

Marco Marinoni

ACUSTICA E PSICOACUSTICA MUSICALE

Lezione 9. Misure acustiche nei teatri e nelle sale

- 9.1 Introduzione
- 9.2 Evoluzione delle tecniche di misura
- 9.3 Sistema lineare tempo invariante?
- 9.4 La risposta all'impulso
- 9.5 Tecniche di misura del tempo di riverberazione
- 9.6 Tecniche di misura della risposta all'impulso
- 9.7 Case study

Indice

1. Introduzione
2. Evoluzione delle tecniche di misura
3. Sistema lineare tempo invariante?
4. La risposta all'impulso
 1. Binaurale
 2. B-format
 1. Il microfono "Soundfield"
 3. Array di microfoni
5. Tecniche di misura del tempo di riverberazione
6. Tecniche di misura della risposta all'impulso
7. Case study

9.1 - introduzione

- Requisiti per ottenere una buona acustica in un auditorium:
 - Il suono deve essere sufficientemente forte
 - Le componenti contemporanee di un suono complesso devono mantenere un rapporto appropriato tra le loro intensità
 - I suoni successivi, nella loro rapida articolazione, sia che si tratti di parlato che di musica, devono essere chiari e distinti, liberi da sovrapposizioni reciproche e da suoni estranei
(W. Sabine, 1922)

9.1 - introduzione

- Un teatro può essere inteso come un “**sistema lineare tempo invariante**” caratterizzato quindi dalla sua **risposta all'impulso**
 - Due proprietà fondamentali dei sistemi dinamici lineari tempo invariante sono **la raggiungibilità e la osservabilità**. Se queste due proprietà sono verificate allora esiste sempre un controllore che rende il sistema di controllo asintoticamente stabile
 - » Un **sistema lineare tempo invariante è raggiungibile** quando tutti i suoi stati sono raggiungibili
 - » Un sistema si dice **completamente osservabile** se e solo se ogni stato non nullo da luogo ad un'*uscita libera* non identicamente nulla

9.2 – evoluzione delle tecniche di misura

- Ai tempi di Sabine per misurare l'acustica di un teatro si usavano segnali interrotti di organo (**suoni stazionari interrotti**), si calcolava il **tempo di riverberazione T_{60}** estrapolando l'intervallo di decadimento del segnale emesso (rumore rosa)
 - Questo metodo viene ancora utilizzato per calcolare il T_{60} : nel punto di misura si collega un fonografo a un registratore grafico che restituisce **la curva di decadimento della pressione sonora misurata in quel punto**

9.2 – evoluzione delle tecniche di misura

- Successivamente: descrittori acustici in grado di analizzare il comportamento in frequenza della sala (la distribuzione dell'energia [*strength*] sonora tra i vari punti della platea)
 - Sorgente sonora di rumore stazionario (rosa) in corrispondenza della sorgente musicale
 - Fonometro collegato a registratore digitale
 - Andamento del livello sonoro
 - Risposta in frequenza nei vari punti di misura

9.3 – sistema lineare tempo invariante?

- Obiettivo delle misurazioni: **determinare quali saranno i parametri acustici percepiti dagli ascoltatori durante una normale performance**
- Necessario che durante le misurazioni l'oggetto osservato sia lo stesso delle performances
 - HP: **Sistema lineare tempo invariante**
- SLTI: presi due segnali di ingresso separati e determinati i loro corrispondenti segnali di uscita, qualunque combinazione lineare dei segnali di ingresso produrrà la somma dei segnali di uscita

9.3 – sistema lineare tempo invariante?

- Il **sistema fisico** potrà essere considerato tempo-invariante qualora esso non si modifichi in alcun modo al passare del tempo (ovvero per tutto il periodo di analisi)
- si definisce **sistema acustico** o **spazio acustico-musicale** l'insieme delle componenti fisiche che delimitano l'ambiente nel quale si svolge l'attività che è oggetto di studio
 - L'architettura dello spazio
 - Le caratteristiche termoigrometriche dell'ambiente
 - Temperatura dell'aria, gradiente termico, velocità dell'aria, umidità relativa
 - Gli strumenti musicali

9.3 – sistema lineare tempo invariante?

- Il **sistema elettronico** include tutto ciò che non costituisce il normale spazio acustico ma viene utilizzato esclusivamente per le misurazioni
 - **Microfoni**
 - **Sorgenti sonore**
 - **Trasduttori di potenza**
 - **Schede audio**
 - **Cavi di collegamento e interfacciamento**

9.3 – sistema lineare tempo invariante?

- **Sistema acustico + sistema elettronico = sistema elettroacustico**
- Nell'acustica dei teatri si assume l'ipotesi di perfetta linearità e di assoluta invariabilità del sistema
- La realtà fisica è differente
 - La propagazione acustica e le caratteristiche fluidodinamiche dell'aria interessata dalla propagazione della perturbazione sonora possono essere ritenute lineari
 - Non è invece ipotizzabile ritenere lineare il comportamento dei trasduttori
 - Sia la sorgente sonora che i microfoni possiedono un comportamento altamente non lineare, specie alle alte frequenze
 - Anche gli strumenti musicali hanno un comportamento non lineare

9.3 – sistema lineare tempo invariante?

- L'ipotesi di tempo invarianza richiederebbe la perfetta invarianza fisica dei suoi sistemi, sia durante le performances che durante le misurazioni
 - Il minimo spostamento (di strumentazione, di temperatura, di umidità, ecc.) all'interno dell'ambiente provoca al contrario una sua variazione nel tempo
- La misura dovrà essere in grado di **separare i contributi non lineari della strumentazione dalla risposta acustica dello spazio acustico-musicale**

9.4 – la risposta all'impulso

- Il contenuto informativo necessario e sufficiente per una completa caratterizzazione dell'acustica di una sala è racchiuso nella sua **risposta all'impulso**
- Nel caso degli **ambienti chiusi** si considera sistema (***black box***) il comportamento acustico esistente tra una sorgente teoricamente puntiforme e omnidirezionale e un particolare punto d'ascolto, anch'esso teoricamente puntiforme, collocati all'interno dell'ambiente

9.4 – la risposta all'impulso

- Ci sono ∞ sistemi lineari poiché esistono ∞^3 diverse possibilità di collocare la sorgente sonora e altrettante possibilità per il microfono.
- Supponendo **la sorgente e il microfono non omnidirezionali**, la loro orientazione aumenta esponenzialmente i gradi di libertà
 - La sorgente sonora genera un segnale $\mathbf{x}(t)$
 - La risposta all'impulso è $\mathbf{h}(t)$
 - Il segnale percepito dal ricevitore è $\mathbf{y}(t) = \mathbf{x}(t)*\mathbf{h}(t)$
 - Nel dominio della frequenza **il prodotto di convoluzione è dato dal prodotto degli spettri delle funzioni di partenza**

9.4 – la risposta all'impulso

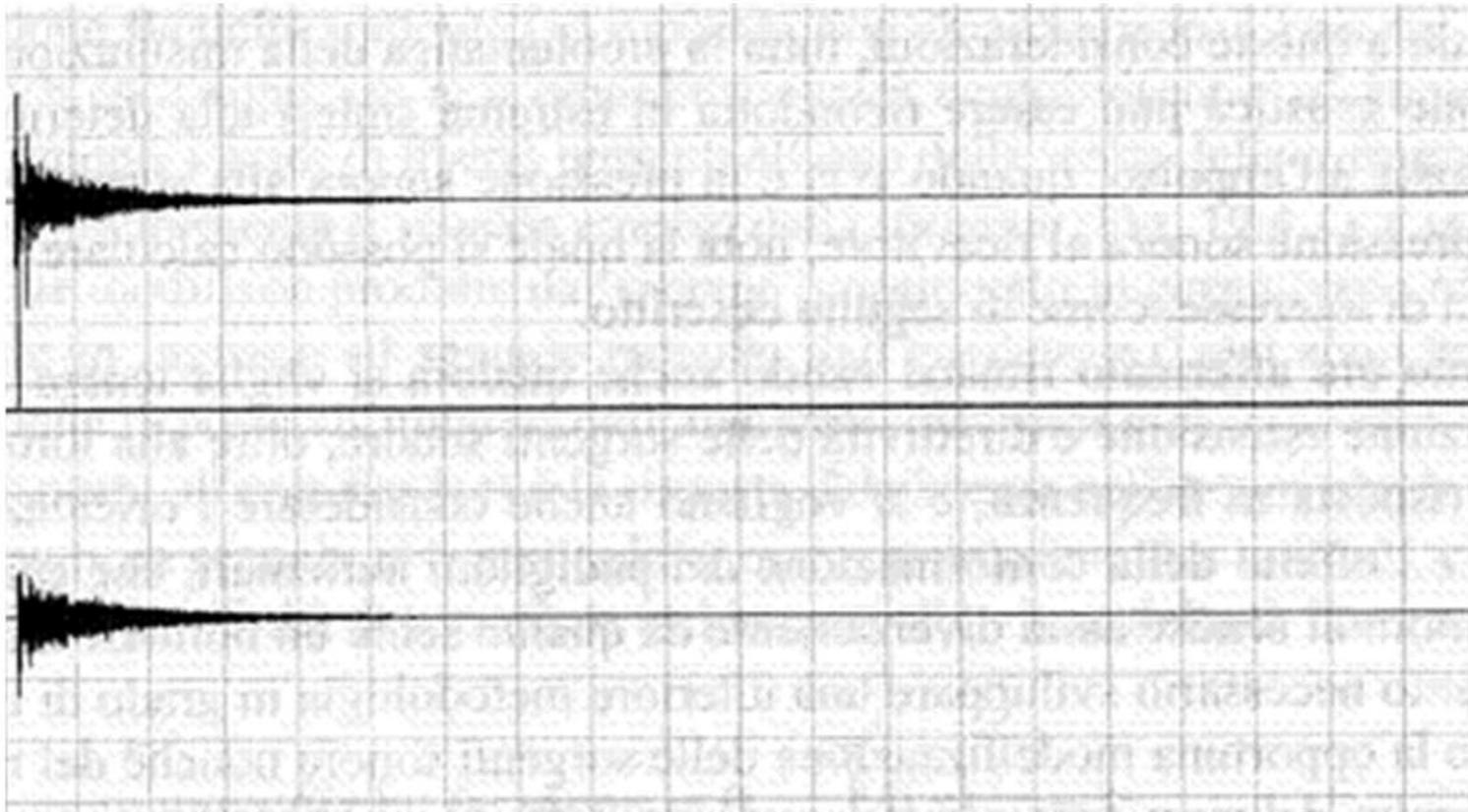
- Quando $x(t)$ è la pressione sonora alla sorgente, l'uscita $y(t)$ è la pressione sonora al ricevitore, nota la quale è possibile calcolare i parametri acustici di interesse.
- Questo modello è valido anche in caso di sorgenti e ricevitori direzionali, come le normali sorgenti acustiche degli strumenti musicali e i nostri padiglioni auricolari (molto diversi da un microfono)
 - È necessaria un metodologia che includa l'auralizzazione degli scenari progettuali

9.4.1 – la risposta all'impulso binaurale

- Un brano musicale viene percepito tramite le orecchie dell'ascoltatore
- La risposta all'impulso deve essere modificata con riferimento alla conformazione dell'apparato uditivo medio, attraverso le **funzioni di trasferimento relative alla testa (HRTF, Head-Related Transfer Function)**
 - Trasformano la risposta in frequenza del microfono omnidirezionale in una **coppia di microfoni binaurali**
 - Nelle misurazioni si ricorre a una testa artificiale (*dummy head*)

9.4.1 – la risposta all'impulso binaurale

- Risposta all'impulso binaurale sperimentale misurata nel Teatro 1763 di Villa Aldrovandi-Mazzacorati a Bologna



