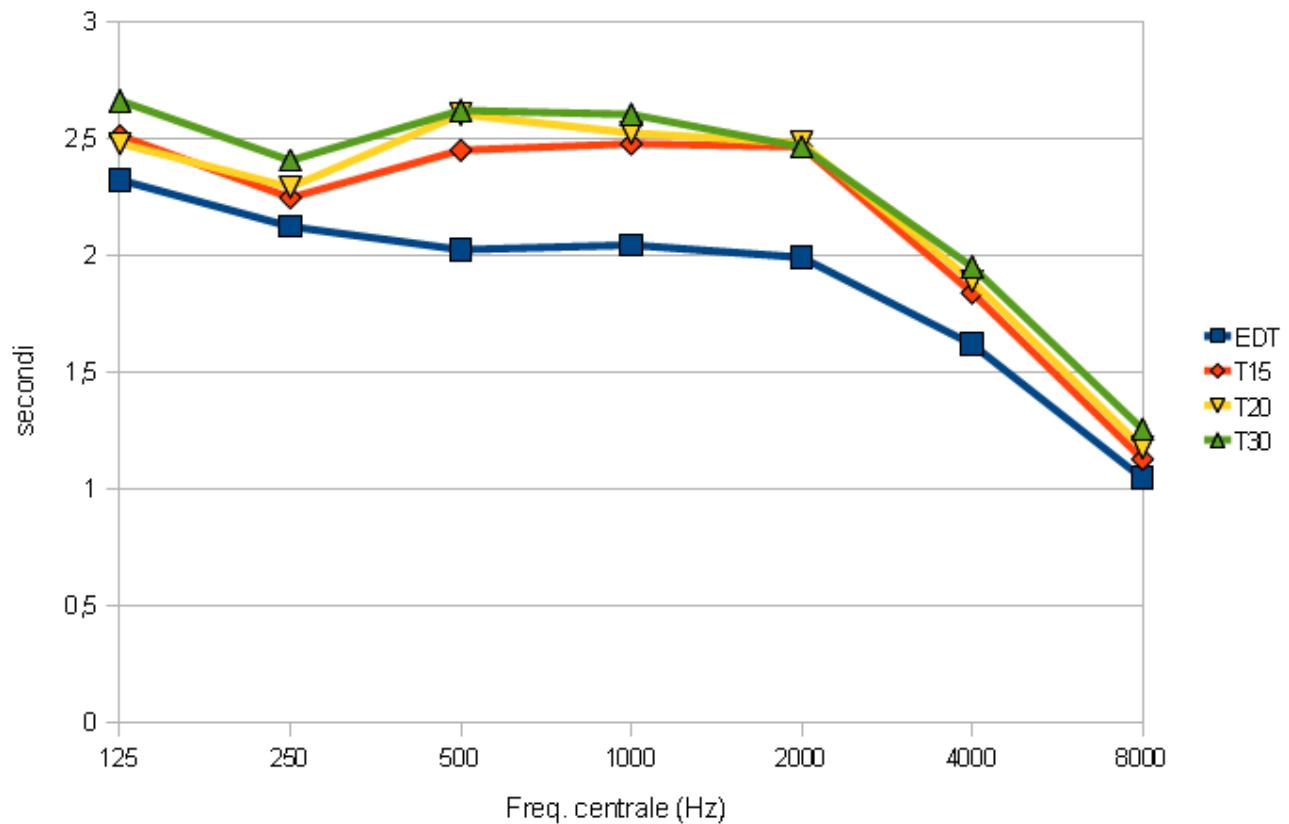
- C-2: sorgente e ricevitore nella sala della chitarra