9.4.1 – la risposta all'impulso binaurale

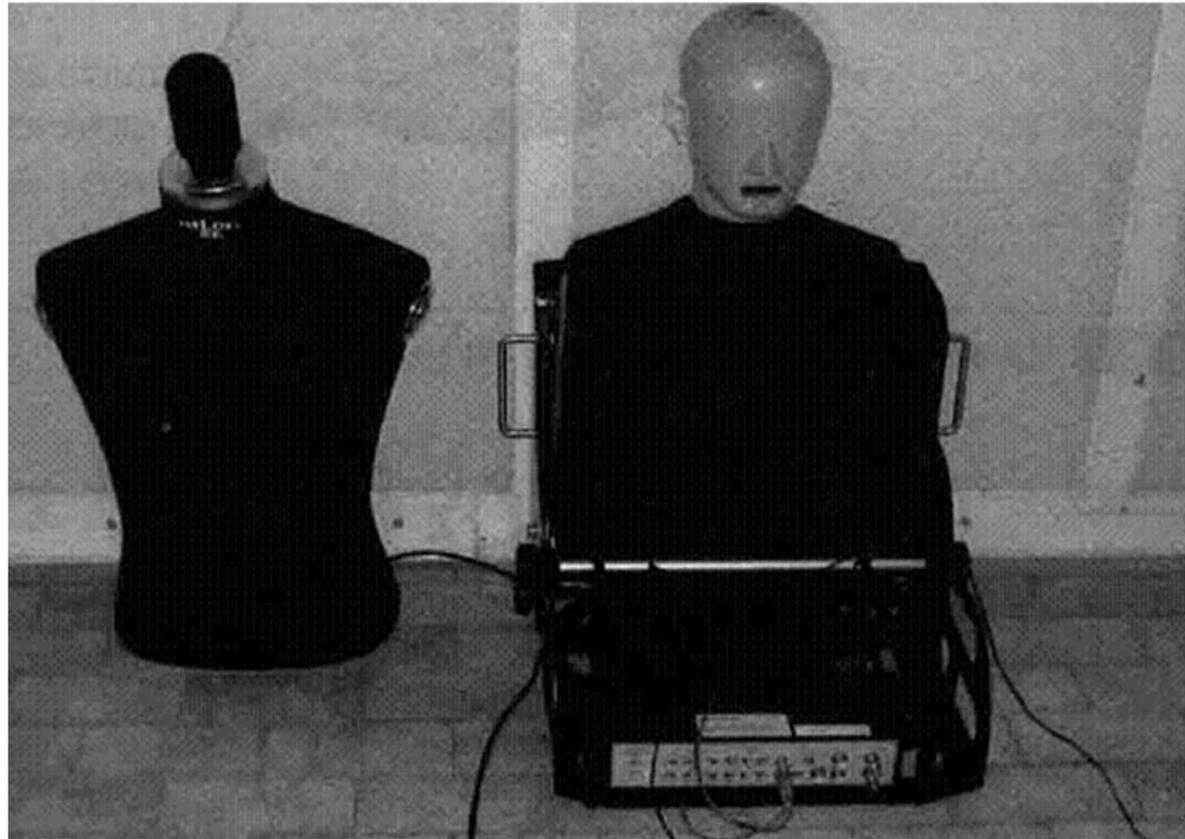
- Le misurazioni binaurali
 - sono oggi lo standard di riferimento internazionale per lo svolgimento delle misurazioni acustiche all'interno dei teatri
 - Hanno delle **limitazioni** in relazione alla possibilità di quantificare esattamente la spazializzazione del campo acustico nei teatri

9.4.2 – la risposta all’impulso “B-format”

- È uno sviluppo della risposta binaurale
 - Riunisce in sé le caratteristiche monoaurali e tridimensionali del campo acustico
- **Microfoni tridimensionali e teste artificiali**
- Utilizza un **sistema di registrazione a 4 canali** che implementa 4 microfoni cardioidi su supporto tetraedrico regolare (***A-format***)
 - Utilizzato per la prima volta dalla BBC, necessita una successiva decodifica dei segnali tramite opportune relazioni secondo la ***teoria Ambisonics***

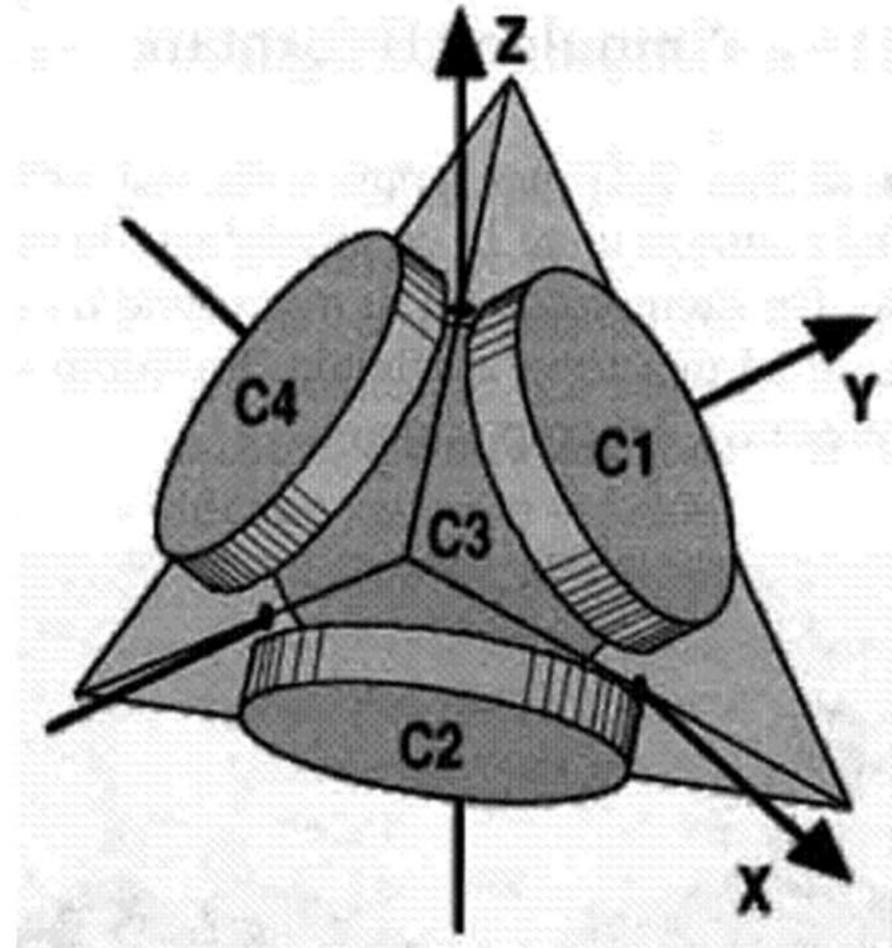
9.4.2 – la risposta all’impulso “B-format”

- Testa artificiale (destra) e microfono tridimensionale (sinistra) montati su dei torsi che sintetizzano la presenza del corpo umano



9.4.2 – la risposta all'impulso “B-format”

- Le quattro capsule dell’*“A-format”* del Sistema Ambisonics

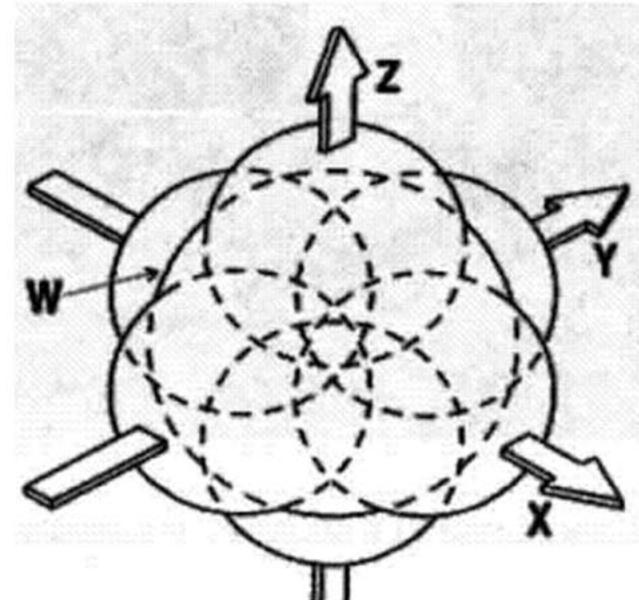


9.4.2 – la risposta all’impulso “B-format”

- I segnali in ingresso nelle 4 capsule del sistema “**A-format**” possono essere elaborati secondo semplici relazioni ottenendo una serie di segnali virtualmente provenienti da altre direzioni, chiamati “**B-format**”

9.4.2 – la risposta all'impulso “B-format”

- **Sopra:** gli armonici sferici e gli assi del sistema “B-format”
- **Sotto:** le relazioni tipiche del “B-format”
 - **W:** segnale omnidirezionale
 - **X, Y Z:** tre virtuali microfoni cardioide orientati secondo una terna cartesiana
 - **X** punta avanti
 - **Y** punta verso sinistra
 - **Z** punta verso l'alto



$$C1 + C2 + C3 + C4 = W,$$

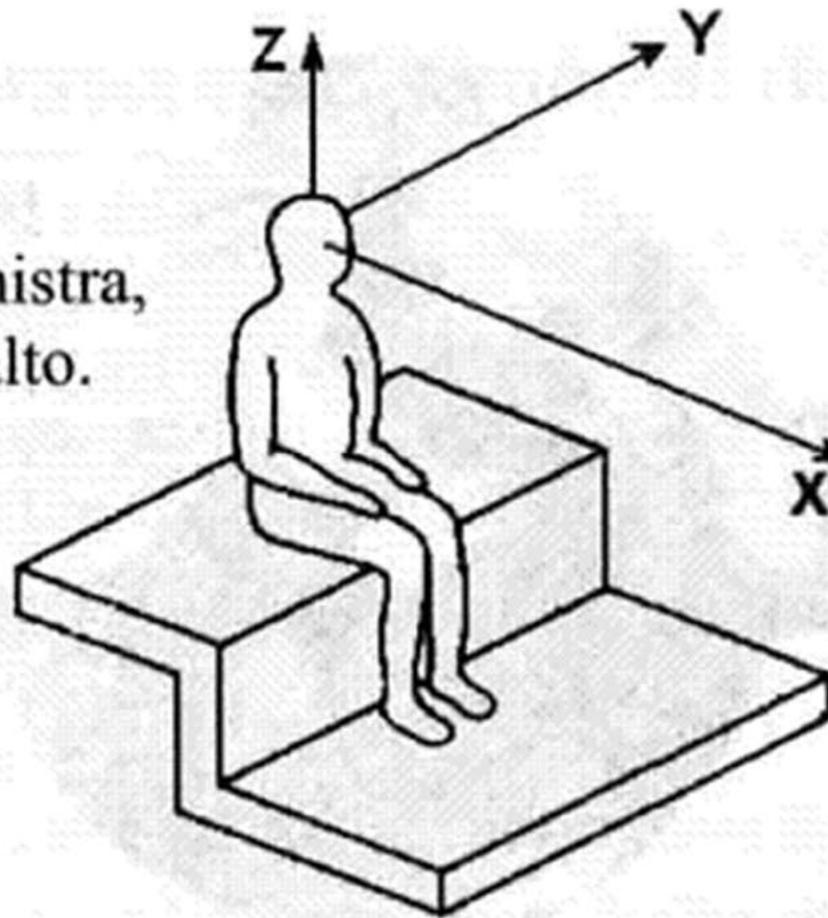
$$C1 + C2 - C3 - C4 = X,$$

$$C1 - C2 + C3 - C4 = Y,$$

$$C1 - C2 - C3 + C4 = Z.$$

9.4.2 – la risposta all’impulso “B-format”

- ❑ X , punta avanti,
- ❑ Y , punta verso sinistra,
- ❑ Z , punta verso l’alto.