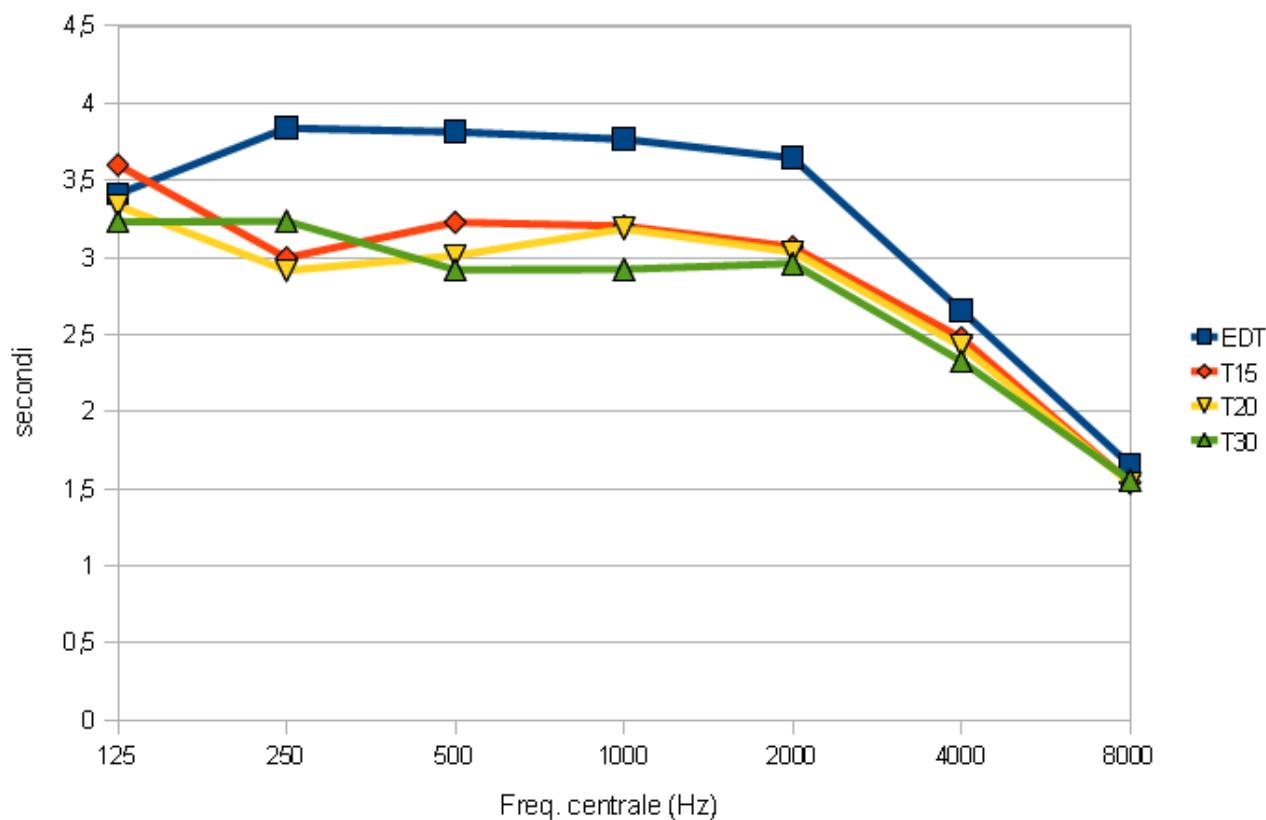
| Freq, [Hz] | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | Lin |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| G [dB] | - | 14.1 | 12.4 | 12.4 | 12.7 | 12.7 | 11.1 | - | 12.1 |
| C80 [dB] | -0,02 | -2,07 | -1,19 | -2,96 | -2,02 | -2,85 | -4,07 | -0,84 | 1,06 |
| D50 [%] | 33,37 | 31,18 | 28,52 | 22,63 | 27,98 | 24,62 | 17,86 | 25,89 | 37,96 |
| ts [ms] | 155,24 | 179,61 | 159,99 | 207,62 | 180,74 | 180,57 | 187,26 | 135,57 | 106,3 |
| EDT [s] | 1,72 | 2,06 | 1,97 | 2,84 | 2,4 | 2,32 | 2,49 | 1,75 | 1,42 |
| T15 [s] | 2,15 | 2,01 | 2,7 | 2,52 | 2,56 | 2,72 | 2,44 | 1,91 | 1,82 |
| T20 [s] | 2,21 | 2,25 | 2,65 | 2,45 | 2,66 | 2,77 | 2,47 | 1,94 | 1,9 |
| T30 [s] | 2,30 | 2,52 | 2,62 | 2,49 | 2,77 | 2,79 | 2,53 | 2 | 2,06 |
| IACC (Early) | 0,97 | 0,84 | 0,6 | 0,13 | 0,3 | 0,21 | 0,08 | 0,11 | 0,08 |



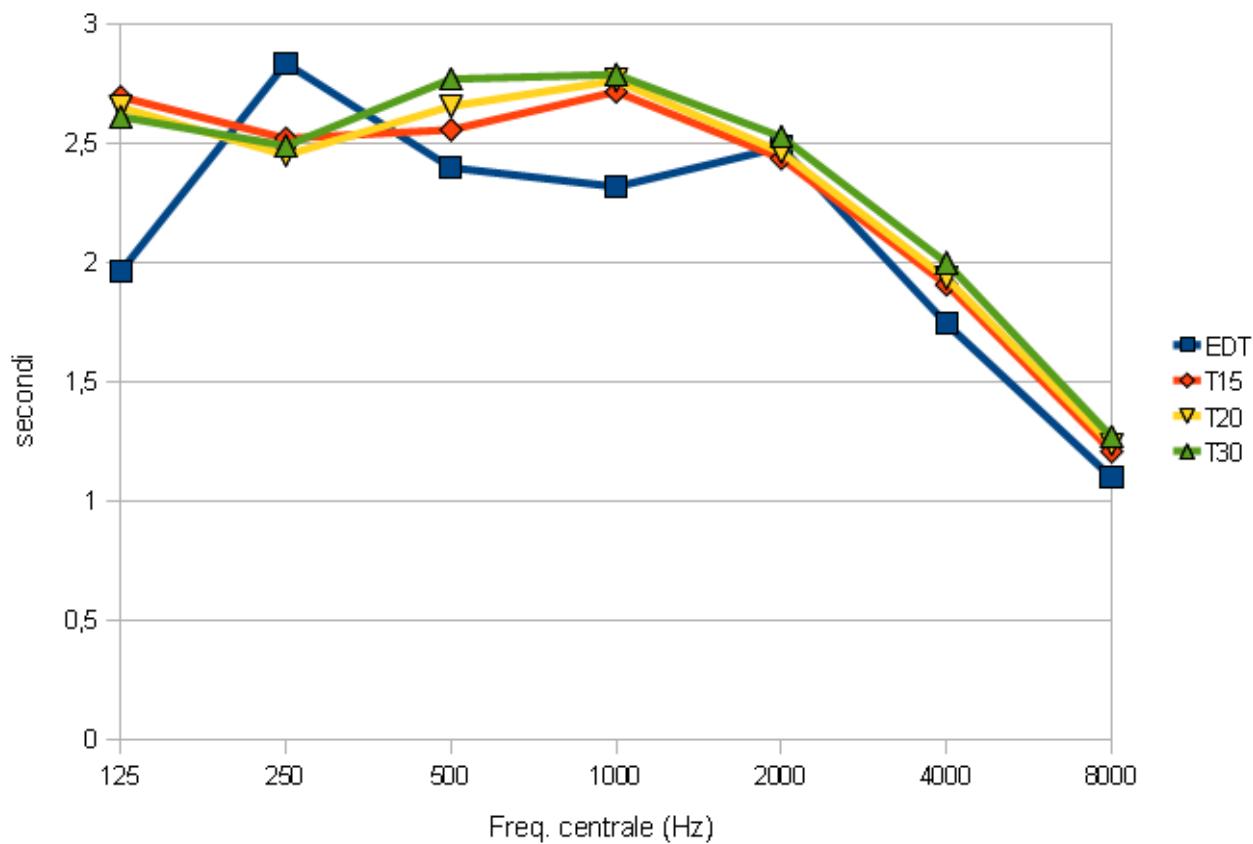
Tempo di riverberazione A1



Tempo di riverberazione C1



Tempi di riverberazione C2



Commento

In ambedue le sale il tempo di riverberazione alle medie frequenze si attesta sui 2 secondi, valore tipico di sale da concerto di grandi dimensioni. Nel caso specifico il risultato è dovuto essenzialmente all'assenza di poltrone e di pubblico e, di conseguenza, al ridotto assorbimento del suono, riconducibile per intero alle pareti, alle strutture architettoniche secondarie e agli effetti di attrito viscoso dell'aria. Significativo è tuttavia il diverso comportamento mostrato dalla riverberazione iniziale nei due ambienti: nell'auditorio si rileva infatti una maggiore discrepanza tra l'indice EDT ed i tempi di riverberazione successiva T15, T20 e T30. È ipotizzabile l'esistenza di un accoppiamento acustico con l'adiacente salone di ingresso in grado di determinare un lieve prolungamento della coda riverberante rispetto alla velocità di decadimento nei primi istanti.