9.4.2.1 – il microfono “Soundfield”

- Le misurazioni di risposta all’impulso ***B-format***, in grado di determinare le caratteristiche tridimensionali del campo acustico, possono essere effettuate solo con un microfono ***A-format***, ovvero con un **microfono Soundfield**, sviluppato negli anni 70 dalle ricerche di **Gerzon e Craven**
 - Quattro capsule sub-cardioide o cardioide disposte come se fossero i lati di un tetraedro regolare
 - Uscita a 4 canali in *A-format*

9.4.2.1 – il microfono “Soundfield”

- **Soundfield MK V:** primo prototipo di microfono tridimensionale utilizzato in acustica architettonica
- Il segnale *A-format* è inviato a un'unità di preamplificazione quindi viene convertito in *B-format* e corretto nelle sue irregolarità di frequenza



9.4.2.1 – il microfono “Soundfield”

- Il segnale B-format può essere modificato nei suoi parametri
 - **Azimuth**
 - **Elevation**
 - **Dominance**
- In questo modo si ottengono complete rotazioni virtuali del microfono in orizzontale (assi **X** e **Y**), nel piano meridiano (assi **X** e **Z**) e nel fronte sonoro (distorsione frontale o posteriore)
- È possibile inoltre calcolare la *frazione laterale* (**LF**)

9.4.2.1 – il microfono “Soundfield”

- Il Soundfield fu commercializzato come strumento di registrazione tridimensionale di performance musicali prodotte dalla BBC, tuttavia esistono altri sistemi analoghi, per cui oggi è più corretto parlare del **Soundfield come tipo di tecnica di registrazione**

9.4.3 – array di microfoni

- Per ottenere un'analisi ancora più dettagliata della distribuzione spaziale del suono è possibile effettuare **misurazioni di risposte all'impulso da 16 a 64 canali utilizzando array di microfoni disposti in configurazioni geometriche:**
 - Lungo i due rami di una croce
 - Ad anello
 - Sulla superficie di una sfera
 - Distribuiti casualmente all'interno di un volume sferico

9.4.3 – array di microfoni

- Si usano **microfoni ad alta direttività**, in grado di separare i fronti d'onda provenienti dalle diverse direzioni
- **Virtual array**: se non si dispone di un array fisico, è possibile ricostruire la stessa informazione muovendo anche un solo microfono in una serie di posizioni mediante un dispositivo di posizionamento sequenziale automatico (es. una tavola rotante)

9.5 – Tecniche di misura del tempo di riverberazione

- Decadimento del rumore stazionario interrotto
 - Primo metodo utilizzato storicamente: interruzione di una sorgente sonora in condizioni di regime stazionario (**Sabine**)
- Tempo di riverberazione: tempo che intercorre dallo spegnimento di una sorgente sonora stazionaria in condizioni di regime fino a ottenere un decadimento dell'energia sonora presente nell'ambiente pari a 60 dB
 - Quando è presente un rumore di fondo troppo elevato si procede all'estrapolazione della prima parte della curva di decadimento

9.5 – Tecniche di misura del tempo di riverberazione

- L'intervallo della curva di decadimento comunemente impiegato è compreso tra -5 e -35 dB sotto il livello di regime, tralasciando i primi 5dB in cui si concentrano anomalie nel decadimento
 - T_{30}
- T_{10} , T_{20} : intervalli di 10 e 20 dB
- **Early Decay Time (EDT)**: il decadimento è compreso tra 0 -10 dB

9.5 – Tecniche di misura del tempo di riverberazione

- Il comportamento della curva nei vari intervalli di rilevazione varia → impiego di **diverse formulazioni del tempo di riverberazione, correlate alle varie fasi del decadimento sonoro**
- Misurazione: mediante fonometro (misuratore di livello sonoro istante per istante) collegato a un registratore scrivente che fornisca il tracciato su carta
 - Il valore del tempo di riverberazione si ottiene dalla pendenza della linea di decadimento

9.5 – Tecniche di misura del tempo di riverberazione

- Analizzatori di spettro in tempo reale
 - In alternativa al fonometro
 - Acquisizione di un **multispettro**: una serie di spettri acquisiti a intervalli di tempo regolari molto brevi, fissati secondo una costante lineare in base alla lunghezza della misura che si vuole effettuare

9.5 – Tecniche di misura del tempo di riverberazione

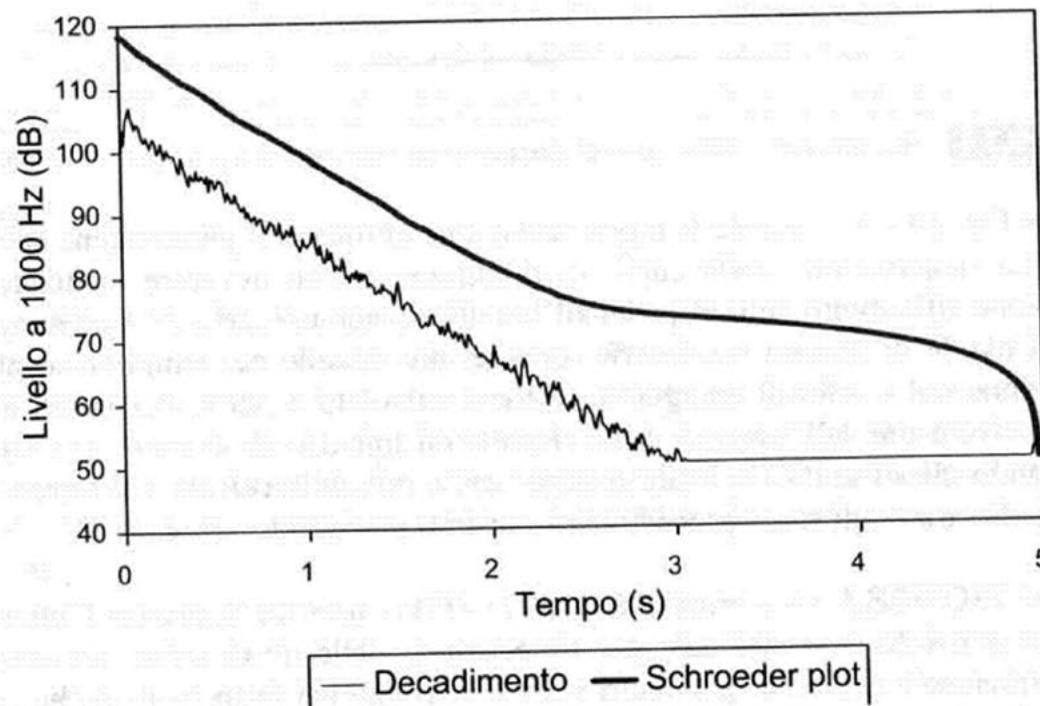
- **Tecniche impulsive**
 - In alternativa al campo sonoro stazionario e diffuso di Sabine
 - Sorgente sonora di tipo impulsivo (colpo di rivoltella, scoppio di palloncino, impulso inviato da un altoparlante)
- Si misura un **ecogramma sperimentale** (versione semplificata della risposta all'impulso)
 - Viene ricostruita (*integrazione di Schroeder*) la curva di decadimento che sarebbe stata prodotta da una sorgente in funzionamento continuo
 - **Il decadimento del rumore contiene delle fluttuazioni casuali dovute alla storia casuale del segnale immediatamente precedente allo spegnimento della sorgente**

9.5 – Tecniche di misura del tempo di riverberazione

- **NORMA ISO 3382 (1997)**
 - Descrive le tecniche utilizzabili e i parametri acustici da determinare
 - Molti limiti
- Applicabile per quanto riguarda la misurazione del tempo di riverberazione
 - Prevede che la misura venga effettuata mediante **integrazione all'indietro di Schroeder** quando il segnale di eccitazione è di tipo impulsivo o pseudo-impulsivo
 - In caso di **decadimento esponenziale** i risultati sono confrontabili con quelli ottenuti mediante tecnica classica
 - In caso di **decadimento non esponenziale** si riscontrano differenze tra i due metodi

9.5 – Tecniche di misura del tempo di riverberazione

- Esempio di curva di decadimento da rumore impulsivo e relativo integrale di Schroeder
 - La curva integrata cambia verso la fine perché viene incluso anche il rumore di fondo non causato dall'impulso

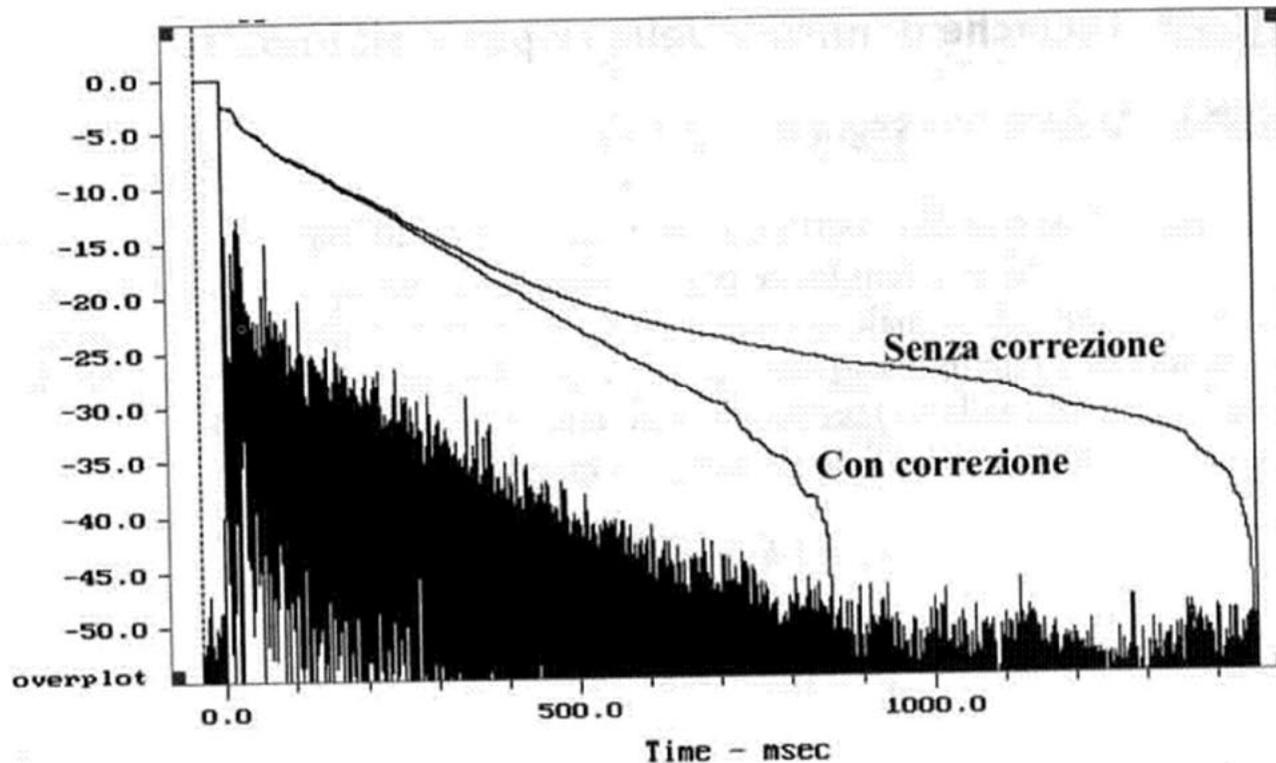


9.5 – Tecniche di misura del tempo di riverberazione

- La curva riportata in [slide 36] si riferisce a **un ambiente perfettamente diffuso (*Sabiniano*)** e la doppia pendenza è un artefatto prodotto dall'integrazione di Schroeder
 - Il valore corretto si ottiene estrapolando la pendenza del primo tratto di curva
- La NORMA ISO 3382 parla di “andamento orizzontale” per il rumore di fondo integrato, in realtà è una curva ad andamento lineare ma con una sua pendenza

9.5 – Tecniche di misura del tempo di riverberazione

- L'effetto della correzione dell'integrazione della risposta all'impulso dovuta all'eliminazione del rumore di fondo mostra un **decadimento perfettamente lineare fino a oltre 30 dB al di sotto del livello stazionario di potenza**



9.5 – Tecniche di misura del tempo di riverberazione

- **Medie sincrone**
 - Una possibilità di incrementare il rapporto segnale/rumore (→ l'estensione del decadimento rilevato) è operare una **media sincrona su più ripetizioni del segnale di prova**
- Questo metodo richiede la **perfetta stabile invarianza del sistema elettroacustico**
 - Difficile: la strumentazione varia le proprie caratteristiche nel tempo
 - Se le fasi ruotano parte del segnale viene cancellato (soprattutto nella porzione caudale, dato che **la rotazione di fase cresce con il tempo di volo del suono**)

9.6 – Tecniche di misura della risposta all'impulso

- **Misura con segnale impulsivo**
 - La tecnica di misura dei coefficienti della risposta all'impulso utilizza una convoluzione tra la risposta ideale della **funzione delta di Dirac (1-0-0-0-0-ecc.)** e la risposta reale
 - Il problema è che né l'altoparlante né la rivoltella sono in grado di produrre una sorgente sonora di almeno 60 dB superiore al rumore di fondo che duri **un solo periodo di campionamento**
 - In genere durano qualche decina di periodi

9.6 – Tecniche di misura della risposta all'impulso

- **The reversal mirror**
 - Per risolvere il problema si può convolvere il segnale di risposta dell'ambiente con se stesso rovesciato sull'asse dei tempi, in modo che l'ultimo campione diventi il primo
 - Se lo spettro del segnale impulsivo di eccitazione fosse realmente piatto si otterrebbe il risultato ideale derivante dall'uso di una vera delta di Dirac
 - Poiché lo spettro dell'impulso è irregolare, la risposta è artefatta

9.7 – Case study

- **L'ACUSTICA DELLE SALE DA CONCERTO E PER LA FRUIZIONE DEL PARLATO**

- Autore: *Paolo Galaverna*

- Estratto dalla rivista "Backstage" n. 22, Dicembre 1999

9.7 – Case study

- **Obiettivo**

- una sala polivalente, in grado cioè di poter ospitare concerti di piccole formazioni musicali, così come convegni con videoproiezioni
 - Tale polivalenza si è potuta realizzare tramite un'accurata scelta dei materiali, dei rivestimenti ed altri accorgimenti che incidono **in parte sul tempo di riverbero ma in modo più pesante sul reindirizzamento del campo sonoro.**

- **Parametri introdotti**

- la **geometria della sala**, mediante un programma di CAD tridimensionale (Ramsete CAD), e si sono svolte tutte le elaborazioni necessarie per comprenderne il comportamento dal punto di vista acustico.

9.7 – Case study

- **Descrittori acustici oggettivi**
 - Esigenza di avere a disposizione **parametri di qualità del campo sonoro** in un ambiente chiuso che fossero
 - misurabili sperimentalmente
 - Riconosciuti
 - utilizzati in modo diffuso
 - correlabili a sensazioni uditive non direttamente esprimibili come risultato di una misura strumentale.

9.7 – Case study

- **Descrittori acustici oggettivi**
 - Dalla prima definizione di tempo di riverbero di Sabine, fino alle recenti teorie di Ando ed alle ultime tecniche di registrazione e misurazione binaurale e in B-Format, tali parametri si sono moltiplicati, fino a far nascere il bisogno di un riordino sistematico.
 - Utilizzeremo solo alcuni dei principali.

9.7 – Case study

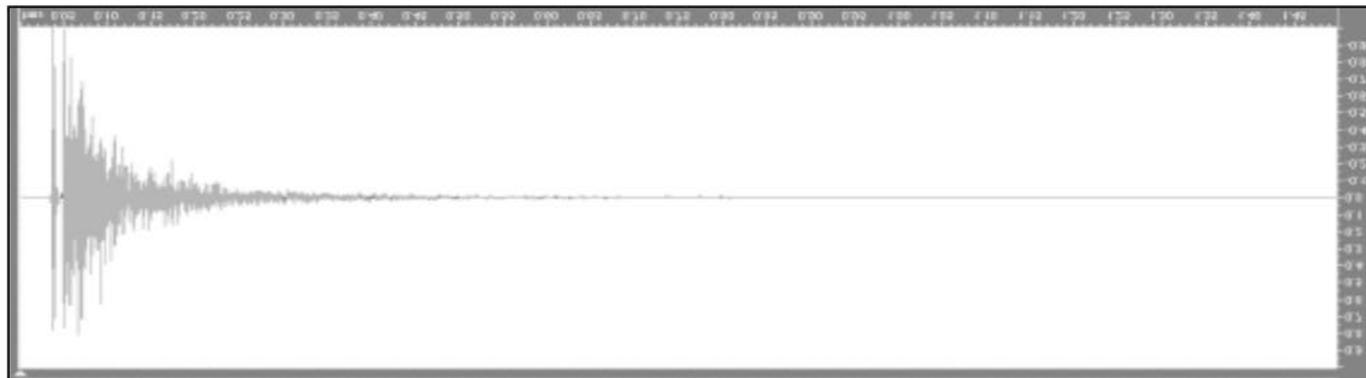
- **Misure dello stato di fatto**
 - la **sala al grezzo** con strumentazione:
 - pistola a salve calibro 38
 - DAT Sony TCD 8
 - microfono AKG
 - cuffia Bang & Olufsen Form 1
 - computer Pentium Pro 200.
 - Le misure sono state effettuate esplodendo **colpi a salve da due posizioni**, S1 ed S2, rispettivamente nella posizione del diffusore del canale centrale e del canale destro.

9.7 – Case study

- **Misure dello stato di fatto**
 - Al momento delle misure era presente **un ponteggio quasi del tutto ininfluenza** dal punto di vista acustico (a parte per la postazione 6); tutte le superfici della sala erano completate dal punto di vista geometrico ma al grezzo come grado di finitura, **le porte non erano ancora state installate**.
 - **Poiché la struttura del teatro è perfettamente simmetrica, si è preferito concentrare le misure in una delle due metà (quella destra).**
 - 5 misure con la sorgente S1
 - 4 misure con la sorgente S2
 - Colpi di pistola registrati su DAT e, dopo essere stati riversati tramite scheda audio su computer, analizzati al fine di estrarne le informazioni utili alla scelta dell'impianto audio e dei materiali.

9.7 – Case study

- Dalla risposta all'impulso di un ambiente si possono calcolare tutti i parametri acustici oggettivi e dal suo andamento nel tempo si possono evidenziare eventuali anomalie come echi ecc...
 - Nella figura è riportato uno dei diagrammi delle risposte all'impulso misurate.

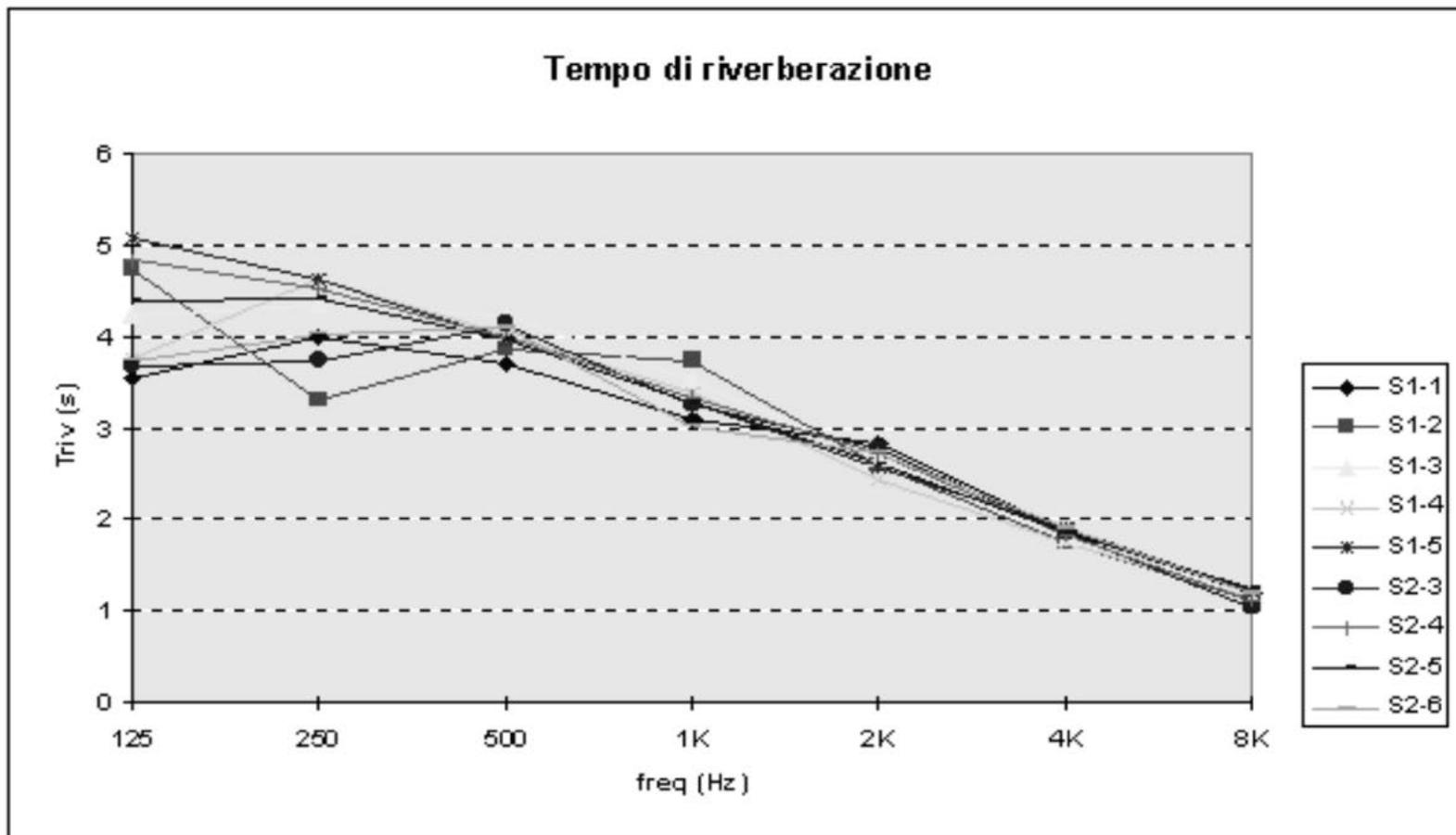


9.7 – Case study

- Dall'analisi delle risposte all'impulso si può notare la presenza di vari **echi** dovuti sia alla forma eccessivamente regolare e quadrata della sala sia al fatto che presentava superfici di tipo riflettente.
 - **Gli echi andranno eliminati** per aumentare sia la chiarezza del parlato sia la piacevolezza della musica.
- Sono poi stati calcolati i **tempi di riverberazione per bande d'ottava** nei vari punti della sala

9.7 – Case study

- Tempi di riverberazione per bande d'ottava nei vari punti della sala



9.7 – Case study

- **Interpretazione del dato sperimentale:**
 - i valori dei tempi di riverbero sono eccessivamente elevati per l'utilizzo sia della sala sia come cinema sia come teatro, mentre è normale l'andamento decrescente con l'aumentare della frequenza ed apprezzabile l'omogeneità dei risultati in ogni punto di misura.