L'indice di rafforzamento del suono G valutato alle medie frequenze è dell'ordine di 10-12 dB nelle configurazioni A1, B1 e C2, ossia quando sorgente e ricevitore sono posti nel medesimo volume. Tale valore è comparabile con quello tipicamente riscontrato delle sale per musica da camera di medie dimensioni ($< 5000 \text{ m}^3$) e denota un grado di amplificazione del suono molto maggiore rispetto alle prestazioni ottimali delle sale da concerto ($G \geq 4-5 \text{ dB}$).¹

Ulteriori informazioni significative per la comprensione del comportamento acustico delle sale possono essere dedotte dall'esame degli indici di bilanciamento, correlati con le impressioni soggettive di chiarezza e definizione, ossia C80, D50 e ts. Ponendo in particolare l'attenzione sull'indice C80 si ricavano, alle medie frequenze, valori da -4 a -2 dB, rappresentativi di una chiarezza del suono musicale ai limiti dell'intervallo di gradevolezza generalmente accettato per le sale tradizionali (da -2 a $+2$ dB circa).

In sintesi si può affermare che le due sale tendono singolarmente ad esaltare attributi quali il volume del suono, la vivezza, l'impasto e la pienezza tonale a spese della chiarezza del fraseggio musicale.

La particolare struttura architettonica degli spazi permette un loro utilizzo "combinato" grazie alla presenza della apertura ottagonale praticata nel piano di calpestio della sala superiore. Si tratta di una caratteristica assai significativa in quanto è lecito supporre che tale elemento sia stato realizzato proprio per consentire la diffusione del suono da un ambiente all'altro in relazione a particolari esigenze rappresentative o ceremoniali all'interno della villa. Per quanto riguarda il comportamento riscontrabile con la sorgente nel piano superiore (punto C) e il ricevitore in quello inferiore (punto 1) possono essere fatte le seguenti considerazioni:

1. Diminuzione di livello di ascolto di circa 13 dB ($G_{\text{mid}} \geq -2 \text{ dB}$);
2. Chiarezza ridotta ($C_{80,\text{mid}} \geq -10 \text{ dB}$, $D_{50,\text{mid}} \geq 4 \%$)
3. Riverberazione dell'ordine di 3.8 secondi con $\text{EDT} > T_{15}, T_{20}, T_{30}$;

I parametri evidenziano una condizione di ascolto di campo diffuso fin di primi istanti della componente transitoria di un evento impulsivo, caratterizzato inoltre da una scarsa identificabilità della direzione di arrivo del suono, basso livello di ascolto ed elevata riverberazione. L'ascoltatore presente nell'auditorio percepisce con elevato senso di inviluppo il suono proveniente dal piano superiore, la cui pienezza viene ulteriormente esaltata dall'incremento di riverberazione originato dall'accoppiamento tra i due ambienti.

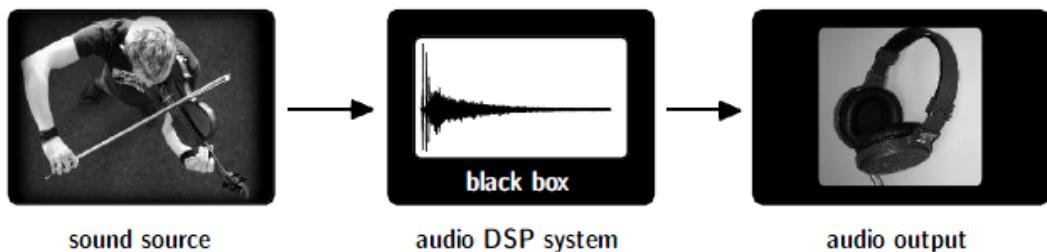
¹ Tale comportamento si spiega con la seguente relazione tra indice G e tempo di riverberazione, che esprime la conservazione dell'energia in un campo perfettamente diffuso:

$$G \geq 45 + 10 \log \left(\frac{\text{EDT}}{V} \right).$$

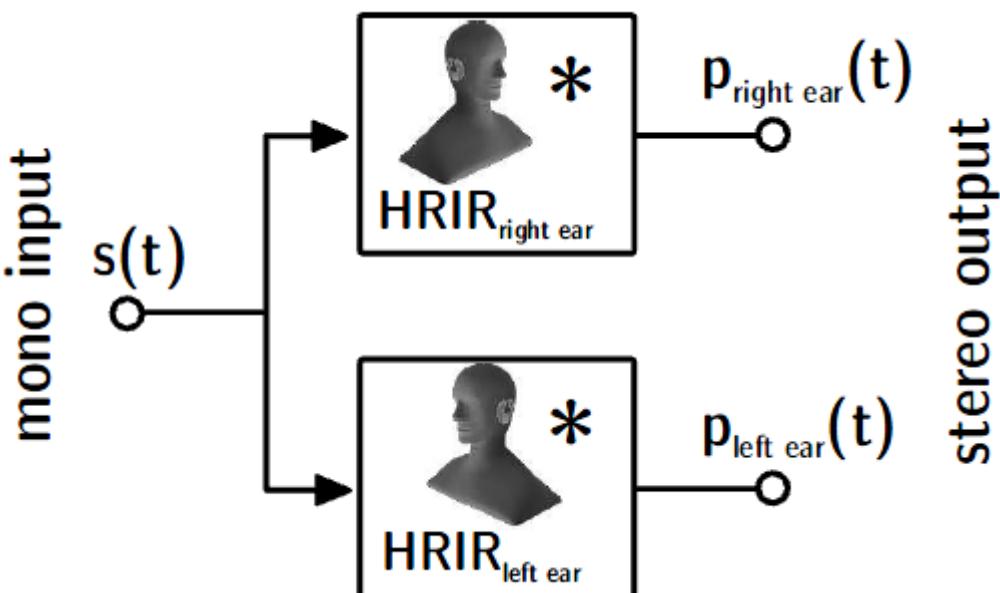
A parità di tempo di riverberazione, l'indice G aumenta in maniera logaritmica con la riduzione del volume della sala (ad es. un raddoppio del volume determina un aumento di 3 dB nell'indice di amplificazione).

Prove di ascolto virtuale

Al fine di rendere percepibili le valutazioni oggettive individuate attraverso l'analisi degli indicatori acustici è stata eseguita una serie di prove per la ricostruzione di campi acustici virtuali all'interno dell'edificio avvalendosi per questo della tecnica di auralizzazione. Il procedimento consiste in tre fasi principali (si veda la figura seguente): 1) nella registrazione di tracce audio in camera anecoica (tipicamente esempi musicali), 2) nella "convoluzione"² di tali tracce audio con le risposte all'impulso misurate sperimentalmente, 3) nella riproduzione attraverso altoparlanti secondo un determinato protocollo di decodifica.



Rappresentazione schematica del procedimento di convoluzione.



Schema del processo di convoluzione binaurale.

Nel caso in oggetto la tecnica impiegata è quella della registrazione/riproduzione di tipo binaurale, consistente nella ricostruzione dei segnali corrispondenti alla posizione delle orecchie dell'ascoltatore. Le risposte all'impulso impiegate sono state le stesse della fase di analisi (vedi sezione precedente) mentre come tracce anecoiche sono stati utilizzati due brani di John Dowland eseguiti rispettivamente al liuto e alla chitarra dal M° Francesco Rizzoli nella camera anecoica del Laboratorio di Acustica Musicale e Architettonica della Scuola di San Giorgio (registrazione eseguita nel mese di giugno dell'anno 2005). I brani ottenuti come risultato della convoluzione vengono presentati nel compact disc allegato al presente lavoro; Essi permettono se ascoltati in cuffia di apprezzare le differenze di parametri quali il livello sonoro, la riverberazione e la spazialità che caratterizzano i diversi punti di ascolto.

² Con il termine *convoluzione* si indica il procedimento matematico con cui il segnale prodotto dalla sorgente sonora viene “unito” all’informazione acustica contenuta nella risposta all’impulso, che a sua volta esprime, per ciascun canale nel quale è codificato il campo (es. mono, binaurale, multicanale), la trasformazione del suono per effetto della sua propagazione tra due posizioni in un ambiente.



Il maestro F. Rizzoli durante la sessione di registrazione presso la camera anechoica della Scuola di San Giorgio