9.7 – Case study

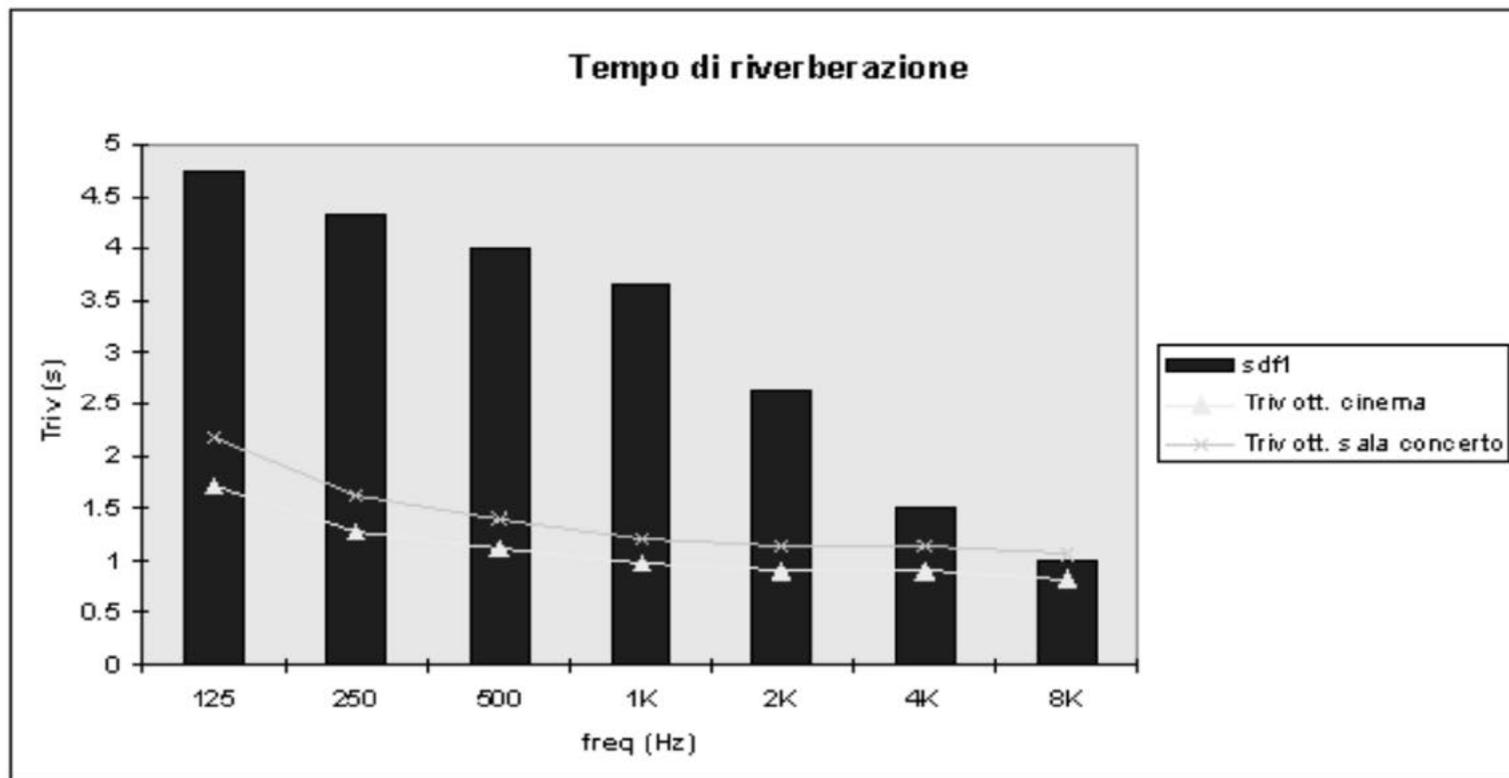
- **Studio previsionale del campo acustico all'interno della sala**
 - Per prima cosa si è studiato il problema da un punto di vista strettamente geometrico, analizzando la forma della sala.
 - La caratteristica più dannosa, dal punto di vista acustico, è senza dubbio rappresentata dalla **forma quadrata e dalle due pareti laterali fra loro parallele e lisce**.
 - Solitamente è preferibile che siano un po' mosse, o comunque non parallele, onde evitare dannosi echi o risonanze (la cui presenza, d'altronde, si può verificare dalle risposte all'impulso precedentemente riportate).
 - In questo caso si propone l'utilizzo di rivestimenti con caratteristiche diffondenti.

9.7 – Case study

- Per indagare la situazione iniziale si è inserita la geometria considerando la sala spoglia, cioè con le pareti ed il pavimento di cemento;
 - dall'elaborazione con Ramsete si è ottenuta una **risposta all'impulso simulata** molto simile a quella sperimentale.
- Dalle risposte all'impulso sono stati calcolati i seguenti valori del **tempo di riverberazione T20** riportati in figura [slide 54], corrispondenti a quelli misurati sperimentalmente.

9.7 – Case study

- **Tempi di riverbero simulati nella postazione 1 (sorgente S1,platea), confrontati con quelli massimi ammissibili**



9.7 – Case study

- **Progettazione acustica della sala: scelta dei materiali**
 - La scelta di massima delle caratteristiche acustico-estetiche dei materiali per il rivestimento della sala è stata operata in **collaborazione** con
 - la committenza
 - gli architetti autori del progetto
 - i progettisti dell'impiantistica
 - l'installatore audio/video
 - l'architetto dello studio realizzatore.
 - Di seguito vengono descritti le caratteristiche e i materiali prescelti:

9.7 – Case study

- **controsoffitto:**

- a cassettoni: pur non presentando la forma convessa ideale per auditorium e teatri, risulta comunque essere mossa e questo evita antipatiche e dannose riflessioni speculari.

- È stato consigliato un materiale moderatamente fonoassorbente, sovrapposto da pannelli di lana di roccia con densità 50/60 kg/m² e spessore 5 cm.
- Particolarmente importante è stata la posa in opera, ottenuta mediante pendinatura con ganci antivibranti di opportuno coefficiente di elasticità per non creare fessurazioni o attriti che potrebbero mettere in vibrazione la struttura.

9.7 – Case study

- **pareti laterali:**
 - dalle simulazioni previsionali effettuate è scaturito che la scelta migliore sarebbe stata un materiale mediamente assorbente, anche alle basse frequenze, per la **parte superiore** ed un materiale con caratteristiche diffondenti per la **parte inferiore**.
 - **Parte superiore:** pannelli di Eraclit Travertino con spessore 2.5 cm montato a ridosso di pannelli di lana di roccia con densità 50/60 kg/m² e spessore 5 cm, lasciando un'intercapedine fra quest'ultima ed il muro.
 - **Parte inferiore:** pannelli diffondenti appositamente studiati denominati K3, realizzati in massello di mogano.
 - senza abbassare ulteriormente il tempo di riverberazione, consentiranno di evitare echi o riflessioni dannose; il **montaggio con lana di roccia ed intercapedine d'aria** ha consentito di assorbire le basse frequenze in eccesso.

9.7 – Case study

- **parete di fondo:**

- deve avere caratteristiche di forte assorbimento e in parte di diffusione;
 - la parte bassa della parete è stata realizzata con blocchi del tipo Soundblox A, mentre la parte superiore è stata ricoperta con pannelli di Eraclit montati in aderenza con la sola interposizione di lana di roccia.
- Lo stesso discorso vale per la parete curva della cabina di proiezione.

9.7 – Case study

- **Pavimento:**
 - per motivi di manutenzione e di durata doveva essere di marmiglia: quindi abbiamo solo potuto consigliare di ricoprire di moquette le corsie.
- **Palcoscenico:**
 - è stato interamente rivestito con pannelli di Eraclit nero montati in aderenza con la sola interposizione di lana di roccia, il pavimento, invece, è in legno massello.
- **Porte:**
 - sono state scelte con un adeguato potere fonoisolante (> 41.0 dB) e ricoperte in legno.
- **Tende:**
 - sono state scelte con un giusto coefficiente di fonoassorbimento e percentuale di ricchezza.

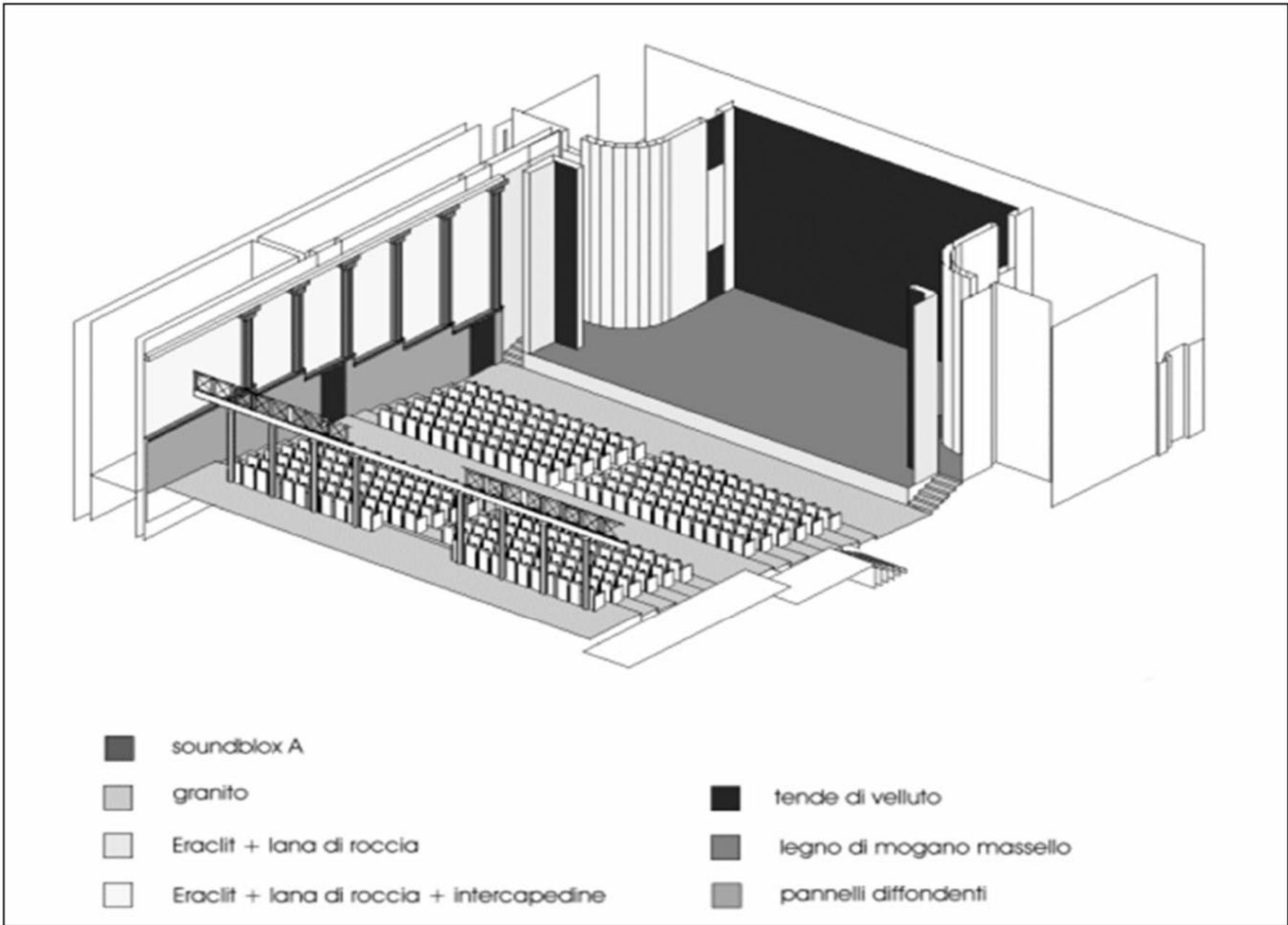
9.7 – Case study

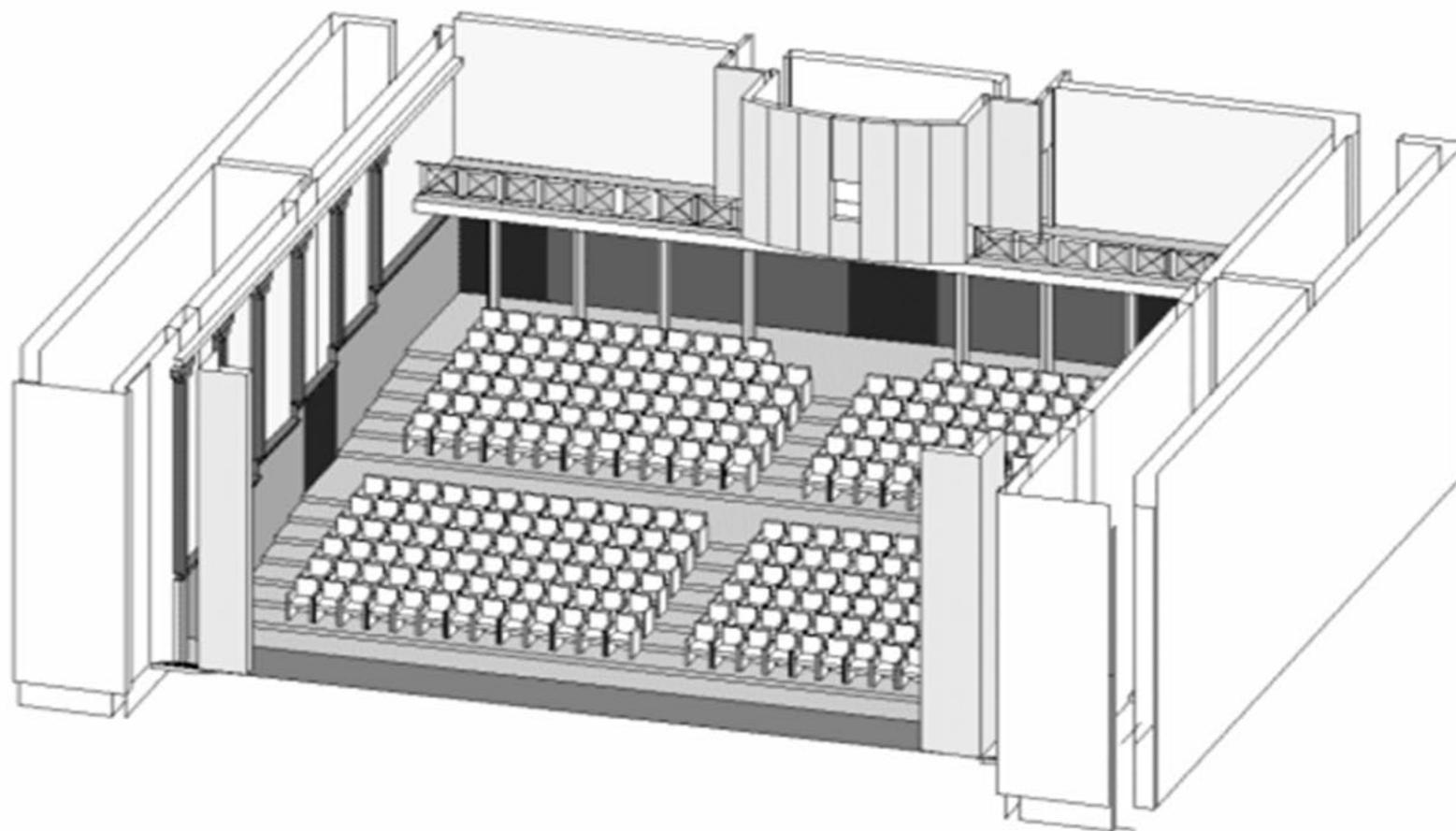
- In figura [slide 61] vengono riportate le **caratteristiche acustiche dei vari materiali prescelti**, così come sono state fornite dalle ditte ed inserite nel modello numerico.
- La scelta dei materiali è stata raffinata introducendone in quantità e disposizioni diverse e poi facendo calcolare a Ramsete i risultati.
- In particolare, la soluzione definitiva è consistita nell'utilizzo dei materiali in tabella e nell'utilizzo di elementi diffondenti in mogano.
 - Ciascuno di questi elementi sarà alto circa 2 m (da terra alla base delle lesene) avrà uno spessore di 3 cm e sarà installato a ridosso di pannelli di lana di roccia.

9.7 – Case study

- Caratteristiche acustiche dei materiali

coefficienti di fonoassorbimento										
Hz	31.5	63	125	250	500	1 k	2 k	4 k	8 k	16 k
Eraclit travertino + lana di roccia	0.20	0.20	0.20	0.25	0.48	0.48	0.37	0.40	0.40	0.40
Eraclit travertino + lana di roccia + intercapedine aria	0.37	0.37	0.37	0.48	0.42	0.42	0.40	0.45	0.45	0.45
Elementi diffusori in mogano K3	0.21	0.21	0.21	0.22	0.28	0.20	0.20	0.20	0.25	0.25
Tende velluto	0.01	0.02	0.05	0.12	0.35	0.45	0.38	0.36	0.36	0.43
Controsoffitto	0.11	0.21	0.28	0.35	0.46	0.55	0.54	0.53	0.52	0.52
Soundblox A	0.55	0.55	0.55	0.70	0.45	0.60	0.40	0.38	0.38	0.38





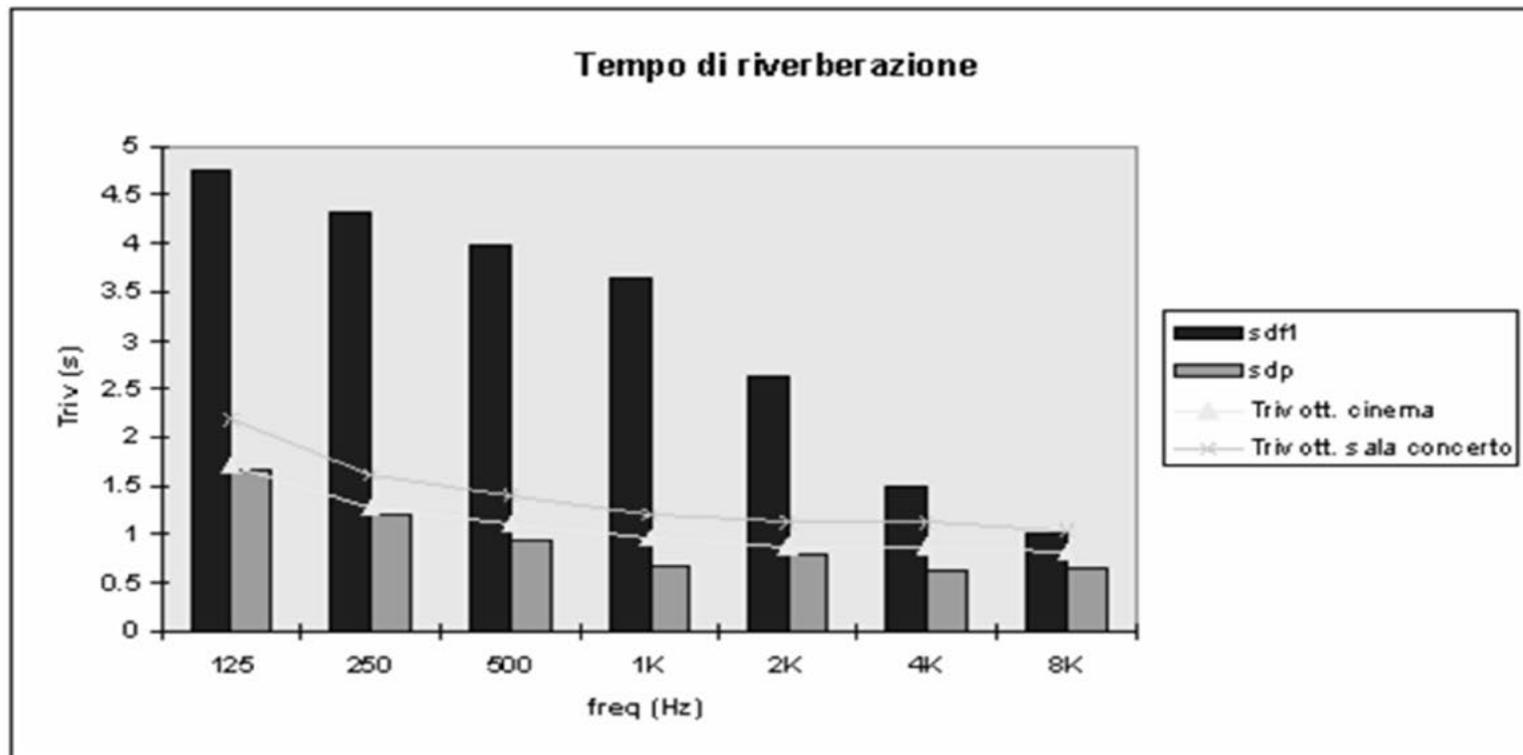
- | | | | |
|---|--|---|--------------------------|
|  | soundblox A |  | tende di velluto |
|  | granito |  | legno di mogano massello |
|  | Eraclit + lana di roccia |  | pannelli diffondenti |
|  | Eraclit + lana di roccia + intercapedine | | |

9.7 – Case study

- Il **modello** che si è introdotto in Ramsete consiste quindi nella **geometria della sala**, con l'attribuzione ad ogni superficie del particolare materiale scelto; sono stati disegnati anche il palcoscenico, il controsoffitto e le poltroncine.
- Con il modello matematico si sono poi ottenute le **nuove risposte all'impulso ed i risultati ottenuti per i valori del T20** sono riportati in figura [slide 65].
 - I valori visualizzati nel grafico sono leggermente inferiori a quelli massimi previsti per cinema, sala da conferenze e musica da camera.

9.7 – Case study

- **Confronto dei tempi di riverbero simulati nella postazione 1 (Sorgente S1,platea) dello stato di fatto e dello stato di progetto senza quinte acustiche**



9.7 – Case study

- **Progettazione di quinte acustiche**
 - Sul palcoscenico è stato previsto l'impiego di **otto quinte acustiche** (modello tri-angle) appositamente progettate.
 - Tali quinte sono di **sezione triangolare** e su una **faccia hanno caratteristiche fonoassorbenti** mentre **dall'altra, essendo realizzate in massello di mogano, sono riflettenti e diffondenti.**

9.7 – Case study

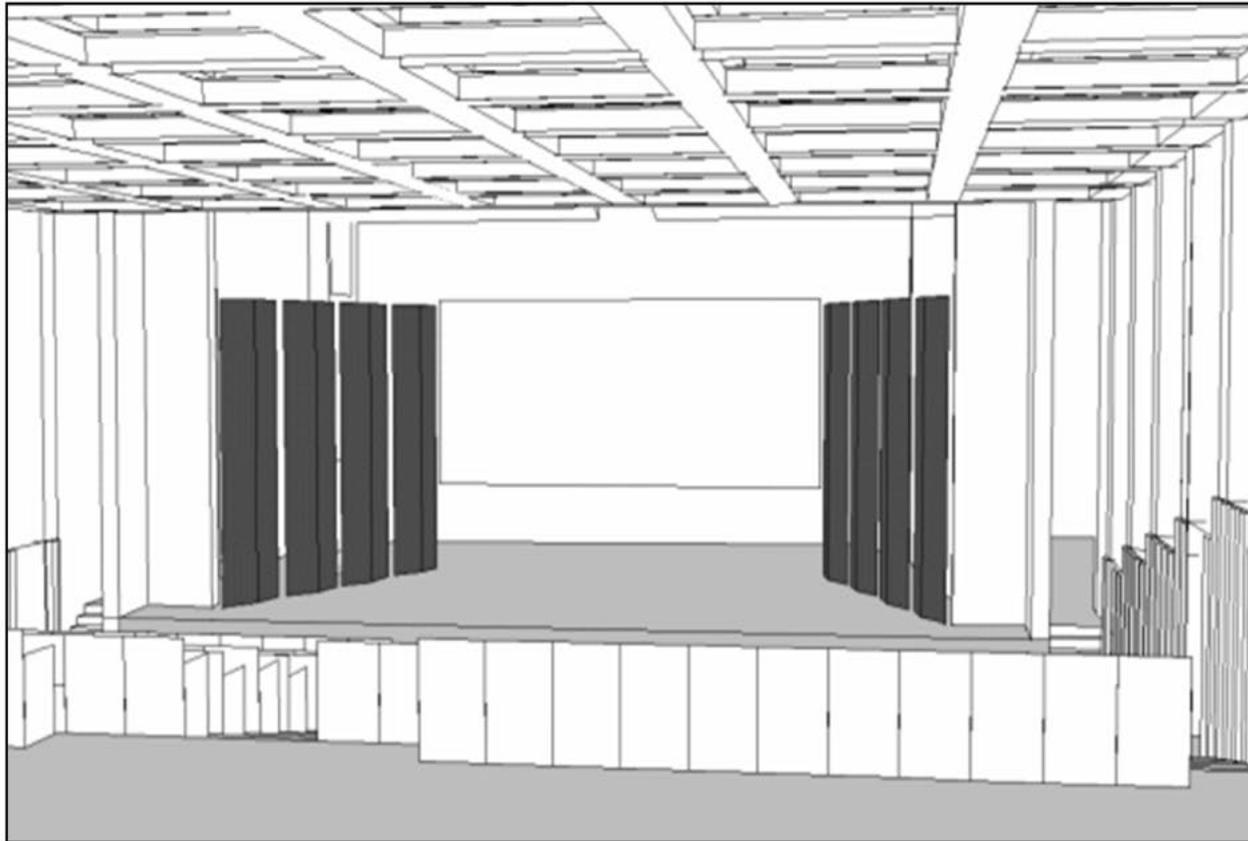
- Tali **quinte**, alte circa 5 m:
 - possono ruotare e scorrere su binari incassati nella pavimentazione del palcoscenico formando un **numero pressochè illimitato di combinazioni con diverse peculiarità acustico-estetiche**;
 - possono essere impacchettate e riposte di fianco allo schermo cinematografico senza occupare inutilmente spazio.

9.7 – Case study

- **configurazione acusticamente diffondente:**
 - in questa posizione (figura [slide 69]) le quinte seguono le pareti laterali del palcoscenico mostrando la parte in legno;
 - è indicata per **concerti non amplificati** quando non ci sono problemi di ritorni microfonicici e gli esecutori devono essere avvolti nel campo sonoro.
 - Tale configurazione potrebbe essere completata da un soffitto in legno inclinato opportunamente a formare una vera e propria camera d'orchestra.

9.7 – Case study

- **Configurazione acusticamente diffondente**



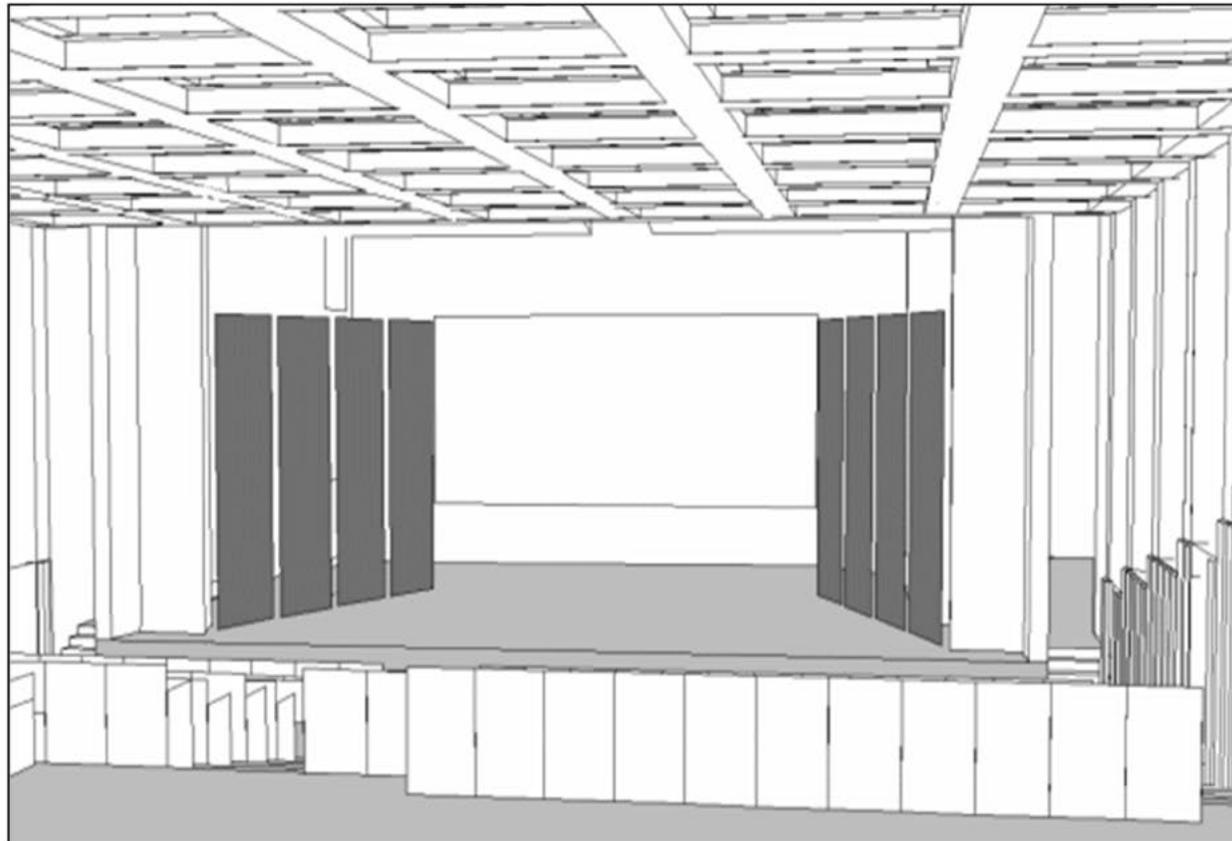
Marco Marinoni - Conservatorio «L. Marenzio» - Brescia

9.7 – Case study

- **Configurazione acusticamente assorbente:**
 - in questa posizione (figura [slide 71]) le quinte seguono le pareti laterali del palcoscenico mostrando la parte in tessuto, cioè quella assorbente.
 - In tale modo si può utilizzare la sala per il **cinema**, per **conferenze** e per **concerti amplificati**.

9.7 – Case study

- **Configurazione acusticamente assorbente**

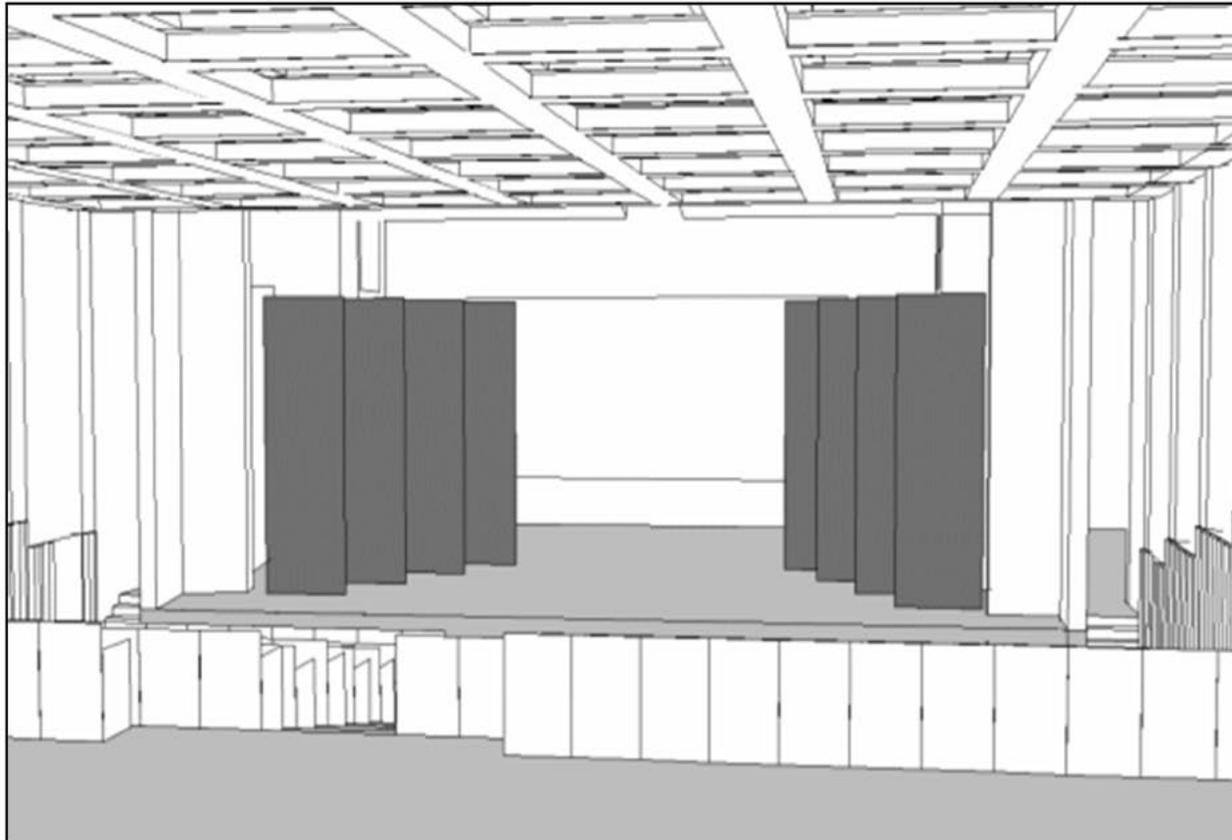


9.7 – Case study

- **Configurazione a quinte assorbenti:**
 - in questa posizione (figura [slide 73]) le quinte sono disposte, una parallela all'altra, mostrando la parte in tessuto.
 - Tale configurazione è adatta ad un **uso teatrale del palcoscenico (spettacoli amplificati in genere come balletto, prosa...).**

9.7 – Case study

- **Configurazione a quinte assorbenti:**



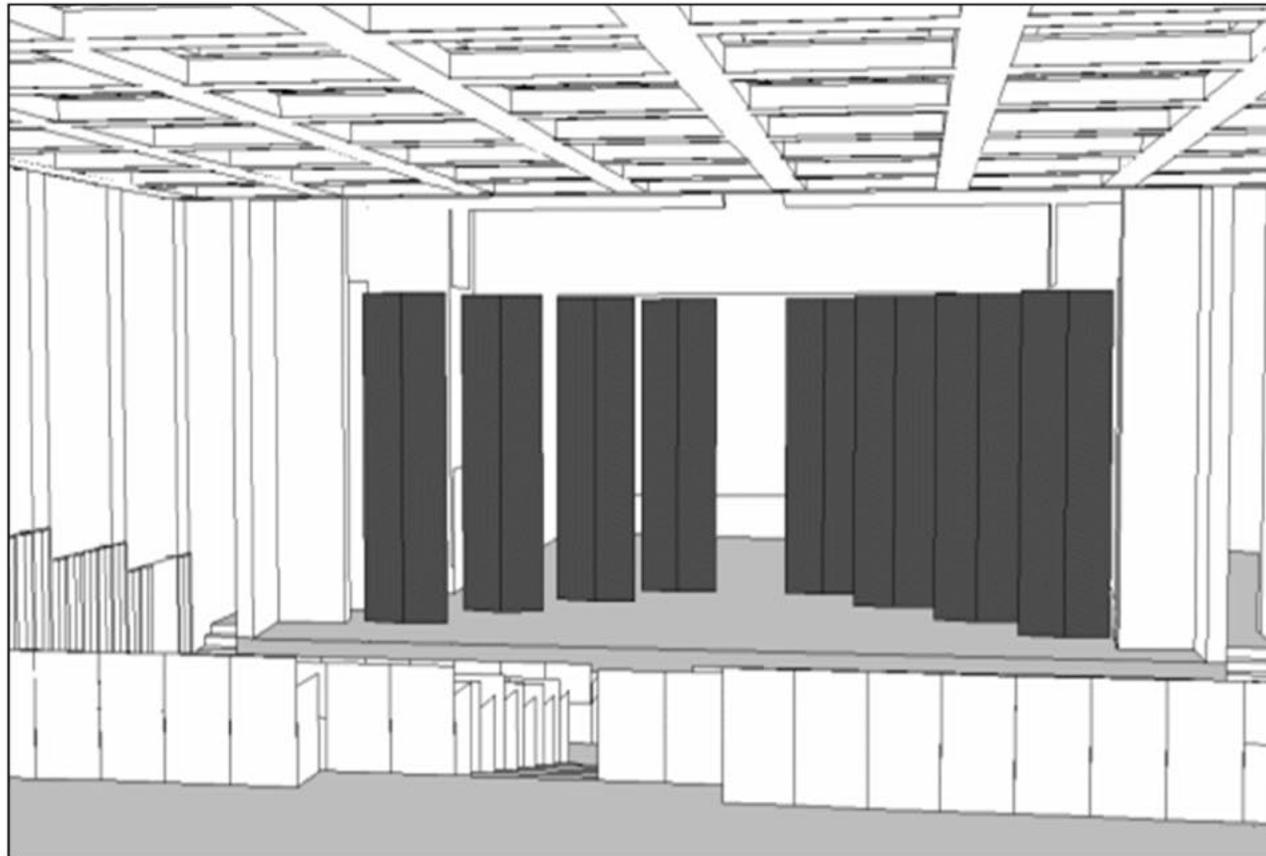
Marco Marinoni - Conservatorio «L. Marenzio» - Brescia

9.7 – Case study

- **Configurazione a quinte diffondenti:**
 - in questa posizione (figura [slide 75]) le quinte sono disposte, una parallela all'altra, mostrando la parte in legno;
 - è indicata per **concerti non amplificati di piccole formazioni o solisti** quando non ci sono problemi di ritorni microfonicici e gli esecutori devono essere avvolti nel campo sonoro.
 - Tale configurazione potrebbe essere completata da un soffitto in legno inclinato opportunamente a formare una vera e propria camera d'orchestra.

9.7 – Case study

- **Configurazione a quinte diffondenti**



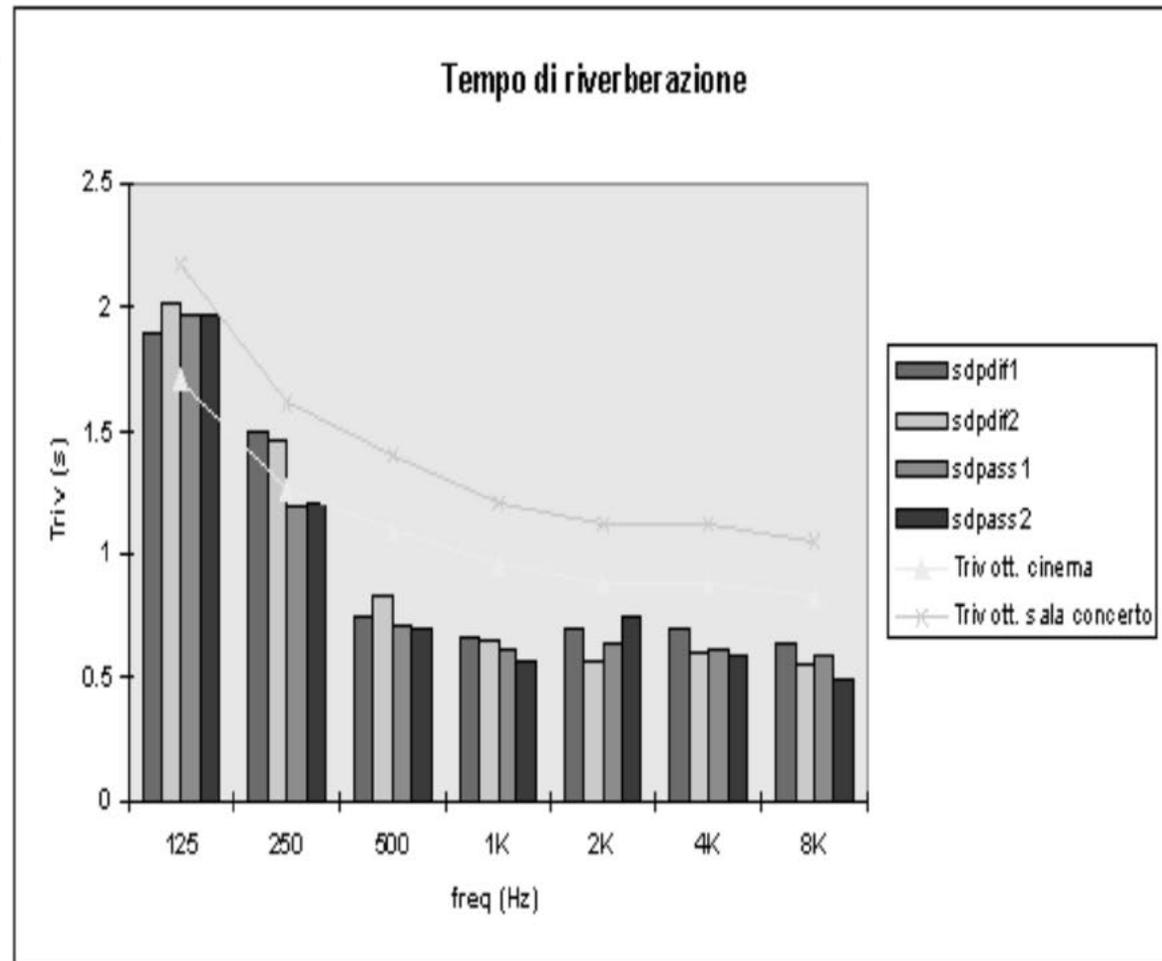
Marco Marinoni - Conservatorio «L. Marenzio» - Brescia

9.7 – Case study

- Nelle precedenti quattro configurazioni lo sfondo era costituito da tende o dallo schermo cinematografico, ma, con le stesse otto quinte si può coprire completamente il fondale, ottenendo un **palcoscenico completamente assorbente** (se allineate e girate dalla parte di tela) o **parzialmente riflettente-diffondente** (se allineate e girate dalla parte del legno).
 - Sono possibili, comunque, anche **configurazioni miste** (alcune quinte usate in modo assorbente ed altre in modo diffondente) o **posizioni asimmetriche**, a seconda dello scopo che si vuole raggiungere.

9.7 – Case study

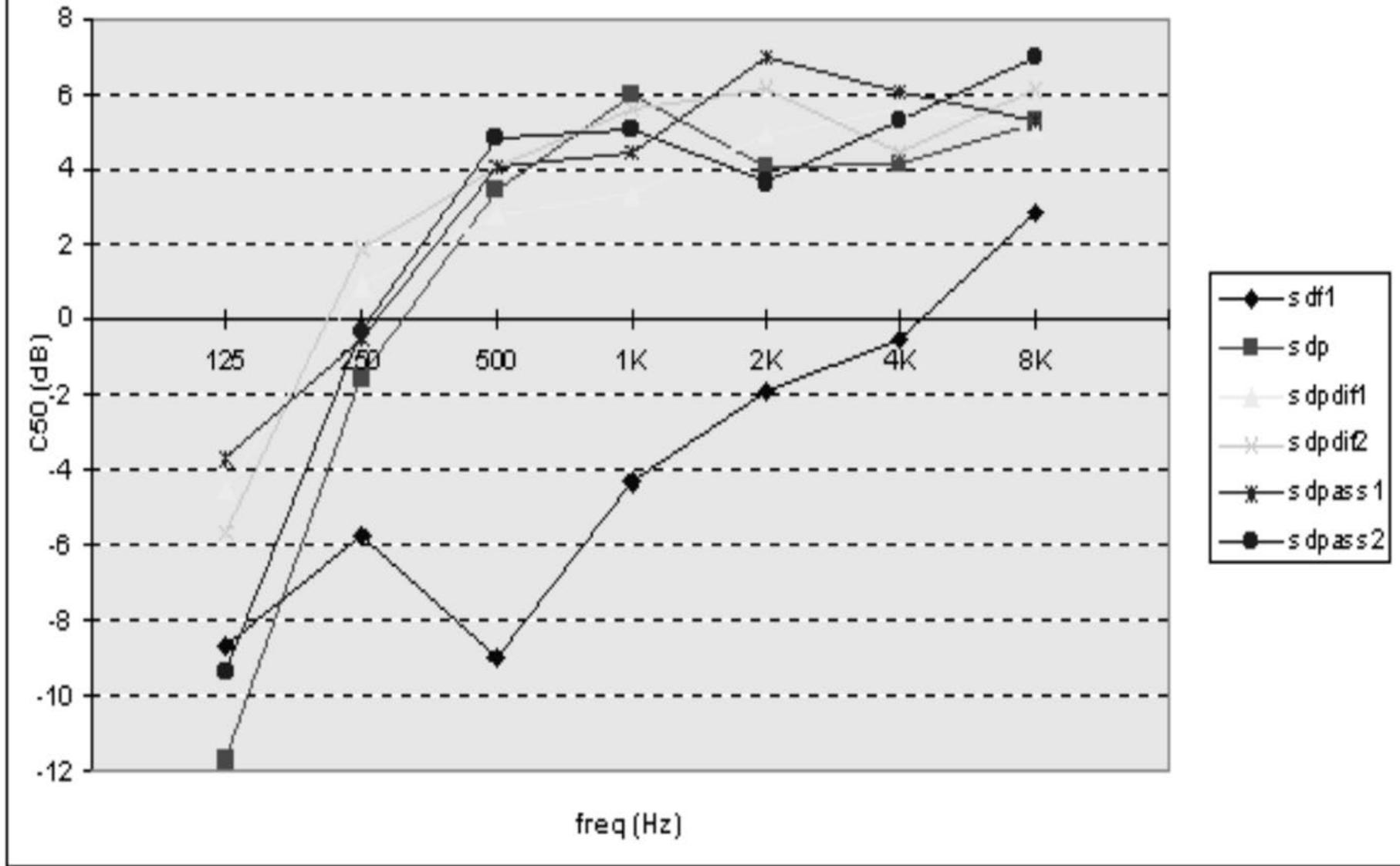
- *Confronto dei tempi di riverbero simulati nella postazione 1 (sorgente S1,platea) delle quattro configurazioni delle quinte acustiche*



9.7 – Case study

- Dai grafici degli **Indici di Chiarezza C50 e C80**;
 - utilizzati quali parametri oggettivi, per il parlato e per la musica, dopo l'intervento, si nota che entrambi sono molto aumentati rispetto allo stato di fatto, e questo consentirà di poter apprezzare la corretta articolazione della parola e del messaggio musicale, come visibile in figura [slide 79] e [slide 80].

Indice di Chiarezza C50 (parlato)



Indice di Chiarezza C80 (musica)

